

Парадигма развития науки

А. Е. Кононюк

**Основы фундаментальной
теории искусственного
интеллекта**

Книга 3

**Зрительное восприятие
изображений искусственным
интеллектом**

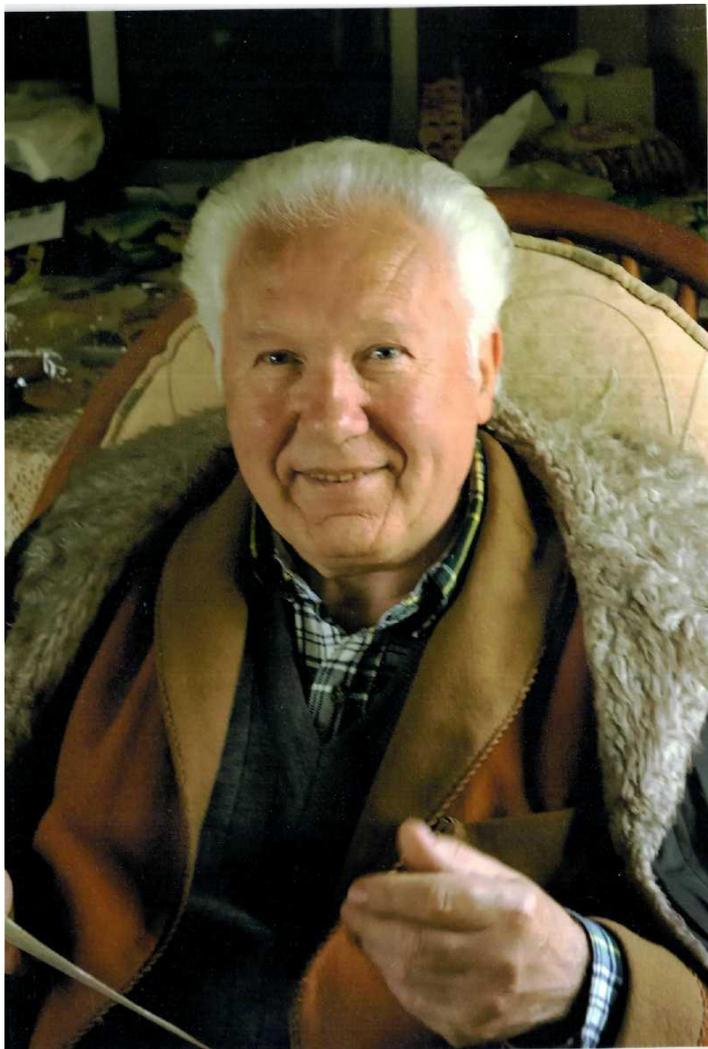
Часть 4

**Системы тепловидения как расширяющие
средства зрения в СИИ (окончание)**

Киев

«Освіта України»

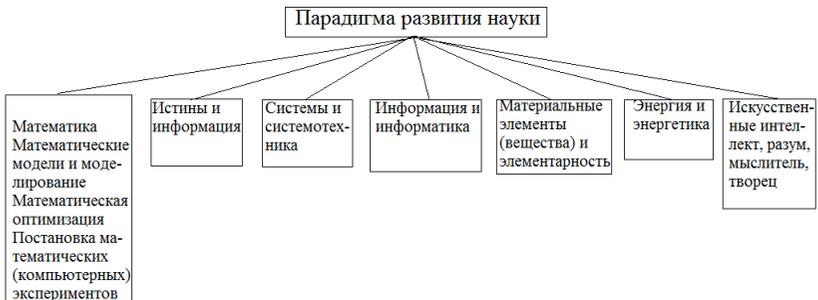
2017



Кононюк Анатолий Ефимович



Структурная схема парадигмы развития науки



УДК 51 (075.8)

ББК В161.я7

К65

Рецензент:

Н.К.Печурин - д-р техн. наук, проф. (Национальный авиационный университет).

Кононюк А. Е.

К213 Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта. — В 20-и кн. Кн.3, ч.4. — К.:Освіта України. 2017.—480 с.

ISBN 978-966-373-693-8 (многотомное издание)

ISBN 978-966-373-694-10 (книга 3, ч.4)

Многотомная работа посвящена систематическому изложению общих формализмов, математических моделей и алгоритмических методов, которые могут быть используемых при моделировании и исследованиях математических моделей объектов искусственного интеллекта.

Развиваются представления и методы решения, основанные на теориях эвристического поиска и автоматическом доказательстве теорем, а также процедуральные методы, базирующиеся на классе проблемно-ориентированных языков, сочетающих свойства языков программирования и автоматических решателей задач отображения искусственного интеллекта различными математическими средствами.

В работе излагаются основы теории отображения искусственного интеллекта такими математическими средствами как: множества, отношения, поверхности, пространства, алгебраические системы, матрицы, графы, математическая логика и др.

Для бакалавров, специалистов, магистров, аспирантов, докторантов всех специальностей.

УДК 51 (075.8)

ББК В161.я7

ISBN 978-966-373-693-8 (многотомное издание)

ISBN 978-966-373-694-10 (книга 3,ч. 4)

© Кононюк А. Е., 2017

© Освіта України, 2017

Оглавление

1. Назначение, обзор развития и классификация тепловизоров.....	9
1.1. Обзор развития тепловизоров.....	9
1.2. Классификация тепловизоров.....	15
1.3. Законы теплового излучения.....	18
1.4. Инфракрасное излучение.....	22
1.5. Отраженная радиационная температура.....	25
1.6. Деформационное теплообразование в растянутых стержнях и пластинах.....	30
1.7. Зрительное восприятие тепловизионного изображения.....	33
2. Инфракрасная термография.....	37
2.1. История развития инфракрасной технологии.....	38
2.2. Принципы работы тепловизоров.....	42
2.3. Сканеры.....	50
2.3.1. Общие сведения и техническая характеристика.....	51
2.3.2. Основные элементы конструкции сканеров.....	62
2.4. Тепловизоры с оптико-механическим сканированием.....	73
2.4.1. Оптико-механические системы сканирования.....	73
2.4.2. Сканирующие устройства и траектории сканирования.....	79
3. Влияние атмосферы на распространение оптического излучения.....	93
3.1. Явление поглощения оптического излучения в атмосфере.....	93
3.2. Явления рассеяния в атмосфере.....	95
3.3. Поглощение излучения газами атмосферы.....	97
3.4. Флуктуации параметров оптического излучения в атмосфере.....	98
4. Сигналы и помехи в оптико-электронном приборе.....	101
4.1. Детерминированные сигналы и способы их описания.....	101
4.2. Свойства спектров сигналов и их свертка.....	107
4.3. Случайные сигналы и способы их описания.....	115
5. Основные узлы и элементы ОЭП и С.....	123
5.1. Оптическая система.....	123
5.2. Энергетические характеристики ОС.....	127
5.3. Пространственно-частотные характеристики (ПЧХ) ОС.....	131
5.4. Пространственно-частотные характеристики (ПЧХ) объектов наблюдения.....	135
5.5. Спектры собственного излучения сложных тел и использование их для распознавания формы.....	141
6. Приемники оптического излучения как внутренний элемент оптико-электронных систем.....	144
7. Пересчет параметров приемника оптического излучения.....	158
7.1. Методика пересчета чувствительности приемников.....	

оптического излучения.....	158
7.2. Пересчет интегральных параметров в спектральные.....	163
8. Характеристики приемников излучения.....	164
9. Фотоэлектрические приемники оптического излучения (ПОИ).....	169
9.1. Принципы действия фотоэлектрических ПОИ.....	169
9.2. Фотоэлементы и фотоэлектронные умножители.....	172
9.2.1. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом.....	172
9.2.2. Фотоэлектрические умножители (ФЭУ).....	175
9.2.3. ПОИ на внутреннем фотоэффекте.....	180
10. Элементы общей теории оптической фильтрации.....	184
10.1. Классификация оптических фильтраций.....	184
10.2. Пространственная фильтрация в ОЭП и С.....	185
10.3. Теория пространственно-частотной фильтрации.....	187
11. Спектральная фильтрация (теория).....	193
12. Вектор-параметр Стокса и анализ произвольно поляризованного света в ОЭП и С.....	197
13. Поляризационная фильтрация в АОЭП.....	207
14. Поляризационная фильтрация в ПОЭП.....	217
15. Пространственно-частотная фильтрация оптического излучения ОЭП и С.....	221
15.1. Структура и спектр модулированного потока излучения. Отношение «сигнал/помеха».....	221
16. Приборы ночного видения (ПНВ). Процесс формирования изображения в ПНВ.....	224
16.1. Принципиальная схема ПНВ.....	224
17. Теория яркости изображения объекта и фона на экране ПНВ.....	229
17.1. Яркость изображения объекта и фона на экране ПНВ активного типа.....	230
17.2. Яркость изображения объекта и фона на экране ПНВ пассивного типа.....	232
18. Факторы, влияющие на изображения тепловизора.....	235
18.1. Факторы, влияющие на качество изображения тепловизора.....	235
18.2. Факторы, влияющие на точность измерения температуры.....	249
18.3. Цветные тепловые изображения с тепловизора.....	253
19. Тепловизоры с электронным сканированием.....	261
19.1. Структурные и функциональные схемы тепловизоров с электронным сканированием.....	261
19.1.1. Тепловизоры с видиконом.....	261
19.2. Электронная система развертки и траектории сканирования.....	266
20. Видиконы и пириконы.....	268
20.1. Устройство и принцип действия видикона.....	268
20.2. Телевизионные передающие трубки, чувствительные в	

инфракрасной области спектра.	273
20.3. Термикон и фильтрскан.	281
20.4. Пириконы.	283
20.5. Суперортикон.	299
21. Тепловизионные системы.	301
21.1. Физические основы работы тепловизионных систем.	301
21.2. Тепловизоры фирмы «АГЕМА», модели 661 и модели 680.	304
21.3. Оптическая схема тепловизора «Радуга-2»	307
21.4. Тепловизионный модульный комплекс «Радуга-ЭВМ».	311
21.5. Оптическая схема тепловизора ТВ-03.	312
21.6. Функциональная схема тепловизора «Рубин»	315
22. Моделирования тепловизионных изображений.	316
23. Моделирования поляризаационных тепловизионных изображений.	318
24. Методика расчета пороговой температурной чувствительности тепловизионных устройств.	325
25. Выбор полосы пропускания частот тракта тепловизора.	331
26. Приближение М.М. Мирошникова для расчета температуры чувствительности тепловизоров.	334
27. Краткая теория температурно- частотой характеристики тепловизоров.	335
28. Работа тепловизионных систем в условиях воздействия неоднородного поля теплового излучения.	342
29. Спектр сигнала на выходе тепловизионных (ТПВ) ОЭС.	349
30. Оптические методы измерения температуры.	354
31. Анализ возможностей построения схем тепловизоров истинных температур.	361
32. Методы энергетического расчета оптико-электронных приборов и систем.	366
32.1. Цели и задачи энергетического расчета.	366
32.2. Обобщенная методика энергетического расчета.	367
32.3. Методы энергетического расчета ОЭП обнаружения, наведения, самонаведения и локации.	371
32.3.1. Дальность действия пассивных ОЭП обнаружения, наведения и самонаведения.	371
32.3.2. Дальность действия активных ОЭП лазерной локации при равномерном распределении энергии в сечении пучка лазера.	375
32.3.3. Дальность действия активных ОЭП с гауссовым распределением энергии в сечении пучка лазера.	377
32.3.4. Методы энергетического расчета активных и пассивных приборов ночного видения (ПНВ)	378
32.3.5. Методика энергетического расчета тепловизионных систем.	390

32.3.6. Методика энергетического расчета оптико-электронных радиометров и измерительных ОЭС.....	397
33. Определение параметров и характеристик тепловизоров.....	399
33.1. Основные параметры и характеристики тепловизоров.....	399
33.2. Максимальная дальность обнаружения малоразмерных теплоизлучающих объектов.....	401
33.3. Применение тепловизоров.....	412
34. Перспективы развития телевизионных систем.....	443
Литература.....	468

1. Назначение, обзор развития и классификация тепловизоров

1.1. Обзор развития тепловизоров



Тепловизоры — устройства, предназначенные для наблюдения нагретых объектов по их собственному тепловому излучению. **Они преобразуют невидимое глазом человека инфракрасное излучение в электрические сигналы, которые после усиления и автоматической обработки вновь преобразуются в видимое изображение объектов.**

В отличие от изображений в видимой на ближней инфракрасной областях спектра, полученных за счет отраженного излучения объекта и различий в отражательной способности его элементов и отражающего фона, **тепловые (инфракрасные) изображения** создаются за счет собственного теплового излучения объекта и определяются различиями в температуре и излучательной способности его элементов и окружающего фона. Изменения температуры поверхности излучения объекта в определенной мере соответствуют деталям визуально наблюдаемой картины, поэтому создаваемые тепловизором изображения в основном отвечают

представлениям о форме и размерах рассматриваемых объектов. Современные тепловизоры отличаются высокой разрешающей способностью, быстродействием, надежностью и, при этом, доступностью, позволяющей широко применять эти аппараты предприятиями и индивидуальными специалистами в системах контроля и аудита, в основном в сфере энергоснабжения, энергоэффективности, диагностики и поиска повреждений промышленного оборудования.

Помимо значительного улучшения характеристик аппаратной части, современные **термографические камеры** отличаются от предшественников переходом с аналогового на цифровое управление, использованием специализированного программного обеспечения с интуитивно понятным пользователям интерфейсом и широкими возможностями по обработке, регистрации, хранению и передаче результатов измерений и созданных на их основе отчетов.

Встроенный функционал позволяет даже неспециалистам после начального ознакомления с прибором выполнять операции, ранее доступные только узкопрофильным экспертам-термографистам со специализированной подготовкой. Первым тепловизором условно можно считать эвапорограф, в котором разность температур рассматриваемого объекта и окружающего его фона преобразовывалась в разность толщин масляной пленки, неравномерно испаряющейся в процессе нагрева (эвапорография — регистрация испарением).

В основу устройства эвапорографа были положены опыты Джона Гершеля, который использовал для эвапорографии тонкую фильтровальную бумагу, смоченную спиртом и закопченную со стороны, обращенной к наблюдаемому объекту (1840 г.). В эвапорографе Черни (1927 г.) использовалось не испарение спирта, а возгонка нафталина и камфары. Во время второй мировой войны в Германии был создан усовершенствованный вариант эвапорографа Черни — EVA. Аналогичный прибор был построен в Кембридже (США) в 1950 г. В Советском Союзе сотрудниками ГОИ имени С. И. Вавилова был разработан эвапорограф ЭВ-84. Все эти конструкции эвапорографов принадлежали к классу несканирующих тепловизоров и не получили широкого применения из-за присущих им недостатков. Время, требуемое для получения изображения в эвапорографах, достигало десятков секунд; разрешающая способность по температуре составляла около 1 °С.

Другим прибором, относящимся к классу несканирующих

тепловизоров, являлся эджеограф. Принцип его действия основан на температурной зависимости длинноволновой границы полосы собственного поглощения некоторых материалов (например, селена): край полосы поглощения смещается при изменении температуры. Если через пленку селена пропускать монохроматическое излучение от вспомогательного источника с длиной волны, близкой к длинноволновой границе полосы поглощения, интенсивность прошедшего через пленку излучения будет зависеть от ее температуры. Это явление положено в основу устройства прибора, с помощью которого можно было наблюдать и фотографировать теплоизлучающие объекты. Эджеограф позволял фиксировать перепады температур порядка ИСС при разрешающей способности 2 лин./мм и постоянной времени 2 мс.

В послевоенный период в ряде стран началась разработка сканирующих тепловизоров, в которых использовался метод развертывающего преобразования, предложенный Ф. Е. Темниковым. В начале этого периода еще не были доведены до необходимой кондиции телевизионные передающие трубки, чувствительные в инфракрасной области спектра, поэтому главное внимание было сосредоточено на разработке тепловизоров с оптико-механической системой сканирования. Одной из главных характеристик таких систем сканирования является время, необходимое для анализа теплового поля. С этой точки зрения оптико-механические системы сканирования условно классифицируют на три вида: низкоскоростные (время анализа поля $T_k > 20$ с), среднескоростные ($0,5 < T_k < 20$ с) и высокоскоростные ($T_k < 0,5$ с).

Вначале разрабатывались тепловизоры с низкоскоростной и среднескоростной системами сканирования. Так, в Потсдамской астрофизической обсерватории был создан сканирующий тепловизор с болометром, во Франции — тепловизор с фоторезистором, в США — авиационный тепловизор для получения тепловых карт местности. С 1960 г. начали разрабатываться тепловизоры с быстрой кадровой разверткой для самолетных систем переднего обзора и различных наземных применений. В литературе такие приборы получили название FLIR (от первых букв английских слов Forward Looking Infra-Red — инфракрасные приборы переднего обзора).

В одной из первых наземных систем FLIR с оптико-механическим сканированием использовались две вращающиеся преломляющие призмы для получения спиральной развертки с одноэлементным ПИ на основе антимонида индия (InSb). Мгновенное поле составляло 1 мрад при общем поле зрения 0,087 рад (5°), кадровая частота 0,2 кадра/с, разрешающая способность по температуре 1°C . Опытные образцы

самолетных систем FLIR были созданы и прошли летные испытания в 1965 г. Результаты были успешными, и в последующий период (1965—1975 гг.) было разработано несколько десятков и изготовлено несколько сот таких систем.

Техника создания тепловизоров достигла высокой степени развития с разработкой одноэлементных и многоэлементных ПИ, имеющих чувствительность, близкую к теоретическому пределу, и малую инерционность. Малогабаритные криогенные устройства охлаждения приемников и постоянный прогресс в миниатюризации электроники обеспечили создание тепловизоров с небольшими габаритными размерами и малым потреблением мощности.

В современных тепловизорах применяют ПИ на основе теллурида кадмия и ртути, имеющие рабочий диапазон длин волн от 8 до 14 мкм. Каждый приемник содержит несколько сотен чувствительных элементов и охлаждается до температуры 77 К адиабатическим микроохладителем Джоуля-Томсона, работающим в замкнутом цикле рекуперации.

Для упрощения общей схемы прибора применяют линейную мозаику приемников и сканирование, осуществляемое вращающимся барабаном с зеркальными гранями, либо колеблющимся зеркалом.

Например, поисковая головка малогабаритной системы FLIR американской фирмы «Аэронаэвроник Форд», выполнена в виде цилиндра диаметром 100 мм, длиной 130 мм и массой 1,36 кг. Система обеспечивает углы обзора по азимуту 30° и по углу места 40° с угловой разрешающей способностью 2 мрад. ПИ (на основе теллурида кадмия и ртути) состоит из 20 чувствительных элементов. Спектральный диапазон чувствительности 8...12 мкм; температурная чувствительность 0,01... 0,05 °С. Устройство охлаждения массой 2,72 кг поддерживает температуру приемника вблизи 83К-

Иначе выполнены тепловизоры с фотоэлектронной системой сканирования. Здесь изображение исследуемого теплового поля проецируется на фотокатод телевизионной передающей трубки, а затем «просматривается» электронным лучом, управляемым электрическим или магнитным полем. Несмотря на преимущества фотоэлектронной системы сканирования по сравнению с оптико-механической (в частности, возможность наблюдения быстро перемещающихся объектов), разработка тепловизоров с фотоэлектронной системой сканирования шла медленно. Причиной тому было отсутствие малогабаритных и высокочувствительных передающих телевизионных трубок, способных регистрировать собственное излучение низкотемпературных объектов.

Сообщение об одной из ранних разработок телевизионной трубки с

длинноволновой границей чувствительности около 2 мкм появилось в 1959 г.. В трубке использовалась мишень из кремния, легированного золотом, работающая при низких температурах. Однако достаточно высокой чувствительности получить не удалось. В 1962 г. был разработан инфракрасный видикон с длинноволновой границей чувствительности 2 мкм, имеющий мишень из сульфида свинца, а в 1969 г. — видикон с мишенью из PbS—PbO и мозаичной мишенью из германиевых фотодиодов. Обе трубки нуждались в охлаждении и дополнительном подсвете рассматриваемой картины.

В 1971 г. появились телевизионные передающие трубки с одномерной и двумерной мозаикой из фотодиодов на основе арсенида индия со спектральной чувствительностью от 2,5 до 3,4 мкм. Исследования показали, что эти трубки могут удовлетворительно работать в диапазоне 3...5 мкм при наблюдении объектов на земных фонах. Было предпринято несколько попыток разработки чувствительных в инфракрасной области спектра трубок по образу электронно-оптических преобразователей (термикон, фильтрскан, сервал, болокон и др.), но все они имели малую температурную чувствительность и в дальнейшем не получили широкого применения. И только изобретение **пирикона — передающей телевизионной трубки с пироэлектрической мишенью открыло новые перспективы создания тепловизоров**, способных без каких-либо устройств охлаждения наблюдать низкотемпературные объекты по их собственному излучению. В 1966 г. в СССР была впервые создана передающая телевизионная трубка с пироэлектрической мишенью. С ее помощью были получены изображения простейших фигур (круг, крест и т. п.).

Тепловые изображения, получаемые с помощью телевизионных передающих трубок-пириконов, в отличие от видимых изображений, практически не имеют теней, поэтому пространственное восприятие объектов ухудшается. Кроме того, яркие участки видимого изображения могут оказаться темными в тепловом изображении и наоборот. Тем не менее область применения тепловизоров с пириконами все время расширяется.

Развитие технологии тонкопленочных транзисторов в 60-е годы стимулировало разработку твердотельных матриц, отдельные элементы которых сканировались по двум взаимно перпендикулярным направлениям с помощью сдвиговых регистров, располагаемых по краям матрицы. Одновременно была **доказана принципиальная возможность преобразования оптических сигналов в электрические с помощью кремниевой структуры, состоящей из набора фототранзисторов**. Таким образом, исследования,

выполняемые в 60-е годы, наметили пути создания «самосканирующихся» твердотельных приборов.

В начале 70-х годов появились приборы с зарядовой связью (ПЗС), работающие как аналоговый сдвиговой регистр. ПЗС состоит из трех частей: 1) источника неосновных носителей, потенциалом которого можно управлять, и затвора, который может контролировать поступление зарядов из источника носителей в первую потенциальную яму; 2) узла переноса, состоящего из последовательностей электродов; при определенном чередовании напряжений на электродах потенциальные ямы (а с ними и зарядовые пакеты) перемещаются к выходу; 3) выходного узла, напряжение на котором зависит от поступающего зарядового пакета. Этот узел обычно подключается к МОП-усилителю. Таким образом, ПЗС позволяют осуществить линейный перенос сгруппированных на отдельных участках зарядов от одного элемента к следующему до достижения ими края матрицы. Здесь заряд детектируется как переменный во времени видеосигнал. В 70-е годы появились приборы с зарядовой инжекцией (ПЗИ), у которых в процессе считывания используется не междуячеечная, а внутриячеечная зарядовая связь. Эти приборы используются в последних образцах тепловизоров.

У большинства современных тепловизоров изображение наблюдаемого объекта воспроизводится на экране электронно-лучевой трубки. Тепловое изображение создается за счет собственного теплового излучения объекта и определяется, в основном, различиями в температуре и излучательной способности его элементов. Поэтому создаваемое тепловизором изображение лишь условно отображает форму и размеры рассматриваемого объекта.

Зрительный аппарат человека обладает особенностями, влияющими на эффективность восприятия информации, заключенной в тепловизионном изображении. Угол зрения глаза, в пределах которого качество видения удовлетворительное, составляет примерно 30° по углу места и 40° по азимуту. Поэтому соотношение сторон кадра в тепловидении (телевидении) принято 3×4 . Диапазон яркости, в котором глаз может нормально работать, составляет девять порядков, а диапазон чувствительности — десять.

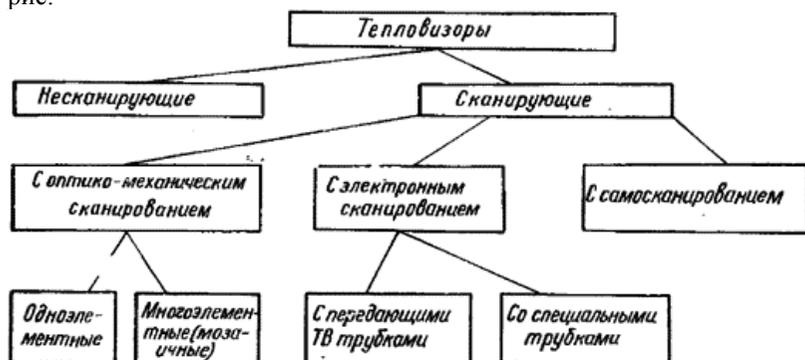
Простейшей мерой визуального разрешения является острота зрения — величина, обратная угловому размеру разрешаемой глазом детали, выраженному в угловых минутах. Максимальную остроту зрения принимают равной $1/1'$; она реализуется только при высокой яркости рассматриваемой картины.

Острота зрения резко снижается, когда объект смещается с линии зрения. Хорошее видение обеспечивается в пределах желтого пятна

сетчатки (примерно 9°) и очень хорошее — в пределах центральной части сетчатки ($1 \dots 2^\circ$). Угловой размер экрана индикатора тепловизионной системы обычно выбирается не выше 9° . Острота зрения убывает с уменьшением времени экспозиции.

Частотно-контрастная характеристика глаза на частотах, превышающих $0,2 \text{ мрад}^{-1}$, аппроксимируется выражением тепловизоров, предназначенных для наблюдения различных низкотемпературных объектов.

Одна из возможных схем классификации тепловизоров показана на рис.



1.2. Классификация тепловизоров



Классифицировать тепловизоры можно по самым различным критериям. Не претендуя на полноту классификации, приведем основные параметры, по которым современные тепловизоры можно разделить на классы в зависимости от их конструкции или применения.

По принципу получения изображения

Сканирующие тепловизоры (тепловизоры с оптико-механическим сканированием). Термограмма получается сканированием пространства. Система из вращающихся и качающихся зеркал и призм поочередно экспонирует на приемник излучение от каждой точки наблюдаемого пространства. Приемник излучения может быть одноэлементным, линейкой чувствительных элементов или небольшой матрицей. Преимуществом сканирующих систем считают то, что измерение в каждой точке термограммы получено одним датчиком (в одноэлементной системе). К недостаткам можно отнести наличие движущихся деталей и относительно низкую скорость формирования термограммы. В качестве примера сканирующих тепловизоров можно привести модели AGEMA 470, ИРТИС.

Матричные тепловизоры (тепловизоры с матрицей в фокальной плоскости, FPA — focal plane array). В фокальной плоскости оптической системы таких тепловизоров установлен многоэлементный приемник ИК-излучения — матрица. Каждая точка (пиксель) в термограмме получается как результат преобразование ИК-излучения соответствующим детектором матрицы. Размер матрицы и получаемой термограммы в современных тепловизорах сильно отличаются. В дешевых моделях начального уровня устанавливают матрицы от 60x60 точек до 180x180 точек. В профессиональных коммерческих тепловизорах устанавливают матрицы 640x480 точек. Размер матрицы сильно влияет на стоимость тепловизора, так как матрица и ик-оптика являются самым дорогими элементами тепловизоров. Большинство современных тепловизоров являются матричными, как пример можно привести модели FLIR P640 и FLIR T640 (установлены матрицы размером 640x480 точек).

По спектральному диапазону

Коротковолновые тепловизоры. Рабочий спектральный диапазон ориентировочно от 3 мкм до 5 мкм. Более правильно называть эти тепловизоры средневолновыми, так как они работают в средневолновом ИК-диапазоне, соответствующем окну прозрачности атмосферы ориентировочно от 3 мкм до 5 мкм. Коротковолновыми их стали называть по отношению к длинноволновым моделям

тепловизоров, так как в широкой практике тепловизионного контроля используются только эти два спектральных диапазона. Линзовые объективы коротковолновых тепловизоров изготавливают из кремния. Это охлаждаемые тепловизионные камеры (азотное охлаждение, термоэлектрическое, микрохолодильник Стирлинга). К коротковолновым тепловизорам относятся, к примеру, FLIR GasFindIR и FLIR SC7000.

Длинноволновые тепловизоры. Рабочий спектральный диапазон от 8 мкм до 14 мкм. Матрицы таких тепловизоров не требуют охлаждения. Линзовые объективы длинноволновых тепловизоров изготавливают из германия. Большинство коммерческих тепловизоров являются длинноволновыми, например модели FLIR P640, FLIR T640.

По типу исполнения

Стационарные тепловизоры. Предназначены для стационарной установки, наблюдения за фиксированной зоной и передачи информации по линии связи. В системах безопасности могут устанавливаться на привод наведения. В промышленности стационарные тепловизоры обычно следят за температурным режимом движущихся объектов (например, на конвейере) или поверхностей (например, вращающихся печей). Примером стационарных тепловизоров являются модели FLIR A-series.

Переносные (портативные) тепловизоры.

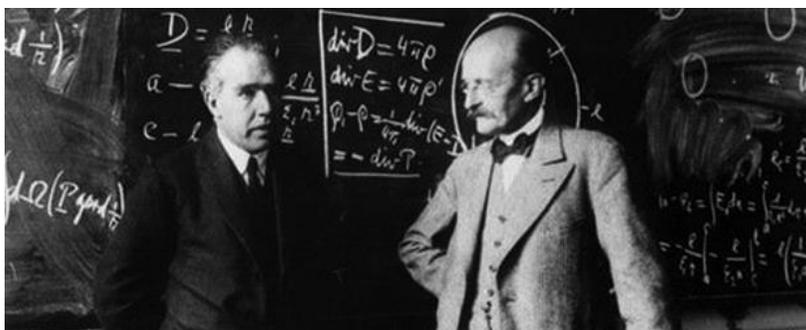
Применяются для тепловизионной съемки в строительстве, энергетике, промышленности и других отраслях. Современные модели имеют моноблочный корпус, который содержит все системы тепловизора: оптику, матрицу, электронику, экран, органы управления, носитель для записи термограмм, аккумулятор. Портативные тепловизоры также оснащаются встроенными фотоаппаратами, лазерными целеуказателями, лампами подсветки, аудио-гарнитурами. Портативные тепловизоры имеют малый вес от 350 грамм до 2 кг. Автономное аккумуляторное питание обеспечивает работу до 8 часов.

По возможности измерения температуры

Наблюдательные тепловизоры. Наблюдательные тепловизоры делают тепловое излучение объектов видимым, представляя интенсивность ИК-излучения с помощью выбранной цветовой шкалы (палитры).

Измерительные тепловизоры. Предназначены для визуализации температурных полей и бесконтактного измерения температуры поверхностей.

1.3. Законы теплового излучения



Приведенные ниже законы являются основой бесконтактного измерения температуры тепловизорами и пирометрами. Хотя эти формулы не применяются в повседневной работе, **на этих зависимостях основан пересчет температур в программном обеспечении тепловизоров.**

Закон Стефана — Больцмана

Австрийский физик и математик Йозеф Стефан (Joseph Stefan) в 1879 году путём измерения теплоотдачи платиновой проволоки при различных температурах установил пропорциональность излучаемой ею энергии четвертой степени абсолютной температуры. Теоретическое обоснование этого закона было дано в 1884 году учеником Стефана Людвигом Больцманом (Ludwig Boltzmann).

Энергетическая светимость (q) абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры (T).

$$q = \sigma \cdot T^4$$

Константа в этой формуле называется постоянной Стефана-Больцмана, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ (Вт/м}^2\text{)/К}^4$. **Энергетическая светимость** — это **мощность излучения на всех длинах волн с единицы поверхности (Вт/м²)**. Из этого следует, что **все окружающие нас объекты испускают тепловое излучение, так как всегда имеют температуру выше абсолютного нуля 0 К или минус 273°С**. При повышении абсолютной температуры в два раза, мощность излучения увеличится в 16 раз. Закон справедлив для излучения Абсолютно черного тела.

Для перехода к **реальным объектам (серым телам)** необходимо умножить результат на коэффициент излучения (степень черноты) объекта ϵ , который всегда меньше 1. Важно отметить, что закон говорит только об общей излучаемой энергии. Распределение энергии по длинам волн описывается формулой Планка.

Закон излучения Кирхгофа

Немецкий физик Густав Кирхгоф (Gustav Kirchhoff), работая над основами спектрального анализа, в 1859 году опубликовал статью «О связи между излучением и поглощением света и теплоты», в которой установил общее положение, «что для лучей одной и той же длины волны, при одной и той же температуре, отношение лучеиспускательной способности к поглощательной для всех тел одинаково». В более подробной работе 1861 года Кирхгоф детально и строго обосновал это положение, известное в настоящее время как закон Кирхгофа. Закон получен на основании второго начала термодинамики и затем подтвержден опытным путём.

Отношение излучательной способности (E) к поглощательной способности (A) одинаково для всех тел при данной температуре (T) для данной длины волны (λ) и не зависит от формы тела, его химического состава и проч.

$$E(\lambda, T) / A(\lambda, T) = e(\lambda, T)$$

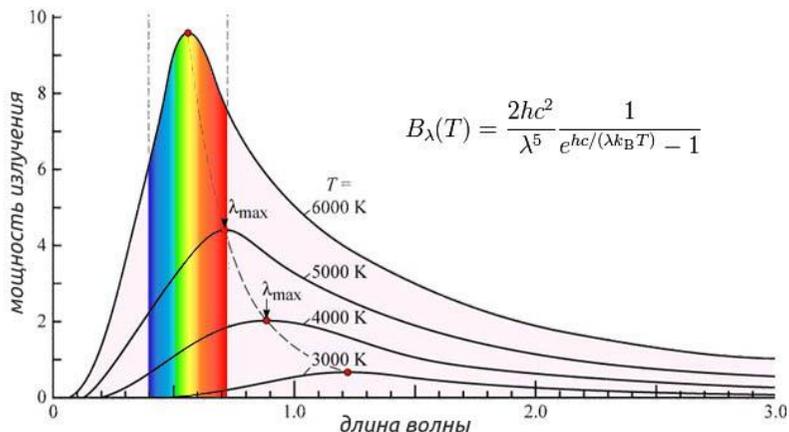
Закон излучения Кирхгофа является одним из основных законов теплового излучения и не распространяется на другие виды излучения.

Из закона следует — чем тело больше поглощает при температуре T на длине волны λ , тем оно больше излучает при данных температуре и длине волны. Таким образом, поверхности с высокой степенью черноты (коэффициентом излучения) хорошо поглощают падающее излучение и сами являются хорошими излучателями. Блестящие зеркальные поверхности с низким коэффициентом излучения мало излучают и плохо поглощают падающее на них излучение. Эта связь очень важна в инфракрасной термографии.

Реальные тела имеют поглощательную способность меньше единицы, а значит, и меньше чем у абсолютно чёрного тела излучательную способность. **Тела, поглощательная способность которых одинакова для всех длин волн, называются «серыми телами».** Их спектр имеет такой же вид, как и у абсолютно чёрного тела. **В общем же случае поглощательная способность тел зависит от длины волны и температуры, и их спектр может существенно отличаться от спектра абсолютно чёрного тела.** Изучение излучательной способности разных поверхностей впервые было проведено шотландским ученым Лесли при помощи его же изобретения — куба Лесли (*Leslie cube*).

Формула Планка

Выдающийся немецкий физик Макс Планк (Max Planck), изучая тепловое излучение, открыл его **атомный характер**. Он рассматривал модель черного тела, представлявшую собой совокупность электромагнитных осцилляторов, излучающих и поглощающих электромагнитную энергию каждый определенной частоты. **Планк принял гипотезу, что каждый осциллятор излучает и поглощает энергию конечными порциями — квантами.** В 1900 году Планк доложил Берлинскому физическому обществу о своей гипотезе и новой формуле излучения.



Распределение энергии по спектру излучения описывается формулой Планка, в соответствии с которой в спектре имеется единственный максимум, положение которого определяется законом Вина. Площадь под кривой соответствует суммарной мощности излучения по закону Стефана-Больцмана. Открытие Планка заложило основу развития квантовой физики.

Закон Вина

Важные результаты в термодинамике излучения были получены немецким физиком Вильгельмом Вином (Wilhelm Wien). В 1893 году Вин на основе термодинамических соображений впервые вывел закон, определяющий положение максимума в распределении энергии в спектре излучения АЧТ. Закон показывает, как смещается максимум распределения энергии в спектре излучения абсолютно чёрного тела при изменении температуры.

Длина волны (λ_{\max}), на которую приходится максимум энергии в спектре равновесного излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре (Т) абсолютно черного тела.

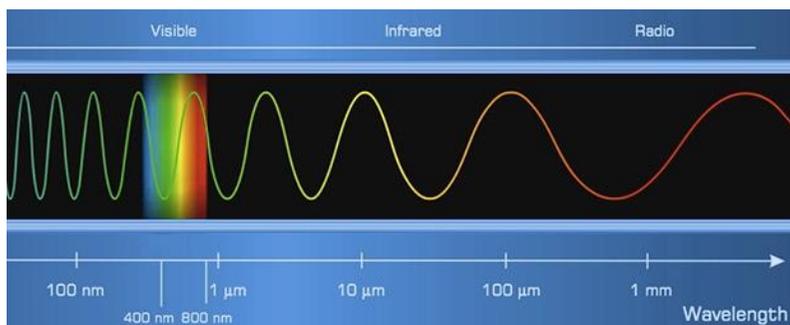
$$\lambda_{\max} = b / T$$

В приведенной формуле постоянная $b = 2,897 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$, чтобы получить результат вычисления λ_{\max} в мкм следует взять значение $b = 2897$

мкм·К. Например, при температуре 36°C максимум излучения приходится на 9,4 мкм. **При температуре порядка 6000 К (температура поверхности Солнца) максимум излучения приходится на 0,47 мкм (соответствует желтовато-белому).**

Законы Планка и Вина объясняют, почему вещество при нагреве начинает светиться в видимом спектре. Как видно из формул, при повышении температуры объекта, все больше излучения испускается с короткими длинами волн. **Начиная с температуры около 500°C это излучение уже можно наблюдать невооруженным глазом.** Вместе с тем, при понижении температуры нагретых тел в их спектре все сильнее преобладает длинноволновое излучение (например, переход белого каления в красное при остывании металла).

1.4. Инфракрасное излучение



Инфракрасное излучение — это электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между красным концом видимого света (от $\lambda = 0,74$ мкм) и коротковолновым радиоизлучением (до $\lambda = 1$ мм).

Электромагнитное излучение с самыми разными длинами волн окружает нас повсеместно и постоянно. **Видимый свет** — это тоже электромагнитные волны, которые ощущает человеческий глаз по интенсивности и спектральному составу (цвету). Для восприятия всех других электромагнитных волн нам нужны технические средства. С их помощью мы слушаем радио, смотрим телевизор, делаем рентген. **И только инфракрасное излучение от нагретых предметов может**

воспринимается кожей человека как ощущение тепла. Поэтому ИК-излучение иногда называют «тепловым» излучением.

Самым мощным инфракрасным излучателем, безусловно, является Солнце. Около 50% излучения Солнца лежит в инфракрасной области. Значительная доля (от 70 до 80%) энергии излучения ламп накаливания с вольфрамовой нитью приходится на инфракрасный спектр.

Инфракрасное излучение делят на условные диапазоны. Наименования и границы этих диапазонов связаны с техническими устройствами и задачами, решаемыми ими. Поэтому можно найти несколько вариантов деления. Приведем наиболее распространенный в сфере тепловизионного контроля:

- ближняя область (Near-infrared, NIR): $\lambda = 0,74 — 1,4$ мкм;
- коротковолновая область (Short-wave, SW): $\lambda = 1,4 — 3$ мкм;
- средневолновая область (Mid-wave, MW): $\lambda = 3 — 5$ мкм;
- длинноволновая область (Long-wave, LW): $\lambda = 8 — 14$ мкм;
- дальняя область (Far infrared, FIR): $\lambda = 14 — 1000$ мкм.

Диапазоны NIR и SW иногда называют «reflected infrared», так как в этих диапазонах при обычных температурах регистрируется не собственное, а только отраженное от объекта ИК-излучение. Основные рабочие в тепловидении диапазоны MW и LW иногда называют «thermal infrared», так как в них регистрируется собственное тепловое излучение объектов, связанное с их температурой.

Границы этих рабочих тепловизионных диапазонов определены **окнами прозрачности атмосферы**. Дело в том, что проходя через земную атмосферу, инфракрасное излучение ослабляется в результате рассеяния и поглощения. Азот и кислород воздуха ослабляют ИК-излучение в результате рассеяния, которое значительно меньше, чем для видимого света. Особенно сильно поглощают ИК-излучение пары воды и углекислый газ. К дополнительному ослаблению инфракрасного излучения приводит наличие в атмосфере взвешенных частиц: дыма, пыли, мелких капель воды (дымка, туман), а также осадки (снег, дождь).

Лучистая энергия возникает за счет энергии других видов в результате сложных молекулярных и внутриатомных процессов.

Природа всех лучей одинакова, они представляют собой распространяющиеся в пространстве электромагнитные волны. Источником теплового излучения является внутренняя энергия нагретого тела, количество лучистой энергии в основном зависит от физических свойств и температуры излучающего тела. Таким образом, все тела, температура которых отличается от абсолютного нуля, непрерывно излучают энергию. При этом длины волн, излучаемые телом, зависят от температуры: чем выше температура, тем короче длина волны и выше интенсивность излучения.

При температурах ниже 500°C излучение тела почти целиком расположено в инфракрасной области, такое тело можно увидеть глазом только при освещении, само оно не светится. При повышении температуры спектр излучения смещается в видимую область (доля излучения в видимой области увеличивается) и тело начинает само светиться. Сначала тёмно-красным, затем красным, жёлтым уже при очень высоких температурах оно кажется белым (цвета каления). **При этом возрастает как полная энергия излучения, так и энергия инфракрасного излучения.**

Для описания законов излучения применяют модель идеального объекта — абсолютно черного тела (АЧТ). Следующие законы описывают характеристики ИК-излучения:

- формула Планка (распределение энергии теплового излучения по длинам волн в зависимости от температуры),
- закон Стефана-Больцмана (зависимость мощности излучения тела от его температуры),
- закон смещения Вина (длина волны, на которую приходится максимум излучения при заданной температуре).

Связь мощности инфракрасного излучения с температурой поверхности используется для бесконтактного измерения температуры в инфракрасных пирометрах и тепловизорах.

Хотя инфракрасное излучение подчиняется законам оптики и имеет ту же природу, что и видимый свет, взаимодействие ИК-излучения с объектами имеет свои особенности. Это связано с тем, что оптические свойства веществ (прозрачность, коэффициент отражения, коэффициент преломления) в инфракрасной области

спектра, как правило, значительно отличаются от оптических свойств в видимой области.

Многие вещества, прозрачные в видимой области, оказываются непрозрачными в инфракрасных областях и наоборот. Например, небольшой слой воды непрозрачен для ИК-излучения. Пластинки германия и кремния, непрозрачные в видимой области, прозрачны в инфракрасной (**из этих материалов изготавливают линзовые объективы тепловизоров**). Чёрная бумага прозрачна в далёкой инфракрасной области. В рабочем диапазоне длинноволновых тепловизоров оконные стекла непрозрачны, а полиэтилен полупрозрачен.

Коэффициент излучения (и связанный с ним коэффициент отражения) — важнейшая характеристика поверхности объекта в инфракрасном контроле, также сильно отличается от характеристик в видимом диапазоне. У большинства металлов в ИК-области отражательная способность значительно больше, чем для видимого света. В зависимости от состояния поверхности коэффициент отражения может достигать 98%.

Измерение температуры объектов с низким коэффициентом излучения (большой степенью отражения) проблематично, так как в исходящем от них инфракрасном излучении доля собственного излучения мала (именно по нему рассчитывается температура поверхности), а доля отражения окружающих объектов высока.

1.5. Отраженная радиационная температура



В каждом измерительном тепловизоре имеется настройка двух параметров: коэффициент излучения и отраженная температура.

Рассмотрим второй параметр — **отраженную температуру**. Этот параметр может называться по-разному: кажущаяся или радиационная отраженная температура (reflected), температура фона (background), окружающая температура (ambient). В англоязычной литературе мы чаще встретим устоявшийся термин «reflected apparent temperature» (RAT).

Все окружающие нас объекты испускают собственное тепловое излучение, чем теплее объект, тем мощнее это излучение. Тепловизор может пересчитать мощность излучения в температуру объекта, для этого используются фундаментальные зависимости и калибровочная кривая тепловизора. Ситуация осложняется тем, что все объекты в ик-области отражают ик-излучение окружающих их объектов. В итоге тепловизор получает из каждой точки контролируемого объекта и его собственное, и отраженное постороннее излучение, которое является для наших измерений помехой. Чтобы учесть наличие отраженного излучения, тепловизору надо знать его мощность. Именно за это отвечает настройка в тепловизоре отраженной кажущейся температуры. Вводя в меню тепловизора значение отраженной или фоновой температуры, мы сообщаем тепловизору, в каком окружении находится контролируемая поверхность, что в ней сейчас отражается.

Так как все вычисления происходят в программном обеспечении тепловизора, от нас никаких расчетов не требуется. От нас требуется понимать, что такое отраженная температура в каждом конкретном случае, и проводить ее грамотное измерение (если сочтем это необходимым). Давайте перейдем к методам измерения отраженной кажущейся температуры.

Сначала разберемся, как поверхность отражает излучение. **Всего есть два крайних случая отражения: диффузное и зеркальное**. Тип отражения зависит от состояния поверхности.

Если поверхность ровная, неровности меньше длины волны, то она называется зеркальной. Зеркальная поверхность отражает падающие лучи направленно. При зеркальном отражении падающий луч отражается точно под углом падения. В зеркальных поверхностях мы видим отражение объектов, можем мысленно

определить, в каком направлении находится отраженный в зеркале объект. **Напротив, шероховатая поверхность состоит из разнонаправленных участков и перпендикулярно им рассеивает лучи по всем направлениям. Такое отражение называется рассеянным или диффузным.**

Измерение отраженной радиационной температуры

У зеркальных в ик-области поверхностей коэффициент излучения довольно низкий. Теория и практика показывают, что при низком коэффициенте излучения точность измерений температуры неудовлетворительная. Не стоит пытаться настроить КИ и РАТ, например, для бака из нержавеющей стали или оцинковки, небольшие погрешности знания этих двух параметров приводят к значительным погрешностям измерения температуры.

С диффузными поверхностями относительно проще. Лучшим способом измерения отраженной температуры является метод с мятой чистой алюминиевой фольгой (crinkled clean aluminum foil), описанный в стандарте ISO 18434-1:2008-03 Condition monitoring and diagnostics of machines — Thermography — Part 1: General procedures. Annex A (normative) Field measurements of reflected apparent temperature and emissivity.

Мятая алюминиевая фольга используется в качестве диффузного инфракрасного отражателя. Поверхность фольги является хорошим отражателем инфракрасного излучения, множество различно ориентированных участков отражают весь окружающий радиационный фон на тепловизор. Фольгу располагают вдоль поверхности объекта контроля.

В тепловизоре устанавливают КИ = 1 (дистанцию $D = 0$, если есть такая настройка). При этом тепловизор не вносит поправки и показывает радиационную температуру. Это важный момент, отраженная температура именно радиационная, измеренная только таким способом. С поверхности фольги снимают значение температуры. Измеренное значение — это и есть отраженная радиационная (кажущаяся) температура фона.

Не следует забывать, что при изменении условий тепловизионной съемки (изменение дистанции, ракурса, положения объекта, изменения

в окружении), отраженная температура фона изменится. Наиболее точное указание отраженной температуры в тепловизоре позволяет повысить точность температурных измерений.

Тепловой карман

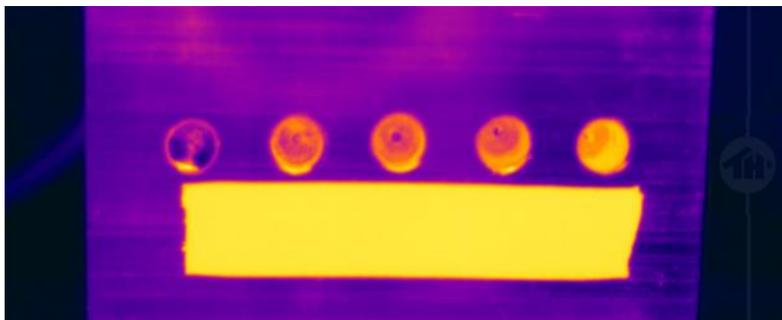
Эффект полости (cavity effect), или как его иногда называют «тепловой карман», часто помогает термографистам, но иногда неправильно оценивается и ведет к ошибкам в интерпретации термограмм. Иллюстрации в этом разделе покажут, что это за явление и как оно проявляется на термограммах.

Коэффициент излучения зависит от многих факторов. В таблице коэффициентов излучения мы найдем зависимость от материала, например древесина, бумага, бетон, краска... Также состояние поверхности влияет на значение коэффициента излучения, например полированная, гладкая, окисленная, шероховатая... Вот чего мы не найдем в таблице, так это зависимости коэффициента излучения от формы объекта контроля. Форма объекта, пожалуй, следующий по значимости фактор после перечисленных. Давайте посмотрим на эффект формы на примерах. Полости, углы и отверстия ведут себя подобно АЧТ, коэффициент излучения в них выше, чем на плоскости.

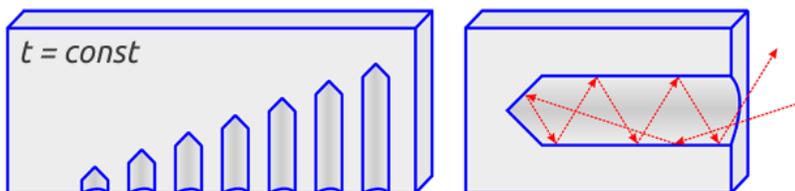
Демонстрация эффекта теплового кармана. Алюминиевый блок имеет коэффициент излучения 0,2 и коэффициент отражения 0,8 (считаем, что эти значения являются постоянными и не изменяются с углом). Мы равномерно прогрели блок до некоторой температуры, чтобы иметь отличие собственного излучения о фоновом.



Если тепловое излучение отражается от одной поверхности, 20% излучения поглощается и 80% отражается. Так происходит на внешней плоской поверхности блока. Но в отверстиях все не так. Отраженные 80% снова отражаются внутренней поверхностью отверстия, 20% излучения поглощается и 80% отражается (уже 67% от первоначального излучения). Количество последующих переотражений зависит от глубины и формы отверстия.



Таким образом, при многократных отражениях, происходящих в полости, эффективный коэффициент отражения (КО) снижается, в то время как эффективный коэффициент излучения (КИ) увеличивается. Например, в видимом свете по этой причине отверстия и полости выглядят темным — они отражают меньше видимого света. Повышение КИ приводит к более достоверным результатам, полости обладают высоким коэффициентом излучения и ведут себя подобно АЧТ.



teplonadzor.ru

К сожалению, нет возможности заранее сказать, насколько повысится коэффициент излучения в полости. Это можно установить только экспериментально, сравнивая показания с контактными приборами или

производя измерения эффективного коэффициента излучения. Обратите внимание, что использование значения коэффициента излучения, установленного для плоской поверхности, при измерении в полостях даст ошибочный результат (так как там КИ выше).

Эффект теплового кармана часто используется в тепловизионной диагностике электрооборудования и при тепловизионном обследовании промышленного оборудования. В случаях, когда коэффициент излучения поверхности слишком низок для измерения температуры, полости и отверстия приходят на помощь.

Какие могут быть трудности при термографировании объектов с полостями. Во-первых, если тепловой поток идет из глубины объекта, температура в полостях будет выше поверхностной по естественным причинам (чем глубже, тем теплее). Во-вторых, не следует ожидать повышение коэффициента излучения в углублениях и нишах, где ширина или диаметр больше глубины. Обратите внимание, на термограмме самое неглубокое отверстие (слева) повышает КИ меньше всего.

1.6. Деформационное теплообразование в растянутых стержнях и пластинах

Тепловой метод контроля на основе компьютерной термографии позволяет быстро выявлять в контролируемых объектах места расположения различных дефектов, а также проблемные участки изделий на различных стадиях их развития. Учитывая, что многие изделия, приборы, оборудование, конструкции и сооружения в процессе контроля или подтверждения их работоспособности в соответствии с действующими стандартами и техническими нормами необходимо нагружать силами (нагрузками и воздействиями), величины которых близки к предельным, то в окрестности имеющихся в них дефектов (концентраторы напряжений, несплошности, непровары, трещины и др. неоднородности мезоуровня) при различных стадиях их работы **происходит «превращение» механической энергии деформирования в тепло («деформационное тепло»).** **Деформационное тепло посредством теплопроводности материалов формирует локальные особенности поверхностного температурного поля изделия.** Температурное поле поверхности можно дистанционно зафиксировать и обработать с помощью **компьютерных термографов** и тем самым произвести визуализацию

поверхностного температурного образа видимого или невидимого дефекта.

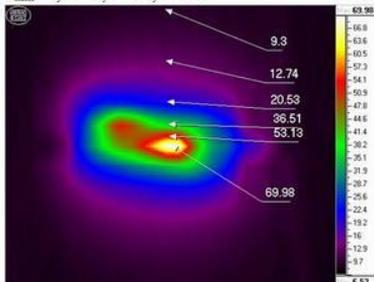
Использование теплового метода визуализации дефектов позволяет дистанционно и объективно выявлять в изделиях опасные участки, сечения с расположением дефектов. При этом на визуализацию дефектов с больших поверхностей требуется небольшое время и трудозатраты.

Такой метод визуализации дефектов особенно удобен при работе с ответственными стальными, алюминиевыми, титановыми, композитными изделиями (стальные мосты, грузоподъемные краны и устройства, разнообразные листовые конструкции, конструкции машин и их узлы и др.).

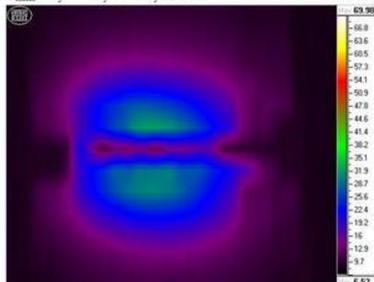
О механизме теплообразования и зарождения разрушения в стальной растянутой пластине с конструктивно-технологическим дефектом

В своих работах Е.А.Мойсейчик исследуется деформационное теплообразование в растянутых стержнях с конструктивно-технологическими дефектами. Е.А.Мойсейчик проводит данные компьютерного термографирования таких стержней в процессе нагружения, рассматривает особенности механизма деформирования стальных образцов с конструктивно-технологическими надрезами с учетом физико-химической природы теплообразования в полосах сдвига.

Кадр 49: $T_a=7,41^\circ\text{C}$; $T_{\max}=69,98^\circ\text{C}$;
 $T_{\min}=7,60^\circ\text{C}$; $\theta=56,64$ сек



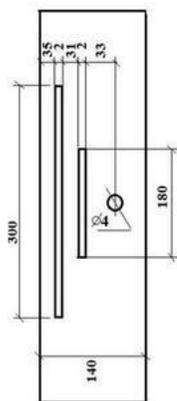
Кадр 52(излом): $T_a=7,41^\circ\text{C}$; $T_{\max}=32,51^\circ\text{C}$;
 $T_{\min}=7,77^\circ\text{C}$; $\theta=60,11$ сек



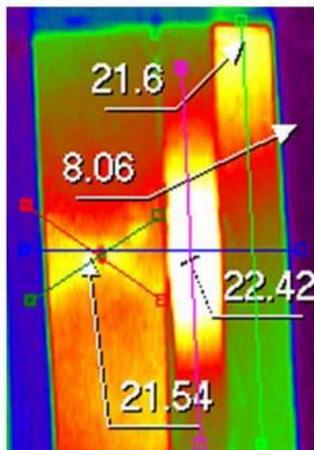
На взаимосвязь деформационного нагрева и сопротивляемости разрушению конструктивных элементов из стали впервые обратил внимание Уэллс (А.А. Wells). Ключом к уяснению механизма проявления зависимости сопротивления разрушению от характеристик напряженно-деформированного состояния в зоне надреза и температуры элементов может быть отмеченный выше факт локализации зоны пластических деформаций у надреза, появление в этой зоне (из-за деформационных воздействий) источников тепла и изменение механических свойств материала под влиянием тепла и сопутствующих процессов. Превращение энергии механического деформирования металла в окрестности дефекта в тепловую приводит к весьма существенному повышению там средней температуры. В работах Брока (L.M. Brock) показывается, что такое повышение температуры в вершине трещины в сочетании с объемным напряженно-деформированным состоянием изменяет динамику развития трещины.

Е.А.Мойсейчик экспериментально исследовал взаимосвязь разрушения растянутых стержней из малоуглеродистой строительной стали СтЗсп с деформационным теплообразованием и уточнением механизма теплообразования, зарождения и развития разрушения в окрестности конструктивно-технологических дефектов в таких стержнях.

А) $P_p = 313 \text{ кН}$,
 $\sigma_p = 395,2 \text{ кН}$



Б)



В)



Проследим весь путь такого разрушения экспериментально, при термографировании растянутых образцов с конструктивно-

технологическими дефектами. Для этой цели конструкцию образцов принимаем такой, чтобы в процессе эксперимента полосы сдвига могли зарождаться у моделей конструктивно-технологических дефектов, а размеры образцов и скорость деформирования должны позволяли фиксировать процессы деформирования методом термографирования от начала приложения нагрузки до разрушения образца. В процессе эксперимента принятые образцы нагружались квазистатически растягивающим усилием до разрушения на испытательной машине Р-100 с записью диаграммы «нагрузка-удлинение». Испытания и обработка данных проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 1497 при температуре окружающего воздуха 7,6°С. Процесс деформирования образцов отображался в термофильме с помощью компьютерного термографа «ИРТИС-2000», а обработка результатов велась программным пакетом IRTIS.

1.7. Зрительное восприятие тепловизионного изображения

Пространственная частота в плоскости предметов, наблюдаемых тепловизором, не должна быть меньше $1,1 \Gamma$, где Γ — угловое увеличение.

В результате многочисленных исследований установлено, что сигнал на экране индикатора интегрируется по площади изображения объекта, т. е. объект больших размеров воспринимается при более низкой пороговой яркости, чем объект малых размеров. Это явление называют **пространственной суммацией глаза**. Пространственная суммация является результатом пространственно-частотной фильтрации, осуществляемой глазом.

Различают также временную суммацию, обусловленную инерцией зрения, в результате которой глаз сохраняет и накапливает сигналы, разделенные малыми интервалами времени. Между пороговой яркостью L объекта, наблюдаемого в течение времени T , и пороговой яркостью $L_{,,}$ объекта, наблюдаемого бесконечно долго, существует следующая зависимость: $L = L_{,,} (1 - \tau_{гТ})$, где $\tau_{гТ}$ — постоянная времени глаза. Наиболее часто принимают 0-2 с.

Шумы, различно распределенные по пространственным частотам, поразному влияю на способность оператора обнаруживать изображение объекта на экране тепловизора. На основании экспериментальных исследований видности шумов на экране установлено следующее:

маскирующее действие белого шума зависит в основном от его

спектральной плотности, т. е. от мощности, приходящейся на единицу полосы пропускания пространственных частот, и не зависит от предельной частоты спектра шума, при условии, что эта частота превышает граничную, определяемую свойствами глаза (примерно $0,3 \text{ мрад}^{-1}$);

шум, сосредоточенный в узком спектральном диапазоне, оказывает более неприятное воздействие на глаз оператора, чем такой же по мощности шум, распределенный в более широкой полосе с той же центральной частотой. В диапазоне частот, превышающих $0,1 \text{ мрад}^{-1}$, узкополосный шум на низкой частоте более неприятен, чем шум этой же мощности в высокочастотной области;

шум в резко ограниченной полосе частот особенно неприятен, когда ширина полосы пропускания телевизионной системы приблизительно равна $0,7 \text{ мрад}^{-1}$. Раздражающее действие шума уменьшается при сужении или расширении полосы относительно этого значения;

шум в виде горизонтальных полос менее неприятен, чем шум в виде вертикальных полос в изображении, поэтому в телевизионных системах горизонтальному растру отдано предпочтение перед вертикальным;

глаз легче различает на экране протяженные объекты, откуда следует, что он воспринимает отношение сигнал/шум, характерное для объекта в целом, а не для его элементов;

глаз способен интегрировать сигналы по времени и воспринимает не мгновенное значение случайного шума, а его среднеквадратичную величину, усредненную за конечный период;

растровая структура основательно разрушает изображение, поэтому наблюдатель произвольно выбирает такую дистанцию, на которой растровая структура едва заметна. Угловой размер одной строки для глаза должен составлять $0,5 \dots 1 \text{ мрад}$ ($1,72 \dots 3,44'$). В противном случае характеристики изображения ухудшаются. При общем числе строк, приходящихся на высоту кадра, равном 240 (угловой размер одной строки, наблюдаемой на экране, равен $2,25'$) при угловом размере наблюдаемой картины 9° , качество изображения оценивается как удовлетворительное, при числе строк 180 (угловой размер одной строки $3'$) — как недостаточное, при числе строк 120 (угловой размер одной строки $4,5'$) — как приемлемое на пределе и при числе строк 60 (угловой размер одной строки $9'$) — как недопустимо плохое;

наихудший дефект изображения обнаруживается в случае, когда глаз ощущает, что изображение не непрерывно во времени.

Дефекты тепловизионного изображения, связанные с разложением на кадры при сканировании, больше всего воздействуют на его восприятие. В идеальном случае покадровая развертка, основанная на

свойствах пространственной и временной суммации глаза, обеспечивает впечатление непрерывности изображения (стробоскопический эффект). Мелькания изображения становятся неразличимыми при превышении частоты кадровой развертки некоторого значения FK_p , которое зависит от расположения мелькающего источника в поле зрения. Замечено, что FK_p растет по мере приближения источника к краю поля зрения, поэтому при использовании индикаторов большого размера необходимо обеспечить более высокую частоту кадровой развертки.

Мелькания в диапазоне альфа-ритма (3...10 Гц) считаются недопустимыми, поскольку они не только раздражают и рассеивают внимание наблюдателя, но могут вызвать утомление глаз, головную боль и симпатические ритмы в мозгу с неочевидными последствиями. Видимая яркость мигающего поля $L(t)$ при частоте мельканий, превышающей FK_p , описывается законом Тальбота:

$$L' = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} L(t) dt,$$

где L' — эквивалентная яркость стационарной картины; T_f — время кадра; L — яркость, изменяющаяся во времени. Видимая яркость равна усредненной по времени яркости. Отклонения от этого закона при экспериментальных проверках не превышали 0,3 %.

Яркость окружающего фона сильно влияет на восприятие информации, с экрана тепловизора. Обычно глаз адаптируется к средней яркости окружающего фона, поэтому попытка обеспечить хорошее восприятие за счет увеличения яркости экрана не всегда приводит к желаемым результатам, так как глаз будет работать не в оптимальных условиях. Для учета этого явления введен коэффициент kL , представляющий собой отношение яркости окружающего фона к яркости рабочей поверхности экрана. При $0,1 < kL < 1$ обеспечиваются оптимальные условия зрительного восприятия; при $kL < 0,1$ условия зрительного восприятия хуже, чем в предыдущем случае, а $kL > 1$ соответствует наихудшим условиям восприятия изображений на экране индикатора. Наблюдения теплоизлучающих объектов, оператором существенно улучшаются, когда экран тепловизора окружен равномерным фоном примерно такой же яркости.

При наблюдении на экране тепловизора объектов, находящихся на больших (предельных) расстояниях, вводят два понятия: обнаружение и распознавание. **Под обнаружением** понимают выделение объекта на окружающем его фоне и отнесение к классам объектов,

представляющих интерес. Распознавание означает отнесение обнаруженного объекта к узкому классу объектов, интересующих наблюдателя, и установление типа объектов.

При использовании аппаратуры тепловидения процесс поиска и распознавания характеризуется единой вероятностью восприятия, которая зависит от многих факторов, влияющих на этот процесс. Эти факторы определяются характеристикой объекта (угловой размер, градиенты изменения яркости на краях крупных деталей изображения, положение на экране, скорость движения, режим работы, контраст относительного фона), характеристикой наблюдателя (тренированность, утомление, возраст, интеллект, рабочая нагрузка, периферическая острота зрения, получение предварительного инструктажа), характеристикой системы (пространственно-частотная передаточная функция, число строк сканирования, приходящихся на угловой размер объекта, угловой размер экрана, тепловая постоянная времени мишени) и разнородными факторами (площадь зоны поиска, освещенность в кабине наблюдателя, вибрации изображения или наблюдателя, допустимое время поиска). К этим факторам можно добавить многие другие, поэтому определение вероятности восприятия является спорной задачей, и попытки точно предсказать, результаты натурных испытаний, связанных с определением этой вероятности, не имеют большого смысла. Однако экспериментальные исследования общих принципов поиска и распознавания представляют несомненный интерес. **На основании таких исследований установлено следующее.** Процесс визуального поиска объекта в пределах поля зрения в значительной мере определяется числом возможных фиксаций за единицу времени. Максимальное число точек фиксации приходится на центр картины; большее число точек сосредоточено в ее правой и нижней частях. Верхний левый угол картины обследуется реже всего. Время фиксации уменьшается, а расстояние между точками фиксаций возрастает с увеличением углового размера картины.

При угловом размере картины, меньшем 9° , эффективность поиска резко снижается, так как увеличивается число точек фиксации, лежащих за пределами картины. Если при угловом размере, большем 9° , число точек фиксации, лежащих за пределами картины, равно 10, то при угловом размере 6° оно составляет 50, а при 3° — 75.

Не обнаружено ухудшения характеристик поиска при движении наблюдаемого объекта по экрану тепловизора со скоростью $0..8^\circ/\text{с}$. При скорости $16^\circ/\text{с}$ время поиска увеличивается примерно на 25%, а при $31^\circ/\text{с}$ — на 100%. Горизонтальное перемещение объекта приводит

к меньшему ухудшению видения, чем вертикальное. Вероятность обнаружения объекта возрастает с увеличением времени наблюдения, углового размера объекта и его контраста на окружающем фоне.

Для обеспечения 50 %-ной вероятности распознавания объектов аппарата тепловидения должна обеспечить 15 строк, укладываемых в размер изображения объекта, а для обеспечения 90 %-ной вероятности — 24 строки.

2. Инфракрасная термография

Инфракрасная термография – это наука использования электронно - оптических устройств для регистрации и измерения излучения и сопоставления его с температурой поверхностей. Излучение – это передача тепла в виде лучистой энергии (электромагнитных волн) без промежуточной среды, используемой для передачи. Современная инфракрасная термография использует электронно-оптические устройства для измерения потока излучения и вычисления температуры поверхности обследуемых конструкций или оборудования.

Люди всегда могли чувствовать инфракрасное излучение. Нервные окончания человеческой кожи могут регистрировать изменения температуры величиной $\pm 0,009^{\circ}\text{C}$ ($0,005^{\circ}\text{F}$). Несмотря на свою высокую чувствительность, нервные окончания человека совершенно не подходят для неразрушающего теплового контроля.

Даже если бы люди обладали такой же способностью чувствовать тепло, как животные, которые могут находить теплокровную добычу в темноте, все равно потребовался бы более совершенный инструмент для обнаружения тепла. Поскольку люди имеют физиологические ограничения способности чувствовать тепло, были разработаны сверхчувствительные к тепловому излучению механические и электронные устройства. Эти устройства стали обычными для проведения теплового контроля при решении бесчисленного количества задач.

2.1. История развития инфракрасной технологии

Слово «инфракрасный» означает «за красным», что указывает на место, которое занимают эти длины волн в спектре электромагнитного излучения. Термин «термография» происходит от двух корней, которые означают «температурное изображение». Корни термографии уходят к немецкому астроному, сэру Вильяму Гершелю, который в 1800 г. проводил эксперименты с солнечным светом.



Тепловое изображение остаточного тепла, переданного рукой при прикосновении к поверхности окрашенной стены, легко обнаружить с помощью тепловизора.

Гершель открыл инфракрасное излучение, когда пропускал солнечный свет через призму, и располагал чувствительный ртутный термометр на различных цветах для измерения температуры. Гершель обнаружил, что при переходе за красный цвет в область, известную как «невидимое тепловое излучение», температура повышалась. «Невидимое тепловое излучение» лежало в области электромагнитного спектра, которая сейчас называется инфракрасным излучением. Оно так же является электромагнитным излучением. Через двадцать лет, немецкий физик Томас Зеебек открыл термоэлектрический эффект. Это привело к открытию итальянским физиком Леопольдо Нобили термобатареи на основе ранних версий термопар, в 1829 г. Это простое

контактное устройство основано на следующем явлении. При изменении температуры между двумя разнородными металлами появлялась разность потенциалов. Партнер Нобили, Македонии Меллони, вскоре превратил термобатарею в термостолбик (последовательное расположение термобатарей) и сфокусировал на нем тепловое излучение таким образом, что смог обнаруживать тепло тела с расстояния 9,1 м (30 футов). В 1880 г., американский астроном Сэмюэл Лэнгли использовал болометр для обнаружения тепла тела коровы с расстояния более 300 м (1000 футов). В болометре измеряется не разность потенциалов, а изменение электрического сопротивления, связанное с изменением температуры. Сын сэра Вильяма Гершеля, сэр Джон Гершель, используя устройство, называемое эвапорографом, получил первое инфракрасное изображение в 1840 г. формирование теплового изображения происходило за счет различной скорости испарения тонкой пленки масла, и его можно увидеть в отраженном свете. **Тепловизор** – это устройство, которое получает тепловое изображение в инфракрасной области спектра без прямого контакта с оборудованием. См. рис. 2-1.

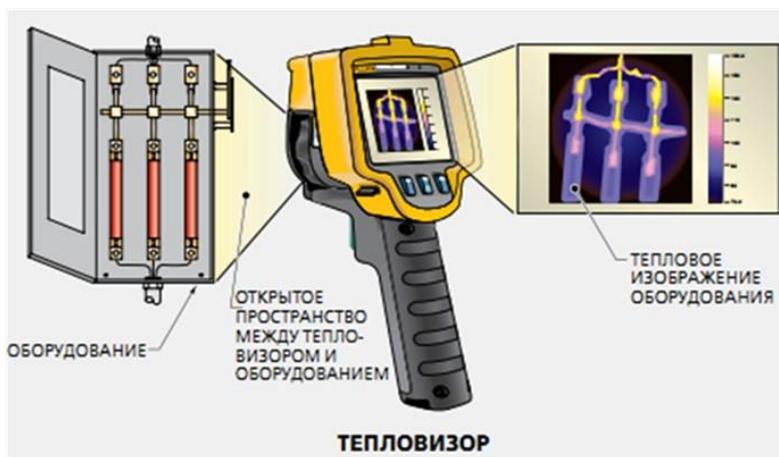


Рис. 2-1. **Тепловизор** – это прибор, который получает тепловое изображение в инфракрасной области спектра без непосредственного контакта с оборудованием.

Первые модели тепловизоров были построены на фоторезистивных приемниках излучения. С 1916 по 1918 гг. американский изобретатель Теодор Кейс экспериментировал с фотоспротивлениями для получения сигнала не за счет нагрева, а благодаря прямому взаимодействию с фотонами. В результате был получен более быстрый, более чувствительный приемник излучения на основе эффекта фотопроводимости. В течение 1940-1950-х гг. развитие тепловизионной технологии было связано с возрастающим применением для военных целей. Немецкие ученые обнаружили, что при охлаждении фоторезистивного приемника излучения, его характеристики улучшаются.

Тепловизоры для невоенных целей применялись не только до 1960-х гг. Хотя ранние тепловизионные системы были громоздкими, медленными, имели низкую разрешающую способность, их использовали в промышленности для обследования систем передачи и распределения электроэнергии. В 1970-х гг. достижения в области военных применений привели к появлению первых переносных систем, которые можно было использовать для диагностики зданий и неразрушающего контроля.

В 1970-х гг. тепловизионные системы были прочными и надежными, однако качество изображений было низким по сравнению с современными тепловизорами. К началу 1980-х гг., тепловидение широко применялось в медицине, в основных отраслях промышленности, а так же для обследования зданий. Тепловизионные системы калибровались таким образом, чтобы можно было получать полностью радиометрические изображения, чтобы радиометрические температуры можно было измерить по всему изображению. Радиометрическое изображение – это тепловое изображение, содержащее рассчитанные значения температур для всех точек на изображении.

На замену сжатому или сжиженному газу, который использовался для охлаждения тепловизоров, пришли более надежные улучшенные устройства охлаждения. Так же были разработаны и широко применялись менее дорогие тепловизионные системы на основе пировидиконов (пирозлектрических видиконных трубок). Хотя они не были радиометрическими, тепловизионные системы на основе пировидиконов имели небольшой вес, были переносными и работали без охлаждения.

В конце 1980-х гг. военные сделали доступными для широкого применения матричные приемники излучения (матрицы в фокальной плоскости, FPA). Матрицы в фокальной плоскости состоят из массива (обычно прямоугольного) инфракрасных приемников излучения, расположенных в фокальной плоскости объектива. См. Рис. 2-2.



Рис. 2-2. Матричный приемник излучения (матрица в фокальной плоскости, FPA) – это устройство получения изображения, состоящее из массива (обычно прямоугольного) чувствительных к излучению пикселей, расположенных в фокальной плоскости объектива.

Это был значительный прогресс по сравнению со сканирующими приемниками излучения, которые использовались с самого начала. Это привело к повышению качества изображения и пространственного разрешения. Типичные матричные приемники излучения современных

тепловизоров имеют размер от 16х16 до 640х480 пикселей. Таким образом, пиксель является самым маленьким отдельным элементом матричного приемника излучения, который может улавливать инфракрасное излучение. Для специальных задач существуют приемники излучения, размер которых превышает 1000х1000 элементов. Первое число представляет собой количество вертикальных колонок, а второе – количество горизонтальных линий, отображаемых на дисплее. Например, матрица размером 160х120 элементов в сумме имеет 19200 пикселей (160 пикселей х 120 пикселей = 19200 пикселей всего).

Развитие технологии матриц в фокальной плоскости, использующих различные типы приемников излучения, далеко шагнуло, начиная с 2000 г. Длинноволновые тепловизоры – это тепловизоры, которые чувствительны к инфракрасному излучению в диапазоне длин волн от 8 до 15 мкм. Микрон (мкм) – это единица измерения длины, равная одной тысячной миллиметра (0,001 м). Средневолновые тепловизоры – это тепловизоры, чувствительные к инфракрасному излучению в диапазоне длин волн от 2,5 мкм до 6 мкм. В настоящее время существуют как длинноволновые, так и средневолновые полностью радиометрические тепловизионные системы, часто с функцией наложения изображений и температурной чувствительностью 0,05 °С (0,09°F) и менее.

За прошедшее десятилетие стоимость таких систем снизилась больше чем в десять раз, а качество значительно повысилось. Кроме того, значительно возросло использование программного обеспечения для обработки изображений. Практически все современные инфракрасные системы используют программное обеспечение для облегчения анализа и подготовки отчетов. отчеты можно быстро создать и отправить в электронном виде через интернет, либо сохранить в одном из широко используемых форматов, таких, как PDF, а так же записать на одном из цифровых устройств хранения данных различных типов.

2.2. Принципы работы тепловизоров

Полезно иметь общее представление о том, как работают тепловизионные системы, поскольку для термографистов чрезвычайно важно учитывать пределы возможностей оборудования.

Это позволяет более точно выявлять и анализировать возможные проблемы. Тепловизоры предназначены для регистрации инфракрасного излучения, которое испускается объектами. См. Рис. 2-3. Объект обследуется с помощью тепловизора.

Инфракрасное излучение фокусируется с помощью оптики тепловизора на приемнике излучения, который выдает сигнал, обычно в виде изменения напряжения или электрического сопротивления. Полученный сигнал регистрируется электроникой тепловизионной системы. Сигнал, который дает тепловизор, превращается в электронное изображение (термограмму), которое отображается на экране дисплея. Термограмма – это изображение объекта, обработанное электроникой для отображения на дисплее таким образом, что различные градации цвета соответствуют распределению инфракрасного излучения по поверхности объекта. Таким образом, термографист может просто увидеть термограмму, которая соответствует тепловому излучению, приходящему с поверхности объекта.

Объекты

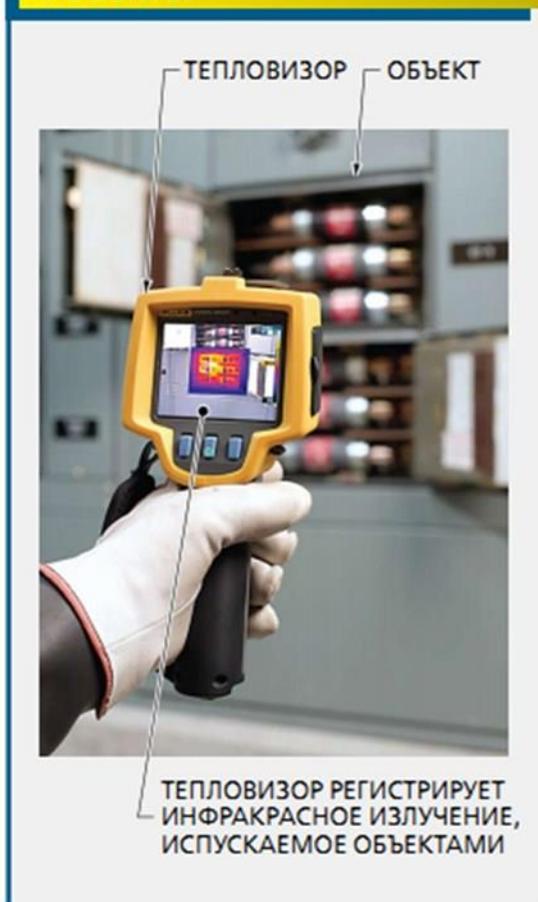
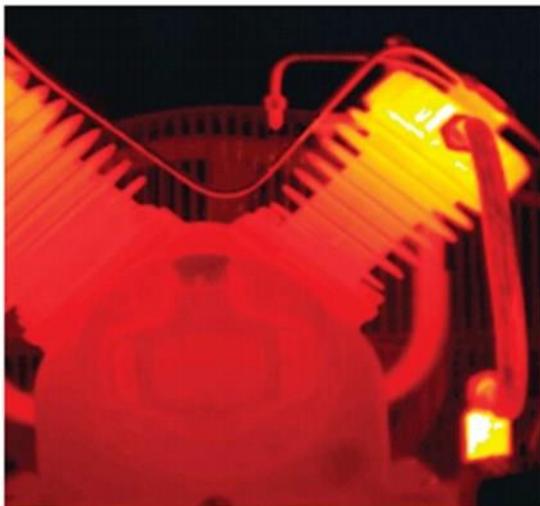


Рис. 2-3. Объект обследуется с помощью тепловизора. Назначение тепловизора – регистрация инфракрасного излучения, испускаемого объектом



Термограмма – это обработанное электроникой изображение на дисплее, где различные градации цвета соответствуют распределению инфракрасного излучения по поверхности объекта.

Компоненты тепловизора

Обычный тепловизор имеет несколько общих для всех подобных приборов компонентов, включающих объектив, крышку объектива, дисплей, приемник излучения и обрабатывающую электронику, органы управления, устройства хранения данных, а так же программное обеспечение для обработки данных и создания отчетов. Эти компоненты могут изменяться в зависимости от типа и модели тепловизионной системы. См. Рис. 2-4.

Тепловизоры



Рис. 2-4. Обычные тепловизоры имеют несколько общих компонентов, к которым относятся объектив, крышка объектива, дисплей, органы управления и ручка с ремешком

Объективы. Тепловизоры имеют как минимум один объектив. Объектив тепловизора собирает инфракрасное излучение и фокусирует его на приемнике излучения. Приемник излучения выдает сигнал и создает электронное (тепловое) изображение или термограмму. Объектив тепловизора используется для того, чтобы собрать и сфокусировать приходящее инфракрасное излучение на приемнике излучения. объективы большинства длинноволновых тепловизоров изготовлены из германия. Пропускание объективов улучшается за счет тонкопленочных просветляющих покрытий.

Так же тепловизоры обычно имеют футляр для переноски и хранения прибора, программного обеспечения и другого вспомогательного оборудования для использования в полевых условиях.

Дисплеи. Тепловое изображение отображается на жидкокристаллическом дисплее (ЖКД), расположенном на тепловизоре. Дисплей должен иметь большой размер и высокую яркость, чтобы изображение на нем можно было легко увидеть в различных условиях освещенности в различных местах работы. На дисплее часто отображается дополнительная информация, такая как уровень заряда аккумулятора, дата, время, температура объекта (в °F, °C, или K), видимое изображение и цветовая шкала температур. См. Рис. 2-5.

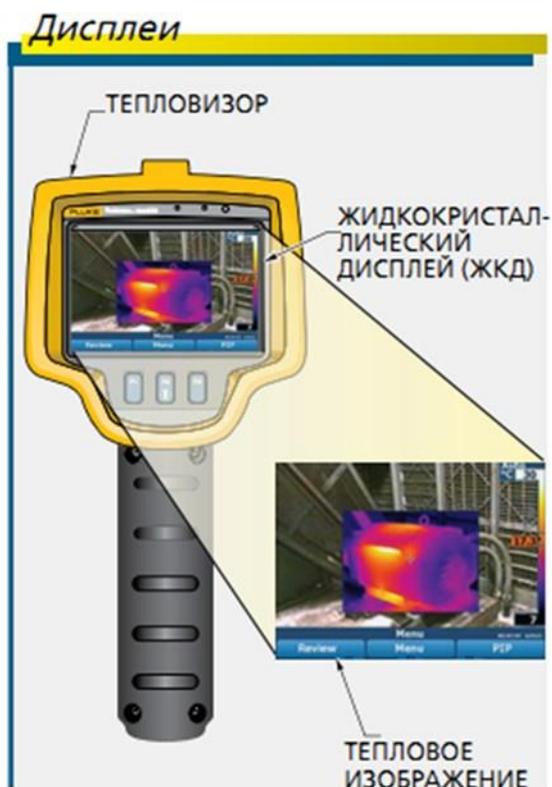


Рис . 2-5. Тепловое изображение отображается на жидкокристаллическом дисплее (ЖКД) тепловизора.

Приемник излучения и схемы обработки сигнала. Приемник излучения и схемы обработки сигнала используются для превращения инфракрасного излучения в полезную информацию. Тепловое излучение от объекта фокусируется на приемнике излучения, который обычно изготовлен из полупроводниковых материалов. Тепловое излучение генерирует измеряемый сигнал на выходе приемника излучения. Сигнал обрабатывается электронными схемами внутри тепловизора, чтобы на дисплее прибора появилось тепловое изображение.

Органы управления. С помощью органов управления можно выполнить разнообразные электронные настройки для улучшения теплового изображения на дисплее. В электронном виде изменяются такие настройки, как диапазон температур, тепловой уровень и диапазон, цветовая палитра и настройки слияния изображения. Так же можно установить значение коэффициента излучения и отраженной фоновой температуры. См. рис. 2-6

Органы управления



Рис. 2-6. С помощью органов управления можно изменить значение необходимых переменных, таких как диапазон температур, уровень и ширина диапазона, а так же другие настройки.

Устройства хранения данных. Электронные цифровые файлы, содержащие тепловые изображения и дополнительные данные, сохраняются на различных типах электронных карт памяти или устройств хранения и передачи данных. Многие инфракрасные тепловизионные системы так же позволяют сохранять дополнительные голосовые и текстовые данные, а так же соответствующее видимое изображение, полученное с помощью встроенной камеры, работающей в видимом спектре.

Программное обеспечение для обработки данных и создания отчетов. Программное обеспечение, которое используется с большинством современных тепловизионных систем, является функциональным и удобным для пользователя. Цифровые тепловые и видимые изображения импортируются на персональный компьютер, где их можно просмотреть с использованием различных цветовых палитр, произвести другие настройки всех радиометрических параметров, а так же воспользоваться функциями анализа. Обработанные изображения можно вставить в шаблоны отчетов и либо отправить на принтер, либо сохранить в электронном виде, или отправить заказчику через интернет.

2.3. Сканеры

Сканирующая репродукционная техника — прообраз современных сканеров — появилась достаточно давно. Уже в 50х годах прошлого столетия были созданы электронногравировальные автоматы для изготовления форм высокой печати (клише), а в 60х годах — электронногравировальные автоматы для изготовления форм глубокой печати и электронные цветоделителицветокорректоры. Анализирующее устройство этих машин с заданным разрешением поэлементно считывало изображение с иллюстрационного оригинала и преобразовывало значение оптической плотности изображения в аналоговые электрические сигналы. Эти сигналы обрабатывались и корректировались электронными блоками и управляли синтезирующими устройствами при гравировании форм или при записи цветоделенных фотоформ. По существу, анализирующие устройства данных машин представляли собой первые сканеры. Самостоятельные анализирующие устройства (сканеры) стали выпускать только после повсеместной компьютеризации технологических процессов обработки информации. Это позволило разделить основные операции технологического процесса подготовки

иллюстраций к печати между сканером (анализ и кодирование изобразительной информации), ЭВМ (обработка информации) и фотонаборным автоматом (вывод изображения на фотоматериал).

2.3.1. Общие сведения и техническая характеристика

Сканеры позволяют вводить в компьютер изображения, представленные на плоских носителях (обычно на бумаге, пленке или фотобумаге), а также изображения объемных объектов небольших размеров. При считывании изображения сканер дискретизирует его в виде совокупности отдельных точек (пикселей) разного уровня оптической плотности. Информация об уровнях оптической плотности этих точек анализируется, преобразуется в двоичную цифровую форму и вводится для дальнейшей обработки в систему (рис.2.7). Анализ изображения осуществляется методом сканирования (отсюда и происходит название устройства — сканер).

Процесс сканирования заключается в том, что, перемещая сфокусированный световой луч, можно произвести поэлементное считывание двумерного изображения, рассчитанного на наблюдение в отраженном или проходящем свете. Световой поток, приобретающий при этом амплитудную модуляцию вследствие взаимодействия с изображением, можно собрать и преобразовать в электрический сигнал, пригодный для передачи, обработки и записи.

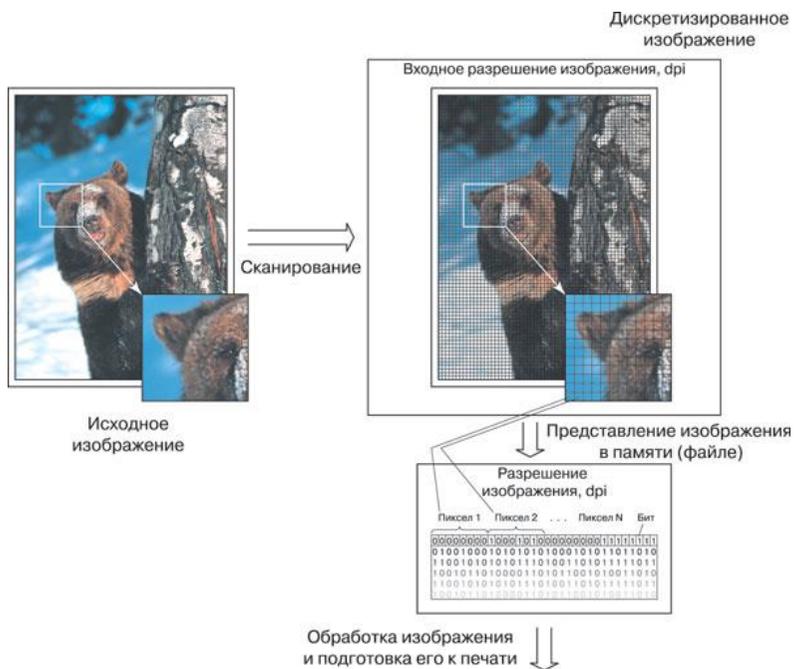


Рис.2.7. Цифровое представление изображения

Сегодня преимущественно применяется метод прямоугольного линейного растрового сканирования, при котором одиночный сканирующий луч последовательно перемещается (разворачивается) по прямым линиям с быстрым переходом от конца одной линии сканирования (строки) к началу следующей.

Растровая развертка образуется из двух ортогональных составляющих: строчной развертки (хразвертки) и кадровой развертки (уразвертки). Последняя задает интервал между соседними строками для последовательного перекрытия всего изображения.

Основные технические параметры сканеров:

- разрешение (разрешающая способность);
- глубина цвета;

- порог чувствительности;
- динамический диапазон оптических плотностей;
- максимальный формат сканирования;
- коэффициент увеличения.

Важными характеристиками сканера, определяющими область его применения, являются режимы сканирования, тип механизма сканирования оригиналов и некоторые другие технические данные.

Разрешение. Разрешение (разрешающая способность) — величина, характеризующая количество считываемых элементов изображения на единицу длины. Обычно размерность этой величины указывают в точках на дюйм. Различают физическое (аппаратное) разрешение и интерполяционное разрешение сканера.

Физическое разрешение характеризует конструктивные возможности сканера в дискретизации изображения по горизонтали и вертикали. Горизонтальное оптическое разрешение планшетных (плоскостных) сканеров, имеющих фиксированное фокусное расстояние, определяется как отношение количества отдельных светочувствительных элементов в линейке (или линейках) фотоприемника к максимальной ширине рабочей области сканера. Высокое значение оптического разрешения достигается за счет увеличения плотности регистрирующих элементов или одновременного использования нескольких фотоприемников. В последнем случае отдельные части вводимого изображения объединяются автоматически или вручную. Расстояние, на которое с помощью шагового механизма смещается сканирующая головка, определяет разрешающую способность сканера по вертикали. Разрешение вводимого изображения в вертикальном направлении определяет скорость перемещения фотоприемника относительно оригинала (или наоборот). При уменьшении разрешения увеличивается скорость сканирования.

В проекционных сканерах, а также в цифровых фотоаппаратах оптическое разрешение обычно выражается в общем числе точек в снимке, поскольку степень детализации зафиксированного

изображения зависит от удаленности объекта сканирования от регистрирующей камеры. Оптическое разрешение барабанных сканеров зависит от характеристик шагового двигателя и апертуры объектива, а также от яркости используемого источника света и максимальной частоты вращения барабана.

Во многих сканерах предусматривается возможность программного повышения разрешения — *интерполяции*. Однако это не повышает степени детализации представления изображения, а лишь понижает его зернистость. При интерполяции сканер считывает с оригинала графическую информацию на пределе своего физического разрешения и включает в формируемый образ изображения дополнительные элементы, присваивая им усредненные значения цвета соседних, реально считанных точек. Применение интерполяции в некоторых случаях позволяет добиваться хороших результатов: сглаживаются границы растровых объектов и четче прорабатываются мелкие детали.

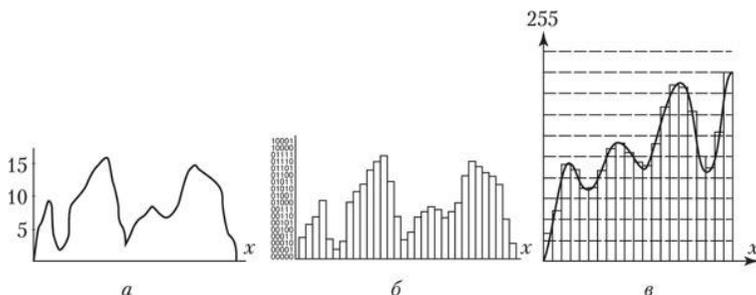


Рис.2.8. Сигнал (пример), характеризующий распределение оптической плотности в точках (x) линии сканирования

Глубина цвета — это количество битов, которые сканер может назначить при оцифровывании точки. При сканировании считывается аналоговый сигнал, характеризующий значение оптической плотности изображения. Аналоговый сигнал (рис. 2.8 а) может принимать значения из диапазона допустимых величин. Сигнал, преобразованный в цифровой эквивалент, является дискретным по множеству принимаемых значений (рис. 2.8 б). Для 8 разрядного преобразования (2^8) таких значений всего 256 (рис. 2.8 в), для 12 разрядного (2^{12}) — 4096, для 16 разрядного (2^{16}) — 65 536. Во всех случаях преобразование аналогового сигнала в цифровую форму дает ошибку

округления, составляющую иногда половину веса младшего разряда, называемую шумами квантования.

Следует отметить, что в некоторых сканерах используются 10битовая (1024 уровня серого), 12битовая (4096 уровней серого) или даже 16-битовая шкала градации яркости. Однако программы обработки изображений оперируют только 8разрядными данными. Преимущество этих сканеров заключается в снижении шумов квантования.

Порог чувствительности. При полутоновом сканировании яркость каждой точки может принимать одно из множества возможных значений (градаций яркости), а при бинарном — только одно из двух. В бинарном режиме сканер преобразует данные путем сравнения их с определенным порогом (уровнем черного). Поскольку сканер способен различать оттенки серого, следует установить порог чувствительности таким образом, чтобы сканер мог произвести классификацию элементов изображения на черные и белые. Яркость каждой точки полутонового 8битового изображения выражается числом от 0 до 255 (0 — белый, 255 — черный). Чтобы преобразовать полутоновое изображение в бинарное, сканер должен «знать» уровень (число), выше которого точка считается белого цвета (0), а ниже — черного (1). Этот уровень и называется порогом чувствительности.

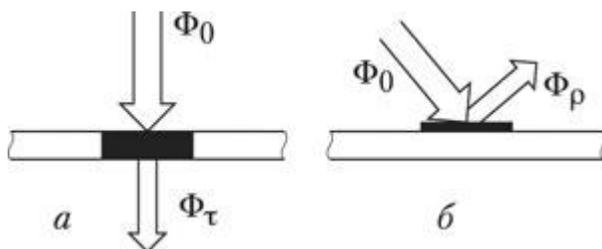


Рис. 2.9. К определению оптической плотности: а — изображение на прозрачной основе; б — изображение на непрозрачной основе

Динамический диапазон (диапазон оптической плотности) сканера характеризует его способность различать переходы между смежными тонами на изображении. Понятие оптической плотности D используется для характеристики поглощательной способности непрозрачных (отражающих) оригиналов и степени прозрачности прозрачных оригиналов и выражается через десятичный логарифм:

$$D = \lg(1/\tau) = -\lg\tau \text{ или } D = \lg(1/\rho) = -\lg\rho,$$

где $\tau = \Phi_\tau / \Phi_0$ — коэффициент пропускания материала (изображения на прозрачной основе) (рис. 2.9а), характеризующий его способность поглощать световой поток Φ_0 ; $\rho = \Phi_\rho / \Phi_0$ — коэффициент отражения (рис. 2.9б), характеризующий способность материала (изображения на непрозрачной основе) отражать световой поток Φ_0 ; Φ_τ и Φ_ρ — соответственно световой поток, прошедший материал, и световой поток, отраженный от материала.

Оптической плотности $D = 0,05$ соответствуют значения $\tau = 0,9$ или ;
 $D = 1$ соответствуют значения $\tau = 0,1$ и $\rho = 0,1$;
 $D = 2 - \tau = 0,01$; $\rho = 0,01$
и т.д.

Изда не совершенства оптической системы сканера и нелинейности спектральной характеристики фотоприемника значения параметров реальных устройств сканирования всегда ниже теоретически возможных. На практике динамический диапазон сканера определяется как разность между оптической плотностью самых темных D_{\max} и самых светлых D_{\min} тонов, которые он может реально различать. Максимальная оптическая плотность оригинала характеризует наиболее темную область оригинала, распознаваемую сканером, более темные области воспринимаются сканером как абсолютно черные. Соответственно минимальная оптическая плотность оригинала характеризует наиболее светлую область оригинала, распознаваемую сканером, — более светлые области воспринимаются сканером как абсолютно белые.

Чем шире динамический диапазон сканера, тем больше градаций яркости он сможет распознать и соответственно тем больше зафиксировать деталей изображения. Практически невозможно получить цифровое изображение с плотностью тона, превышающей 4,0. Видимо, исходя из этого, диапазон оптических плотностей сканера часто ограничивают именно этим значением.

Некоторые сканеры обладают способностью калибровки, то есть настройки на динамический диапазон плотностей оригинала. Рассмотрим это на конкретном примере. Допустим, мы имеем ПЗС-

сканер, воспринимающий оптический диапазон плотностей до 3,2. С его помощью нам нужно отсканировать слайд, имеющий максимальную оптическую плотность 4,0. Сканер выполняет предварительное сканирование для анализа оригинала и получения диаграммы оптических плотностей. Обычно такая диаграмма выглядит примерно так, как показано на рис. 2.10. После анализа диаграммы сканер производит автокалибровку с целью сдвига своего динамического диапазона восприятия оптических плотностей. Таким образом, в данном конкретном случае минимизируются потери в «теньях» благодаря несущественным потерям в «светах».

Область сканирования определяет максимальный размер оригинала в дюймах или в миллиметрах, который может быть сканирован устройством. Иногда используется также термин максимальный формат.

Коэффициент увеличения показывает (обычно в процентах), во сколько раз можно увеличить изображение оригинала в процессе сканирования. В зависимости от типа и класса сканера требуемый коэффициент увеличения либо определяется автоматически, либо устанавливается пользователем вручную перед сканированием. В автоматическом режиме драйвер сканера вычисляет требуемое входное разрешение, учитывая размер оригинала и выбранный коэффициент увеличения.

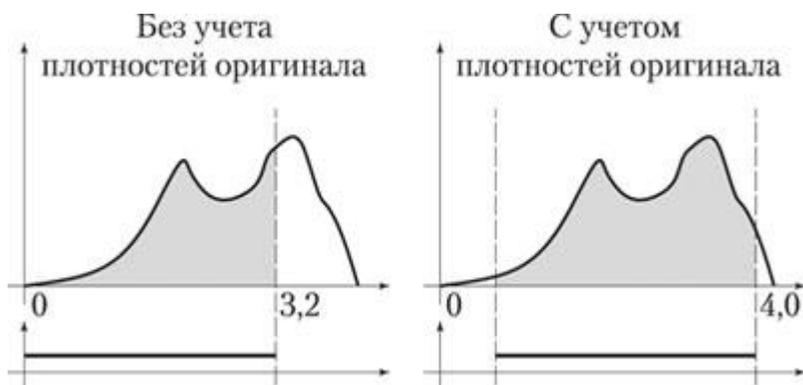


Рис. 2.10. Учет распределения плотностей оригинала

Существует математическая зависимость разрешающей способности R в точках на дюйм (dpi), с учетом которой необходимо сканировать оригинал для получения заданного качества: $R=LKM$,

где L — линиатура полиграфического растра, с которым будет производиться дальнейшая печать (lpi); M — коэффициент масштаба; K — так называемый коэффициент качества, значение которого лежит в пределах от 1,5 до 2.

Технология сканирования определяется количеством, типом и параметрами используемых фотоприемников (фотоэлектрических преобразователей).

В современных сканерах применяются в основном фотоприемники двух типов: фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и приборы с зарядовой связью (ПЗС). Иногда применяются фотодиоды (ФД).

Фотоэлектронные умножители в качестве светочувствительных приборов используются в барабанных сканерах (рис. 2.11). ФЭУ усиливают свет ксеноновой или вольфрамовогогалогенной лампы, промодулированный изображением, который с помощью конденсорных линз или волоконной оптики фокусируется на чрезвычайно малой области оригинала. Фототок, возникающий в фотоэлементе под воздействием света, прямо пропорционален интенсивности падающего на него светового потока. Особенность ФЭУ как фотоприемника заключается в том, что благодаря системе динодов коэффициент пропорциональности удается увеличить в миллионы раз (до восьми порядков). Спектральный диапазон ФЭУ для полиграфических целей также безупречен, поскольку он полностью перекрывает видимый спектр световых волн.

Датчик на основе ПЗС состоит из множества крошечных светочувствительных элементов, которые формируют электрический заряд, пропорциональный интенсивности падающего на них света. В основу работы ПЗС положена зависимость проводимости р-перехода полупроводникового диода от степени его освещенности.

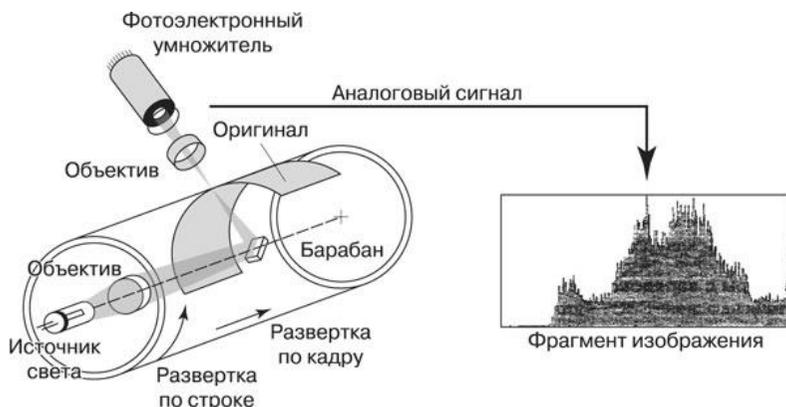


Рис. 2.11. Схема работы ФЭУ барабанного сканера

В одной линейке ПЗС может быть от нескольких сотен до нескольких тысяч фоточувствительных ячеек. Размер элементарной ячейки ПЗС является критичным параметром, так как от него зависит не только разрешающая способность сканера, но и максимальная величина удерживаемого заряда, а следовательно, и динамический диапазон устройства. Увеличение разрешающей способности сканера приводит к сужению его динамического диапазона. Хотя и считается, что спектральный диапазон ПЗС может перекрывать весь видимый спектр, но, как и у большинства полупроводниковых фотоприемников, синяя область спектра для них труднодоступна, а наибольшая чувствительность наблюдается ближе к красной области.

ПЗС используют в основном в планшетных (рис. 2.12) и проекционных сканерах, а также в цифровых фотоаппаратах. В последних двух случаях используются как линейные, так и матричные ПЗС.

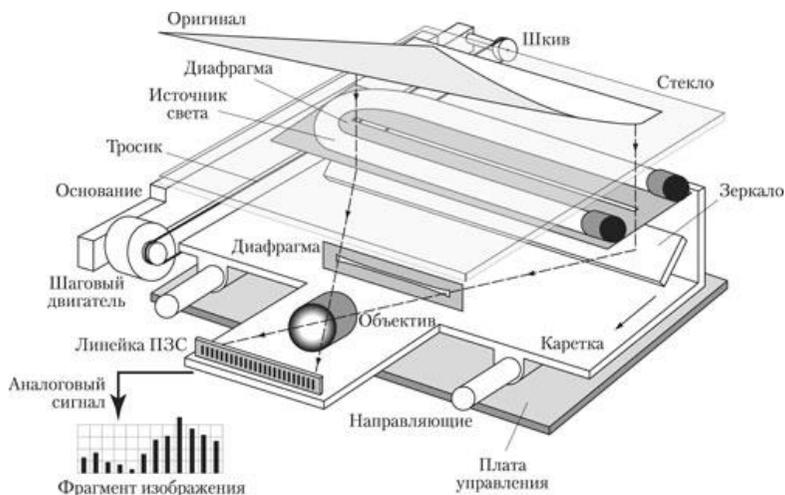


Рис.2.12. Пример использования линейного ПЗС в планшетном сканере

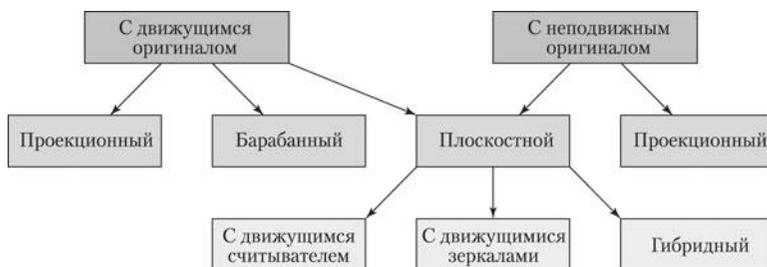


Рис.2.13. Классификация механизмов сканирования

Механизм сканирования оригиналов. Устройство сканера во многом определяется применяемым в нем фотоприемником.

Профессиональные сканеры, предназначенные для использования в системах допечатной подготовки изданий, можно классифицировать следующим образом (рис. 2.13):

- по характеру расположения оригинала — плоскостные (планшетные), проекционные, барабанные сканеры;

- по характеру перемещения оригинала — сканеры с движущимся и с неподвижным оригиналом;
- по цветности — сканеры цветные и чернобелые;
- по режиму сканирования — сканеры однопроходные (чернобелые и цветные, в которых сканирование цветного оригинала осуществляется за один проход) и трехпроходные;
- по технологии сканирования — сканеры с ФЭУ, с одной или тремя линейками ПЗС, с матрицей ПЗС;
- по виду движущихся при сканировании оптических деталей (только для плоскостных сканеров) — с движущимся считывателем, с движущимися зеркалами и гибридный, когда перемещаются и считыватель и зеркала.

Наиболее распространенный тип сканеров — планшетный (плоскостной). Почти все модели имеют съемную крышку, что позволяет сканировать толстые оригиналы (журналы, книги). Дополнительно некоторые модели могут оснащаться механизмом подачи отдельных листов, что удобно при работе с программами распознавания текстов — OCR (Optical Characters Recognition).

Планшетные сканеры для сканирования прозрачных оригиналов могут комплектоваться слайдмодулем. Слайдмодуль имеет собственный источник света и устанавливается на плоскостной сканер вместо крышки.

Основное отличие барабанных сканеров состоит в том, что оригинал закрепляется на прозрачном барабане, который вращается с большой частотой. Считывающий элемент располагается максимально близко от оригинала. Данная структура обеспечивает высокое качество сканирования. Обычно в барабанные сканеры устанавливают три фотоумножителя и сканирование осуществляется за один проход. Некоторые барабанные сканеры в качестве считывающего элемента вместо фотоумножителя используют фотодиод. Барабанные сканеры способны сканировать как непрозрачные, так и прозрачные оригиналы.

Проекционные сканеры применяются для сканирования с высоким разрешением слайдов небольшого формата (как правило, размером не более 4 x 5 дюймов). Существует две схемы построения: с горизонтальным и с вертикальным расположением оптической оси считывания. Наиболее популярным является вертикальный проекционный сканер. Существуют также проекционные сканеры, работающие на отражение, — для сканирования непрозрачных оригиналов и универсальные проекционные сканеры, которые позволяют использовать любой вид изобразительного оригинала.

2.3.2. Основные элементы конструкции сканеров

Основными элементами и устройствами, входящими в состав сканера, являются:

- источник света;
- фотоприемники;
- оптоволоконные световоды;
- микрообъективы и объективы;
- светоделительные призмы и зеркала;
- светофильтры.

Источники света. В качестве источника света в сканерах используются лампы накаливания, люминесцентные, металлогалогенные и ксеноновые лампы и лазеры.

В основе получения светового излучения ламп накаливания лежит тепловое излучение, испускаемое твердым телом при его нагревании. Отличительная особенность тепловых излучателей заключается в непрерывности и плавности спектральной кривой излучения. Для характеристики цветности излучения теплового излучателя пользуются понятием цветовая температура.

Цветовая температура (T_c) — это температура абсолютно черного тела, при котором цветность его излучения совпадает с цветностью

излучения сравнимого теплового излучателя. Так, цветовая температура дневного света составляет 6500 К, лампы накаливания с вольфрамовой нитью — 2450 К, дуговой лампы — 5500 К. Это значит, что абсолютно черное тело, нагретое до таких же температур, испускает такое же излучение, что и перечисленные источники.

Лампы накаливания состоят из следующих основных конструктивных элементов: стеклянной колбы, нити накала, держателя нити накала и металлического цоколя. У современных ламп накаливания тело накала изготавливают из вольфрамовой проволоки, свитой в одинарную или двойную спираль. Вольфрам — тугоплавкий металл, выдерживающий нагревание до высоких температур, приближающих излучение лампы к белому цвету.

Лампы накаливания, применяющиеся в сканерах, должны отвечать ряду специальных требований, поскольку являются частью точной оптической системы. Поэтому для ламп нормируются положение светового центра накала и его размеры. К лампам предъявляют повышенные требования в плане качества стекла колб, размеров, формы и расположения тела накала, конструкции цоколя. К данному типу ламп относятся также лампы накаливания с йодным циклом. Колбы этих ламп изготавливают из кварцевого стекла. Их преимущества перед обычными лампами накаливания заключаются в значительно большем сроке службы, в меньших габаритных размерах, в высокой яркости свечения и в большой световой отдаче.

Люминесцентные лампы обладают более высокой экономичностью и большим сроком службы по сравнению с лампами накаливания. Люминесцентные лампы со специальным подбором люминофоров излучают свет, близкий к дневному (белому) свету. Люминесцентная лампа представляет собой цилиндрическую стеклянную трубку, на обоих концах которой впаяны ножки с двумя контактными штырьками. Внутри баллона на цоколе укреплены электроды в виде двойных вольфрамовых спиралей, покрытых слоем окиси бария. В баллон лампы вводят несколько миллиграммов ртути. Пары ртути, в которых происходит газовый разряд, имеют небольшое давление — 0,81,43 Па. Для стабилизации газового разряда в лампу вводят инертные газы (аргон или криптон). Порошкообразные люминофоры наносят на внутреннюю поверхность трубки в виде тонкого равномерного слоя.

Металлогалогенные лампы испускают свет, близкий к дневному, обладают высокой интенсивностью, большой светоотдачей, имеют длительный срок службы.

Ксеноновые лампы относятся к разряду источников света высокой интенсивности. В качестве газовой среды в них используют тяжелый инертный газ ксенон, который дает разряд при больших плотностях тока и высоких давлениях. Излучение разряда ксенона образует непрерывный спектр, приближающийся к спектру солнечного света. Последнее обстоятельство и определило применение ксеноновых ламп в качестве источников света для фоторепродукционных работ и в анализирующих устройствах сканеров.

Лазер как источник света используется только в чернобелых сканерах, поскольку он дает монохроматическое световое излучение. В чернобелых сканерах наряду с другими источниками света применяются маломощные газовые лазеры: гелийнеоновые и аргоновые.

Фотоприемники. В сканерах плоскостного и проекционного типов, как правило, применяются приборы с зарядовой связью (ПЗС), а в барабанных — фотоэлектронные умножители и фотодиоды.

Работа ПЗС основана на свойстве конденсаторов МОПструктуры (металл — оксид — полупроводник) собирать и накапливать пакеты неосновных носителей зарядов в локализованных потенциальных ямах на границе кремнийоксид кремния. Структура МОПконденсатора приведена на рис. 2.14 а. Монокристаллическая кремниевая подложка, например, дырочного ртипа проводимости покрыта диэлектриком — тонким (~0,1 мкм) слоем оксида, на котором расположен металлический электродзатвор. При приложении к этому электроду положительного относительно подложки напряжения основные носители (дырки) в слое кремния у границы с оксидом будут отталкиваться от электрода, покидая поверхностный слой. Под электродом образуется потенциальная яма — область, обедненная основными носителями. «Глубина» этой ямы зависит от напряжения на затворе U .

Воздействие света приводит к появлению электроннодырочных пар и к накоплению неосновных носителей (электронов) в потенциальной яме. Накопленный заряд пропорционален освещенности и времени накопления. Направленная передача накопленных зарядов в ПЗС от

одного МОПконденсатора к близко расположенному соседнему производится созданием продольного электрического поля между затворами при подаче на второй затвор более высокого напряжения. Под этим электродом образуется более глубокая потенциальная яма, в которую перетекает зарядовый пакет. Этот процесс иллюстрируется рис. 2.14б, на котором штриховкой показана степень заполнения потенциальной ямы неосновными носителями, то есть величина заряда под электродом.

В качестве примера рассмотрим линейную (однорочную) структуру преобразователя, состоящего из цепочки МОПконденсаторов. На рис. 2.14 в показано, что одна ячейка, соответствующая одному элементу изображения, состоит из трех МОПконденсаторов. Затворы соседних ячеек соединены между собой по схеме трехтактного сдвигового регистра. Форма напряжения, прикладываемого к металлическим электродам 1, 2 и 3 каждой ячейки, имеет импульсный характер. Это обеспечивает однонаправленное перемещение накопленных зарядов к выходному устройству. Предположим, что под электродами 1 накоплены заряды, величина которых соответствует распределению освещенности вдоль линейки ПЗС. К электродам 2 и 3 приложено меньшее напряжение, чем к электродам 1, зарядовые области изолируются потенциальными барьерами. Если в процессе развертки к электродам 2 приложить напряжение, равное напряжению на электродах 1, происходит расширение потенциальной ямы и электроны заполняют потенциальную яму под электродами 1 и 2. Далее напряжение на электродах 1 уменьшается и неосновные носители полностью перемещаются под электроды 2. К этому времени на электродах 3 напряжение мало, что приводит к изоляции зарядовых областей между отдельными ячейками линейки.

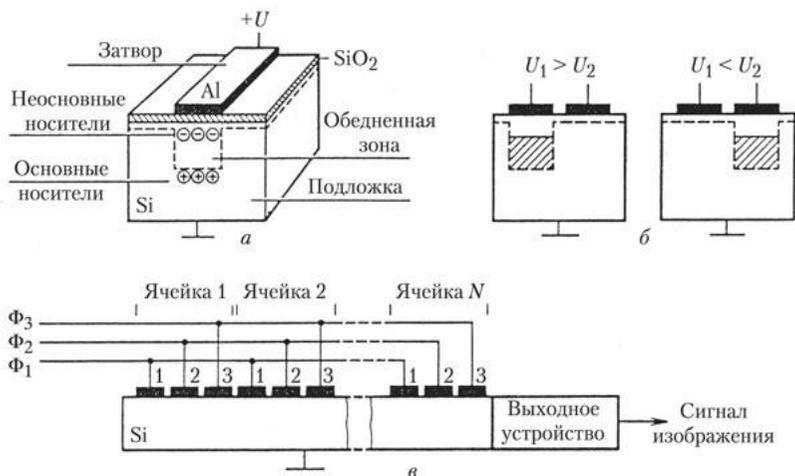


Рис. 2.14. К пояснению электрической развертки в линейке ПЗС

Для перемещения зарядов из данной ячейки в следующую необходимо сначала перенести их под электроды 3, а затем — под электроды 1 следующей ячейки. Это осуществляется подачей на электроды положительных тактовых импульсов. За три такта изменения напряжений на фазах Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 зарядовый рельеф в линейке переместится на одну ячейку. В выводном устройстве последовательность зарядов преобразуется в импульсное напряжение, огибающая которого представляет собой сигнал изображения.

В ПЗС процессы накопления зарядов и их считывание разделены во времени. Развертка производится в промежутки времени, соответствующий обратному ходу. При этом одновременное перемещение зарядов вдоль линейки происходит от первой ячейки слева направо, а сигнал изображения на выходе получается в обратном порядке, начиная с последней ячейки строки. Таким образом, осуществляется самосканирование — передача информации за счет зарядовой связи путем изменения «глубины» потенциальных ям под электродами МОПконденсаторов.

Сегодня разработаны линейки, имеющие 8000 ячеек в строке, с размером ячейки — 20 мкм. Существуют матричные структуры на ПЗС, создающие сигнал изображения. Датчики свет—сигнал на ПЗС —

малогабаритные, потребляющие мало энергии и обеспечивающие высокую геометрическую точность при сканировании изображений.

Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и фотодиоды (ФД) используются в основном в устройствах барабанного типа. Фотоэлектронный умножитель состоит из электроннооптической секции 1 и секции вторичноэлектронного умножения 2 (рис. 3). В электроннооптической секции осуществляется преобразование светового потока Φ в фототок $i_{\phi} = \epsilon_{\phi}$ на основе внешнего фотоэффекта — эмиссии фотоэлектронов под действием квантов света. Величина ϵ — интегральная чувствительность фотокатода (А/лм).

На внутреннюю поверхность торцевого или бокового окна напыляют тонкую металлическую пленку, практически прозрачную для света и служащую для подачи питания на фотокатод (ФК). Затем на нее наносят светочувствительный слой.

Электроннооптическая секция помимо ФК содержит фокусирующий электрод (ФЭ), диафрагму Д и первый диод Д 1 (эмиттер вторичных электронов). Фотоэлектроны покидают ФК под различными углами к его поверхности и с различными скоростями. Электроды ФК, ФЭ, Д и Д 1 образуют электростатические линзы, обеспечивающие фокусировку и ускорение фотоэлектронов, направляемых на первый диод Д 1 .

Секция вторичноэлектронного умножения 2 состоит из нескольких диодов и коллектора К. Между соседними диодами приложены ускоряющие напряжения, снимаемые с делителя 3. Фотоэлектроны, попадая на первый диод Д₁, вызывают вторичноэлектронную эмиссию. Значение коэффициента вторичной эмиссии $\sigma = i_2/i_1$ зависит от материала и обработки поверхности диода, а также от ускоряющего напряжения. Вторичные электроны попадают на второй диод Д₂. Умноженный поток электронов со второго диода поступает на третий и т.д. Перед диодами расположены сетки (на рис. 9 не показаны), с помощью которых создается электрическое поле, способствующее фокусировке вторичных электронов. Наряду с этим сетки экранируют секции диодов друг от друга. Все электроды ФЭУ питаются от стабилизированного источника с помощью делителя 3, на который подается напряжение от –1500 до –2500 В.

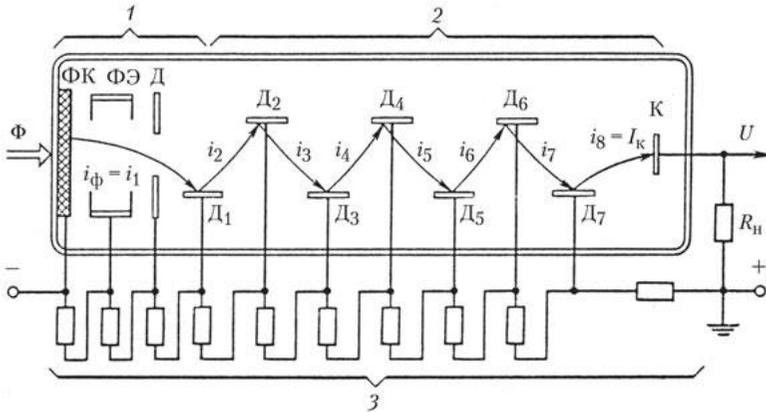


Рис. 2.15. Устройство ФЭУ

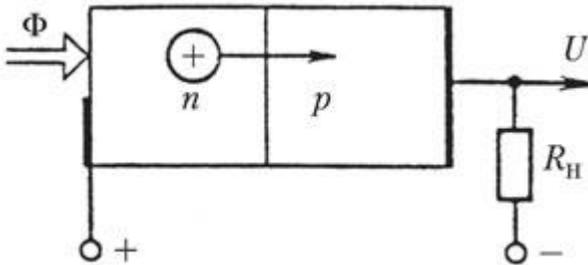


Рис.2.16. Схема действия фотодиода

В идеальном случае можно принять значения коэффициентов вторичной эмиссии $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma$. Тогда на выходе ФЭУ ток коллектора $I_K = i_1 \sigma^n$, где n — число каскадов вторичноэлектронного умножения; $i_1 = i_\phi$ — ток эмиссии фотокатода. Обычно $\sigma = 4-8$ и $n=7-12$. Чувствительность ФЭУ и число каскадов умножения ограничиваются темновым током и шумами. Основные составляющие темнового тока — термотоки фотокатода и первых динодов, ток автоэлектронной эмиссии с динодов, ток утечки между выводами коллектора и другими электродами. Шумы тока коллектора вызываются дробовыми флуктуациями фотоэмиссии, термоэмиссии и вторичноэлектронной эмиссии. Отношение «сигнал/помеха» зависит также и от тепловых шумов резистора нагрузки R_H в цепи коллектора. Современные ФЭУ имеют линейную световую характеристику

$I_k = f(\Phi)$ в рабочем диапазоне освещенности. Фотозлектронные умножители достаточно широкополосные (длительность фронта сигнала при резких изменениях светового потока не превышает $10^{-8} - 10^{-9}$ с). Это означает, что ФЭУ практически не накладывают ограничений на скорость передачи изображений.

Фотодиоды — полупроводниковые приборы с диффузионным переходом, работа которых основана на внутреннем фотоэффекте. На фотодиод подается запирающее напряжение (обратное смещение). По принципу действия фотодиод аналогичен запертому полупроводниковому диоду, обратный ток которого изменяется под действием светового потока Φ (рис. 2.16). Применяются кремниевые фотодиоды, имеющие квантовый выход около 75% и примерно равномерную спектральную чувствительность в диапазоне 400–1100 нм. Световая характеристика мало зависит от приложенного напряжения и линейна. Рабочее напряжение около 20 В, темновой ток 12 мкА, интегральная чувствительность 3 мА/лм. Кремниевые фотодиоды обладают малой инерционностью, не зависящей от светового потока.

Волоконные световоды находят применение в фотонаборных автоматах, сканерах, денситометрах и другом оборудовании. Они позволяют передавать световую энергию на большие расстояния по криволинейному пути без значительных потерь (рис. 2.17б). Волоконные световоды представляют собой жгуты, состоящие из большого числа гибких стеклянных волокон (рис. 2.17а) диаметром менее 30 мкм (рис. 2.17в). Каждое волокно покрыто тонким (2 мкм) слоем, который отражает попадающий в него изнутри волокна свет, препятствуя его проникновению в соседние волокна. Свет распространяется по волокну за счет многократных отражений от внутренних стенок (см. рис. 2.17а). Жгуты световодов имеют круглое или квадратное сечение. Волоконные световоды с нерегулярной укладкой волокон используются для передачи световых излучений, а с регулярной — для передачи изображения.

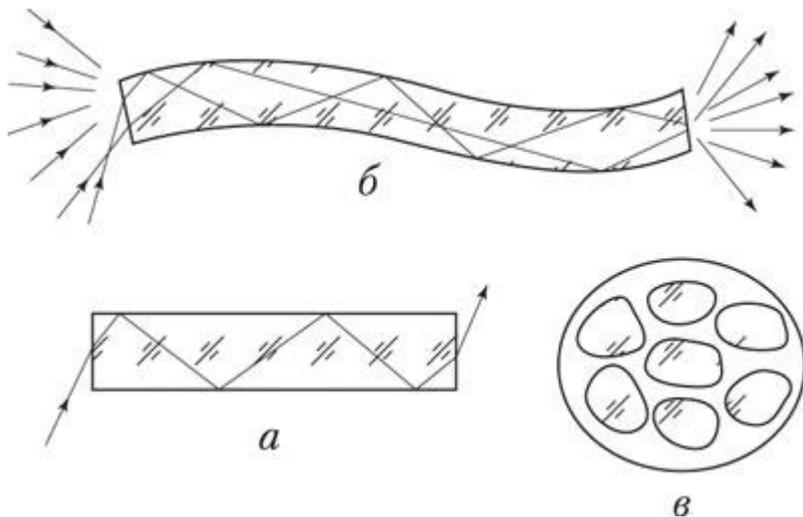


Рис.2.17. Волоконные световоды: а — многократное внутреннее отражение света в волокне световода; б — прохождение света через изогнутое волокно; в — сечение жгута волоконного световода

Системы световодов подчиняются законам геометрической оптики при диаметрах волокон примерно до 0,5 мкм. При меньших диаметрах наблюдаются потери части световой энергии вследствие дифракционных явлений, вызывающих прохождение света через боковую поверхность световода.

Световоды с плавно изменяющимся диаметром называют фоконами (фокусирующими конусами). Они могут быть полыми или монолитными. Волокна конической формы применяют в тех случаях, когда необходимо изменить линейное увеличение передаваемого изображения или интенсивность потока излучения. Из отдельных конических волокон можно формировать жесткие конусы с соотношением входного и выходного диаметров в диапазоне 1:51:10. Длина конуса в зависимости от его назначения колеблется от нескольких сантиметров до нескольких дециметров.

Существуют, однако, потери при прохождении света в волокне, которые вызываются отражениями от торцов волокна, поглощением внутри сердцевины световода, рассеянием через его покрытие и т.п.

Общее светопропускание с учетом потерь на торцах на длине 1 м для волокна в оболочке (сердцевина — стекло Φ_2 , оболочка — молибденовое стекло 46) составляет 60% и на длине 3 м — 38%.

Известны волоконные световоды с различным эффективным (световым) сечением, обычно — 2,5; 3,5; 7,5; 10 мм и более. Длина жгутов — 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000 мм и более.

Микрообъективы. Объективы с очень малыми фокусными расстояниями, обеспечивающие большое увеличение (до 90 крат и более), называют микрообъективами. Они используются в микроскопах, электронных цветоделительных машинах, денситометрах и сканерах.

В анализирующих фотоголовках барабанных сканеров допустимо применение только апохроматических микрообъективов, которые исправлены по отношению ко всем основным видам аберрации.

Для микрообъектива очень критична глубина резкости изображаемого пространства, под которой понимают ту часть пространства предметов, что резко изображается объективом. Глубина резкости изображаемого пространства прямо пропорциональна квадрату расстояния от входного зрачка объектива до предмета и обратно пропорциональна диаметру входного зрачка. Микрообъективы устанавливаются на очень малом расстоянии от изображаемого предмета, поэтому глубина резкости изображаемого пространства измеряется всего несколькими десятками микрометров, что накладывает повышенные требования на точность входящих в оптическую систему устройств.

В планшетных и проекционных сканерах применяются фотографические объективы, аналогичные репродукционным объективам.

Светоделительные зеркала и призмы. Во многих узлах электронных цветоделительных машин, в сканерах, а также в некоторых приборах применяются специальные делители излучений, которые делят один световой пучок на два, распространяющихся в разных направлениях. Такие делители лучей называют светоделительными, или полупрозрачными, зеркалами. Особенность светоделительных зеркал заключается в том, что часть падающих на них лучей они отражают, а другую часть — пропускают. Такое зеркало представляет собой

хорошо отполированную плоскую стеклянную пластину, на поверхность которой нанесена тонкая полупрозрачная пленка металла. Подбирая толщину этой пленки, можно в широких пределах регулировать соотношение между отраженной и пропущенной частями светового потока.

Светоделительные зеркала бывают двух типов — *серые* и *дихроичные*. Серые светоделительные зеркала не изменяют цвета светового пучка при его разделении, тогда как дихроичные пропускают световые лучи избирательно. Дихроичные зеркала используют в сканерах, цветоделительных машинах и приборах для разделения световых пучков на три зоны спектра: синюю, зеленую и красную.

В качестве светоделительных элементов применяются преломляющие призмы. В преломляющих призмах углы падения луча на входную грань и сопряженные с ними углы преломления на выходной грани, как правило, не равны друг другу. Угол между падающим и преломленным лучами называется углом отклонения призмы. Преломляющие призмы разлагают поступающее в спектральный прибор излучение на монохроматические составляющие (спектр).

Светофильтры. Светофильтром называют полупрозрачную среду, предназначенную для избирательного или общего поглощения проходящего через нее светового потока. По оптическим свойствам светофильтры подразделяются на серые (или нейтральные), цветные, теплозащитные.

Серые (или нейтральные) светофильтры поглощают проходящий через них свет неизбирательно, то есть падающий белый световой поток поглощается равномерно по спектру независимо от длины волны излучений.

Цветные светофильтры поглощают падающий на них свет избирательно в зависимости от длины волны падающих излучений.

Теплозащитные светофильтры — это либо фильтры, изготовленные из специального теплостойкого стекла марки СЗС, которые поглощают инфракрасные тепловые излучения и почти без ослабления пропускают излучения видимой части спектра, либо полупрозрачные зеркала, покрытые специальной пленкой, пропускающей видимые излучения и отражающей инфракрасные.

Теплозащитные фильтры применяются в сканерах для защиты от нежелательного действия тепловых излучений на электрические фотоприемники.

2.4. Тепловизоры с оптико-механическим сканированием

2.4.1. Оптико-механические системы сканирования

Для получения видимого изображения теплоизлучающего объекта в осуществляют разложение (развертку) объекта на некоторое число элементарных площадок. Каждая такая площадка, называемая элементом разложения, является наименьшей деталью, которую может воспроизвести данная система. Анализ мощности теплового излучения отдельных элементов производится ПИ, с выхода которого последовательно во времени снимаются сигналы, содержащие информацию о теплоизлучающем объекте и окружающем его фоне. Таким образом, двумерное распределение яркостей в пространстве объектов в результате сканирования преобразуется в одномерное распределение напряжения на нагрузочном резисторе ПИ. Сигналы с приемника передаются по одному каналу в индикатор видео- контрольного устройства (ВКУ), который преобразует их в видимое изображение. Чаще всего в качестве индикатора ВКУ используют электронно-лучевую трубку (кинескоп). Так как в каждый момент времени на экране кинескопа воспроизводится только один элемент изображения, закон движения электронного луча кинескопа должен быть идентичен закону развертки, что достигается применением синхронизирующих элементов. В известных технических решениях используются:

оптико-механические системы сканирования;
электронные (фотоэлектронные) системы сканирования.
При оптико-механическом сканировании с помощью оптической системы, перемещающейся по определенному закону, осуществляется развертка исследуемого объекта на приемник теплового излучения. В тепловизорах с электронными системами сканирования изображение теплового излучения объекта проектируется на мишень передающей трубки или на матрицу приемников теплового излучения. В случае использования передающей трубки развертка изображения на элементы производится электронным лучом, который в своем

движении проходит все участки мишени. При использовании матрицы или линейки приемников теплового излучения развертка осуществляется электронным путем. Используются или электронные ключи, или приемники на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). При электронной системе сканирования можно наблюдать кратковременные и быстропротекающие процессы, что затруднительно сделать в системах с оптико-механическим сканированием.

Системы с оптико-механическим сканированием имеют наибольшую чувствительность, так как в них можно применять приемники теплового излучения, чувствительность которых приближается к теоретически достижимому. Большая инерционность не является препятствием для их применения при медицинских исследованиях. Более того, в разработках, выпускаемых промышленностью для медицинских учреждений, в основном применяется оптико-механическое сканирование. В них обычно объектив, сканирующее устройство и приемник излучения скомпонованы в одном блоке, называемом тепловизионной камерой. Сканирование излучения осуществляется с помощью зеркал, зеркальных барабанов или призм, оптических клиньев. Они или колеблются, или вращаются и выполнены так, что на приемник или приемники теплового излучения попадают электромагнитные волны, излучаемые разными участками исследуемого объекта. Причем картина изображения повторяется при каждом новом цикле сканирования. Информация о распределении температуры на поверхности объекта получается покадрово. Каждый кадр характеризуется полным циклом строчных и кадровой разверток. Изменение положения зеркальных элементов осуществляется с помощью электромеханических или электромагнитных приводов. Причем они могут размещаться либо до объектива в параллельном потоке лучей излучения (рис. 2.18, а), либо после него в сходящемся пучке лучей (рис.2.18, б). Те или иные оптические схемы планирования и размещения оптической системы имеют свои преимущества и недостатки, которые в данной работе рассматривать не будем. Отметим только, что при оптико-электронном сканировании скорость развертки изображения получается небольшой даже в случаях, когда вместо качающихся зеркал применяются вращающиеся многогранные зеркальные барабаны или усеченные зеркальные пирамиды. Если они имеют N граней, то скорость развертки увеличивается в N раз. Но на практике оказывается, что это не так уж и много. Поэтому получение информации о распределении температуры по поверхности объекта занимает ощутимое время.

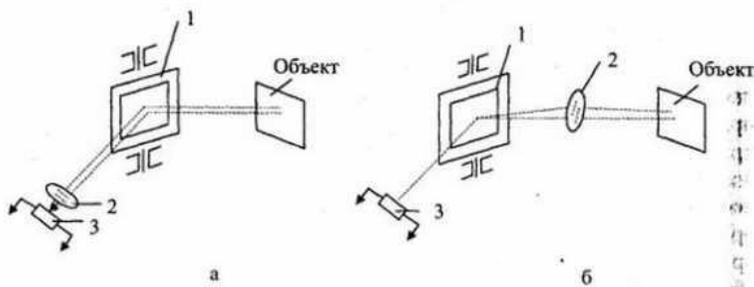


Рис. 2.18. Сканирующие устройства с зеркалом, колеблющимся в двух плоскостях: а - в параллельном пучке лучей; б - в сходящемся пучке лучей: 1 - зеркало; 2 - объектив; 3 - приемник излучения

Приемники теплового излучения в тепловизорах с оптико-механическим сканированием обычно выполняются на основе фоторезисторов. Наибольшее распространение получили пленочные (PbS, PbSe) и монокристаллические (In, Sb, HgCdTe) фоторезисторы. Чувствительность их существенно возрастает с понижением температуры чувствительного слоя. Поэтому их охлаждают до температуры 77... 195 К, помещая в криостат, наполняемый жидким азотом или гелием (обычно это сосуд Дьюара). При снижении температуры также уменьшается уровень собственных тепловых шумов, которые оцениваются с помощью формулы Найквиста

$$U_{ш} = \sqrt{4kTR\Delta f}$$

где $U_{ш}$ - действующее значение напряжения шумов; k - постоянная Больцмана; T - абсолютная температура; R - значение сопротивления; Δf - полоса частот, в которой измеряется напряжение.

Важнейшим параметром приемников инфракрасного излучения является порог чувствительности. Под ним понимают минимальный поток излучения, который вызывает появление на выходе приемника сигнал, равный напряжению шумов или превышающий его в заданное число раз. Так как напряжение шумов фоторезистора пропорционально корню квадратному из произведения площади чувствительного

элемента на ширину полосы частот, в $\Gamma_{\text{ц}}^{\frac{1}{2}}$ которой проводится их оценка, порог чувствительности измеряется в $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-1}$,

Обратная чувствительности величина называется обнаружительной способностью D и имеет размерность

$$\text{Вт}^{-1}\cdot\text{см}\cdot\Gamma_{\text{ц}}^{\frac{1}{2}}.$$

Основной характеристикой приемника излучения является чувствительность или обнаружительная способность, зависящие от длины волны монохроматического излучения. Некоторые оценочные характеристики обнаружительной способности фоторезисторов из разных материалов приведены в таблице.

Тип материала	Обнаружительная способность, $\text{Вт}^{-1}\cdot\text{см}\cdot\Gamma_{\text{ц}}^{\frac{1}{2}}$	Диапазон частот при нормальной температуре	Обнаружительная способность при охлаждении $\text{Вт}^{-1}\cdot\text{см}\cdot\Gamma_{\text{ц}}^{\frac{1}{2}}$	Диапазон частот при охлаждении
PbS	$(3\dots 10) 10^{10}$	0,6-4 мкм	$60\cdot 10^{10}$	—
PbSe	10^{10}	2-6 мкм	—	—
JnSb	$3\cdot 10^8 - 4,5\cdot 10^{10}$	3-7,5 мкм	$3\cdot 10^9 - 4,5\cdot 10^{11}$	3-6 мкм
HgCdTe	10^{10}	8-13 мкм	—	—

Приемники на основе JnSb, в частности, изготавливают в виде линеек из 10 чувствительных элементов со стороны квадрата 250 мкм и зазором между элементами 25 мкм, а конструкция матричного приемника состоит из 100 одинаковых элементов.

Упрощенная структура тепловизора приведена на рис. 2.19

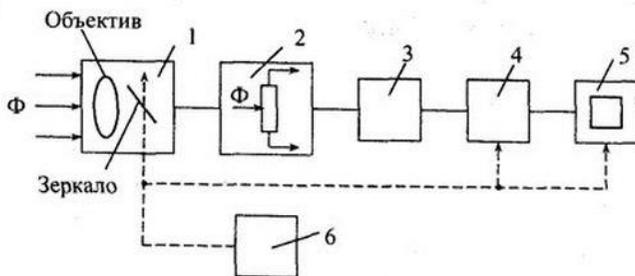


Рис.2.19. Упрощенная структура тепловизора с оптико-механическим сканированием: 1- объектив с механическим сканированием; 2- приемник теплового излучения; 3- усилитель; 4-преобразователь электрических сигналов; 5 – устройство визуализации.

Блок 1 обеспечивает осмотр разных частей объекта. С его помощью на приемник теплового излучения попадает та часть информационного излучения, которая характеризует температуру исследуемого участка объекта. Осмотр объекта обычно сводится к его сканированию в двух плоскостях.

Сканирование проводится по горизонтали с большой скоростью (строчная развертка) и по вертикали с меньшей скоростью (кадровая развертка). Могут быть использованы и другие законы сканирования, например, спиральное (развертка по спирали Архимеда)! К системе сканирования предъявляется требование, чтобы осмотр объекта проводился по всей заданной площади и коэффициент преобразования информационного излучения был бы одинаков в любой зоне. В приемнике теплового излучения 2 инфракрасное излучение преобразуется в электрический сигнал, который усиливается усилителем 3. В преобразователе 4 электрические сигналы, значения которых в каждый конкретный момент времени характеризуют инфракрасное излучение зоны, осматриваемой в данный момент времени, преобразуются в сигналы, управляющие работой устройства визуализации 5. В качестве него обычно используются мониторы, выполненные на основе электронно-лучевых, жидкокристаллических или газоразрядных дисплеев. С помощью последних двух блоков

уровни электрического сигнала кодируются в виде цветов сигнала, наблюдаемых на экране монитора. В ряде случаев на поле термограммы отображаются параметры термографирования, например: номер кадра; температура в перекрестии маркера; значение температуры, цена деления цветной и черно-белой шкал; диапазон регистрируемых температур и пр. В более совершенных конструкциях возможны операции препарирования запомненного изображения, исключения цветов, смен цветокодирования, перемещения маркера и линии выборки термопрофиля с точкой замера температуры. Даже из такого беглого перечисления реализуемых функций ясно, насколько сложны и многообразны задачи, решаемые с помощью преобразователя 4.

Для снижения стоимости и расширения функциональных возможностей в современных тепловизорах широко используется цифровая техника. В их структуре блок 4 выполняет функции аналого-цифрового преобразователя сигналов и интерфейса, а блок 5 является персональным компьютером. Все необходимые функции обеспечиваются программным путем. Такой подход существенно снижает стоимость аппаратной части и резко расширяет возможности тепловизорных исследований. Вся полученная информация может быть заполнена и при необходимости распечатана с помощью цветного принтера.

Система синхронизации 6 обеспечивает жесткую привязку сканируемой зоны и место положения выходного сигнала в устройстве визуализации.

При электронном сканировании изображения объект через объектив проецируется на специальные трубки, аналогичные по конструкции телевизионным передающим трубкам, или на матричные полупроводниковые фотоприемники, чувствительные к инфракрасной области спектра. Из передающих телевизионных трубок наиболее известны видиконы, термиконны, пириконны. Основное различие у них обусловлено материалом, примененным в качестве мишени, на которую проектируется тепловое изображение. И видиконе мишень выполняется из монокристаллического полупроводника (тонкий слой 1-20 мкм, нанесенный на непроводящую подложку). В термиконе мишень выполняется из гонкой прозрачной пленки, одна поверхность которой покрыта веществом, поглощающим тепловое излучение, а другая - веществом, которое является эмиттером электронов,

чувствительным к температуре. В пириконе мишень выполняется из пироэлектрика - вещества, на поверхности которого появляются электрические потенциалы поляризации, значения которых пропорциональны интенсивности инфракрасной волны, упавшей на этот участок мишени. В качестве пироэлектриков используется титанат бария, титанат свинца, триглинсульфат и др., т.е. материалы, которые известны своими пьезоэлектрическими свойствами. Информация о распределении электрических зарядов по поверхности мишени и в видиконах, и в периконах, и в термиконах считывается с помощью электронного луча, который формируется и управляется (строчные и кадровые развертки) так же, как это сделано в телевизионных или осциллографических электронных трубках. Все электроды расположены в колбах, где имеется высокий вакуум. В отдельных случаях используется охлаждение некоторых элементов конструкции жидким азотом. Входные прозрачные окна приходится изготавливать из материалов, которые прозрачны для ИК-излучений с длинами волн до 15... 16 мкм, например, из ВаF₂ или кристаллического кремния.

В случае использования матричных полупроводниковых приемников получение информации ничем не отличается от того, как это сделано в видеокамерах. Использование телевизионных стандартов и технических решений, принятых в этой области, является характерной чертой тепловизоров с электронной разверткой. Сложности с обеспечением одинаковой чувствительности в разных точках многоэлементного приемника теплового излучения до недавнего времени были существенным препятствием для использования в измерительных целях электронного сканирования. Сейчас эта проблема легко решается путем цифровой коррекции результатов, получаемых в каждой точке, исходя из предварительно полученных и запомненных результатов градуировки. Такой подход открыл широкие возможности использования многоэлементных приемников теплового излучения, имеющих разные чувствительности и характеристики.

2.4.2. Сканирующие устройства и траектории сканирования

В оптико-механических сканирующих устройствах сканирование производится путем изменения направления оптической оси прибора. При этом общее поле обзора последовательно анализируется мгновенным полем зрения оптической системы прибора. Траектории сканирования могут быть самыми разнообразными (спиральная, розеточная, прямоугольная, циклоидальная и др.). В

тепловизорах обычно применяют телевизионную развертку: оптическая ось перемещается с постоянной скоростью по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Движение по горизонтали создает строчную развертку; прочерчиваемые при этом линии называются строками. В результате перемещения по вертикали, создаваемого кадровой разверткой, все строки располагаются одна под другой. За один период кадровой развертки происходит передача неподвижного изображения, называемого кадром.

Оптико-механические сканирующие устройства достаточно инерционны, так как основаны на колебательном или вращательном движении сравнительно крупных оптических деталей; тепловизоры с оптико-механическими сканирующими устройствами более чувствительны, чем с фотоэлектронными сканирующими устройствами, так как в первых ширина полосы частот усилителей фототока может быть выбрана достаточно узкой. В качестве ПИ в тепловизорах с оптико-механическими сканирующими устройствами применяют фоторезисторы, чувствительные в инфракрасной области спектра (InSb, HgCdTe и др.). При этом различают тепловизоры с одноэлементным приемником и двумерным сканированием и тепловизоры с линейным многоэлементным приемником и одномерным сканированием. Второму варианту в настоящее время отдается предпочтение, хотя изменение чувствительности от элемента к элементу ухудшает качество получаемого изображения.

Классификация оптико-механических сканирующих устройств и рассмотрение многочисленных вариантов их конструктивного выполнения приведены в работах. Ниже кратко рассматриваются устройства, наиболее часто применяемые в тепловизорах.

Сканирование колеблющимися плоскими зеркалами. Для сканирования теплового поля прямоугольной формы при одноэлементном ПИ применяют плоское зеркало, совершающее колебательные движения относительно двух взаимно перпендикулярных осей. Изменение положения зеркала достигается посредством различных электромеханических и электромагнитных приводов. В процессе сканирования мгновенное поле зрения прибора движется в плоскости расположения наблюдаемого объекта, образуя телевизионный растр. Зеркало размещают либо до объектива в параллельном пучке лучей (рис. 2.20, а), либо за объективом в сходящемся пучке (рис. 2.20,б). В первом случае достигается высокое качество изображения (ввиду отсутствия дополнительных аберраций), но при этом размеры колеблющегося зеркала должны быть большими и требования к качеству изготовления его отражающей поверхности — жесткими.

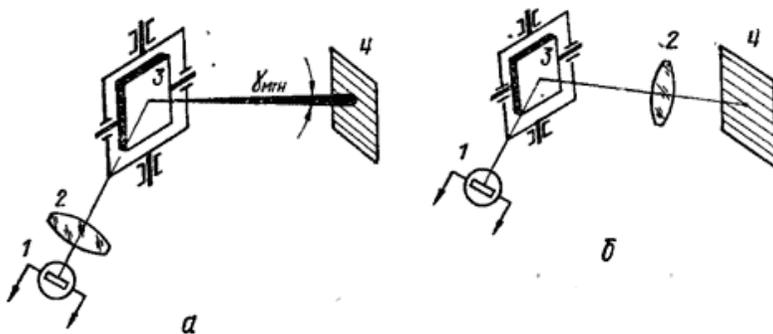


Рис. 2.20. Сканирующие устройства с колеблющимся зеркалом, размещенным в параллельном (а) или в сходящемся (б) пучке лучей: 1 — ПИ; 2 — объектив; 3 — сканирующее зеркало; 4 — поле обзора

Если зеркало наклонено под большим углом к оптической оси, то плохое качество отражающей поверхности выбывает, астигматизм в изображении точечного источника.

При расположении зеркала за объективом размеры зеркала можно уменьшить, но в этом случае при повороте зеркала поверхность изображения получается не плоской, а сферической и пятно остаточных аберраций увеличивается.

Построчное сканирование с помощью колеблющегося плоского зеркала приводит к отклонению раstra от прямоугольного, если зеркало расположено под некоторым углом γ к оптической оси (рис.4.4,а). Принимая за количественную характеристику этого отклонения наибольшее относительное изменение размеров, соответствующее краю поля зрения ($\alpha = \alpha_{\max}$), получим

$$\frac{\Delta y}{y_0} = \frac{y_{\max} - y_0}{y_0} = \frac{(L_0/\cos \beta_{\max}) \operatorname{tg} \alpha_{\max} - (L_0/\cos 0) \operatorname{tg} \alpha_{\max}}{(L_0/\cos 0) \operatorname{tg} \alpha_{\max}} = \frac{1}{\cos \beta_{\max}} - 1,$$

где α_{\max} и β_{\max} — максимальные углы поворота зеркала относительно осей ox и oy соответственно; $L_0 = 00$. При небольших значениях искажения поля зрения $\Delta y/y < 1...3 \%$.

Сканирующее плоское зеркало может быть жестко закреплено на оси под углом 45° , так что сканирование вдоль строки обеспечивается поворотами зеркала относительно этой оси на угол $\pm\phi$, а сканирование по кадру — поворотом зеркала вместе с осью, на которой оно закреплено, на угол $\pm\gamma$ (рис. 2.21,б). В этом случае форма раstra близка к трапеции. При $\beta = +10^\circ$ и $\gamma = 2,5^\circ$ искривления строк в верхней и нижней частях раstra составляет 3% , а искривления угловых размеров

каждой строки не превышает 5 %.

Наряду с одним плоским зеркалом, имеющим две степени свободы, в сканирующих устройствах можно применять два зеркала, каждое из которых совершает колебательное движение относительно взаимно перпендикулярных осей, образуя телевизионный растр.

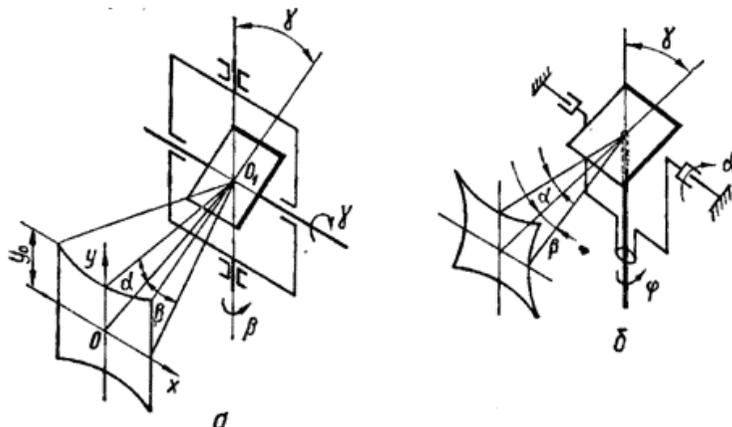


Рис.2.21. Форма раstra при построчном сканировании плоским зеркалом (а) и плоским зеркалом, жестко закрепленным на оси (б)

В случае использования многоэлементного (линейного) ПИ конструкция сканирующего устройства с плоским зеркалом упрощается, так как в этом случае зеркало должно совершать колебательное движение только относительно одной оси y на рис. 2.22).

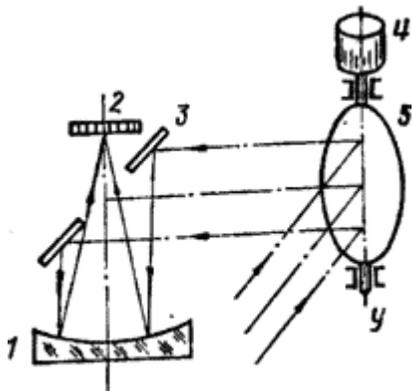


Рис. 2.22. Сканирующее устройство с многоэлементным ПИ и расположением сканирующего зеркала в параллельном пучке лучей: 1 — объектив; 2 — ПИ; 3 — отражательное зеркало; 4 — электромагнит; 5 — сканирующее плоское зеркало

В приведенной схеме фокусировка излучения осуществляется зеркальным объективом, имеющим диаметр 100 мм, фокусное расстояние 250 мм и пятно остаточных aberrаций 250 мкм. Сканирование по горизонтали производится зеркалом диаметром 150 мм, колеблющимся с собственной частотой 20 Гц. Частота колебаний определяется моментом инерции зеркала и жесткостью крутильной пружины, на которой оно подвешено. При колебаниях зеркала неконтактный датчик выдает сигнал обратной связи, соответствующий перемещению зеркала. Этот сигнал после усиления подается на обмотку электромагнита, воздействующего на легкую железную арматуру, прикрепленную к зеркалу. Фаза сигнала обратной связи выбрана так, чтобы обеспечивались незатухающие колебания зеркала. Выходной сигнал неконтактного датчика, соответствующий определенному положению сканирующего зеркала, используется одновременно для синхронизации развертки электронного пятна по экрану кинескопа ВКУ. Угол сканирования зеркала по горизонтали $\pm 1\beta$; поле зрения по вертикали ($6,5^\circ$) определяется длиной линейки мм;. Общий недостаток сканирующих устройств с колеблющимися плоскими зеркалами — ограничение частоты развертки из-за ударов в крайних положениях зеркала. Зеркальный барабан имеет более широкие сферы применения. Сканирование вращающимися зеркальными призмами, пирамидами и

плоскими зеркалами. В авиационных тепловизионных системах, предназначенных для картографирования и обзора местности, применяют сканирующее устройство с вращающимся многогранным зеркалом, выполненным в виде зеркального барабана (рис. 2.23,а). При этом последовательно просматриваются участки земной поверхности, ширина которых определяется мгновенным углом зрения, а длина — углом зрения. Перемещение с одной строки на другую происходит благодаря движению носителя.

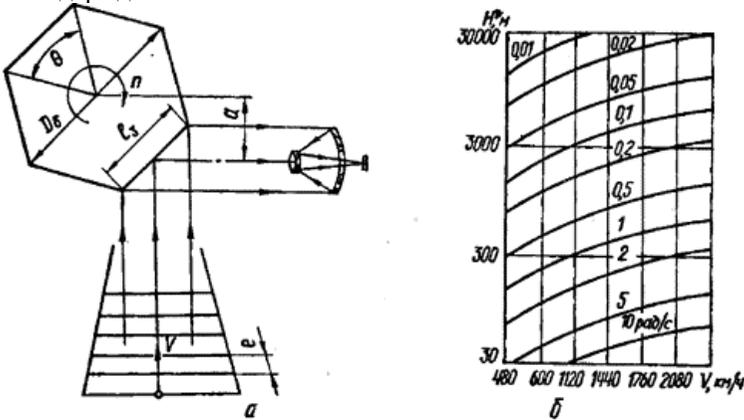


Рис.2.23. Схема сканирующего устройства с вращающимся зеркальным барабаном (а) и графики изменения отношения V/H (б)

Чтобы на выходе ПИ получить информацию о каждом объекте, расположенном в поле зрения, необходимо, чтобы этот объект находился в пределах мгновенного поля зрения в течение времени Δt , большего постоянной времени приемника.

Время Δt определяется частотой и вращения барабана и углом зрения γ : $60\gamma/(2\pi k_{\tau})$, поэтому предельно допустимая частота вращения барабана

$$n_{\text{пред}} \leq \frac{60\gamma}{(2\pi k_{\tau} \tau)}. \quad (2.1)$$

Линейная ширина участка местности, просматриваемого за один оборот барабана, где H — высота полета летательного аппарата N — число зеркальных граней барабана; $\gamma_{\text{мгн}}$ — мгновенный угол зрения. Так как система обзора должна работать без пропусков, то смежные участки должны соприкасаться или перекрываться, что выполняется при условии

$$HN\gamma_{\text{мгн}}n_{\text{пред}}/60b \geq V,$$

где b — коэффициент перекрытия ($0 < b < 2$); V — скорость носителя. Из полученного выражения предельно допустимая частота вращения барабана, мин

$$n_{\text{пред}} \geq 60bV / (HN\gamma_{\text{мгн}}). \quad (2.2)$$

Из формул (2.1) и (2.2) видно, что существует как верхний, так и нижний Допустимые пределы частоты вращения зеркального барабана; кроме этого, максимальная частота ограничивается механическими возможностями системы и обычно не превышает 3000 мин^{-1} . Для уменьшения скорости вращения барабана стремятся увеличить число его отражающих граней. Максимальное число граней $JV_{\text{max}} = 2\pi/0,5(\tau + D\gamma)$, где $0,5$ введено из-за удвоения скорости отраженного луча, а $D\gamma$ — дополнительный угол, который учитывает запас времени, отводимого на просмотр каждой строки (для разделения строк между собой и возврата электронной схемы в исходное состояние перед началом просмотра очередной строки).

При полетах над гористыми районами расстояние между самолетом и визируемыми объектами на местности (по вертикали) может изменяться за 1 с от нескольких десятков до нескольких тысяч метров при неизменной путевой скорости самолета. За счет этого возникают большие скачки величин V/H , поэтому в аппаратуре необходимо применять специальные вычислители отношения V/H и компенсаторы изменения этого отношения.

Величину V/H принято выражать числом радиан в секунду, определяющим скорость углового перемещения самолета относительно некоторой фиксированной точки на местности. Графики на рис.2.23,б дают представление о практически встречающихся отношениях V/H . Сигналы, вырабатываемые вычислителем V/H , используются для регулирования частоты вращения сканирующего зеркала так, чтобы выполнялось неравенство.

Недостатки рассмотренной системы строчного обзора пространства определяются зависимостью частоты вращения зеркального барабана от скорости полета носителя при заданном коэффициенте перекрытия строк и необходимостью вращения с большой скоростью крупноразмерных оптических элементов (табл.). Кроме этого, излучающие объекты находятся на разных расстояниях от носителя в пределах угла зрения, что приводит к различию сигналов от одинаковых объектов, расположенных в разных местах зоны обзор а.

Габаритные размеры элементов строчной системы обзора пространства, выраженные через диаметр объектива D

Число отражающих граней N	Угол, соответствующий числу граней	Диаметр зеркального барабана Dg	Расстояние между осями	Число отражающих граней N	Угол, соответствующий числу граней	Диаметр зеркального барабана Dg	Расстояние между
2	180	2D	0	4	90	2,86 D	0.86D
3	120	2,4 D	0.5D	6	60	W	1,5 D

Примечание. При числе отражающих граней N = 3 длина зеркала барабана l3 = 2D, ширина зеркала равна D.

Последнего недостатка лишены система с коническим обзором (рис.2.24), в которой сканирование осуществляется плоским зеркалом, вращающимся вокруг оси, наклоненной к зеркалу под некоторым углом. Такое сканирующее устройство позволяет при поступательном движении летательного аппарата создавать в плоскости расположения наземных объектов наблюдения траекторию сканирования типа «гусеница». При установке сканирующего устройства на неподвижное основание, можно создать спиральную траекторию сканирования.

$$\omega = \frac{2\pi n_{ск}}{60} \frac{H \operatorname{tg} \alpha}{H / \cos \alpha} = \frac{2\pi n_{ск}}{60} \sin \alpha,$$

С учетом обозначений, принятых на рис.2.24, угловая скорость мгновенного поля зрения

где $n_{ск}$ — частота вращения сканирующего зеркала.

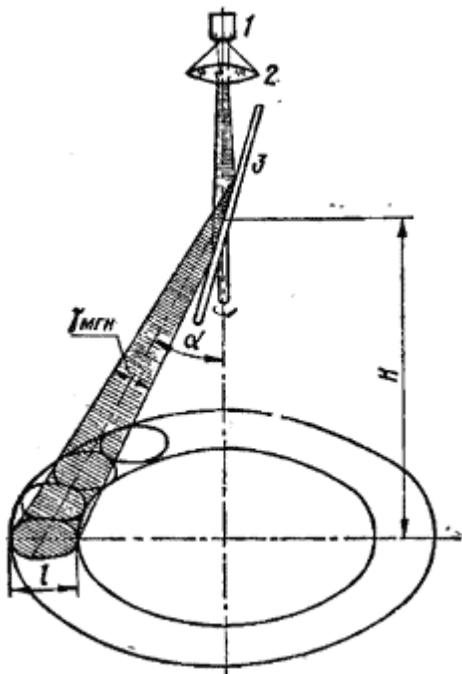


Рис.2.24. Схема сканирующего устройства с коническим обзором:
1—ПИ; 2 — объектив; 3 — вращающееся зеркало

В сканирующем устройстве, изображенном на рис.2.25, используется вращающаяся усеченная зеркальная пирамида, расположенная перед объективом в пучке параллельных лучей.

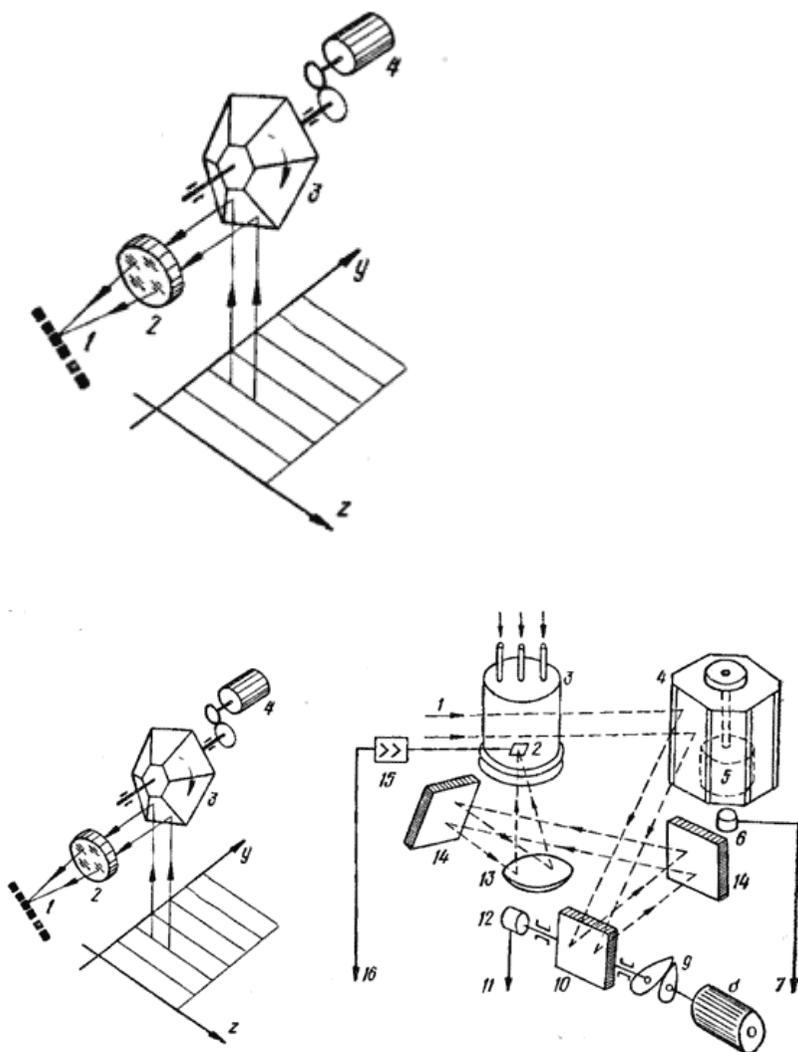


Рис. 2.25. Сканирующее устройство с вращающейся усеченной зеркальной пирамидой:
 1 — многоэлементный (линейный) приемник излучения; 2 — объектив; 3 — зеркальная пирамида; 4 — двигатель, вращающий пирамиду

За один оборот пирамиды, имеющей N граней, получается N строк разложения. Максимальное значение углового размера строки уг зависит от числа граней и коэффициента связывающего угол поворота пирамиды с углом отклонения оптической оси прибора: $\text{уг} = \gamma = 2\pi \cdot j$. Этому значению угла соответствует время $T_{\text{г}}$ обзора одного поля кадра; полное время обзора кадра $T_{\text{гу}} = 60/n$, где n — частота вращения пирамиды. Разработаны сканирующие устройства (рис.2.26), в которых используются комбинация колеблющегося плоского зеркала и вращающейся призмы, как это сделано в тепловизоре производства Франции, предназначенном для медицинских целей.

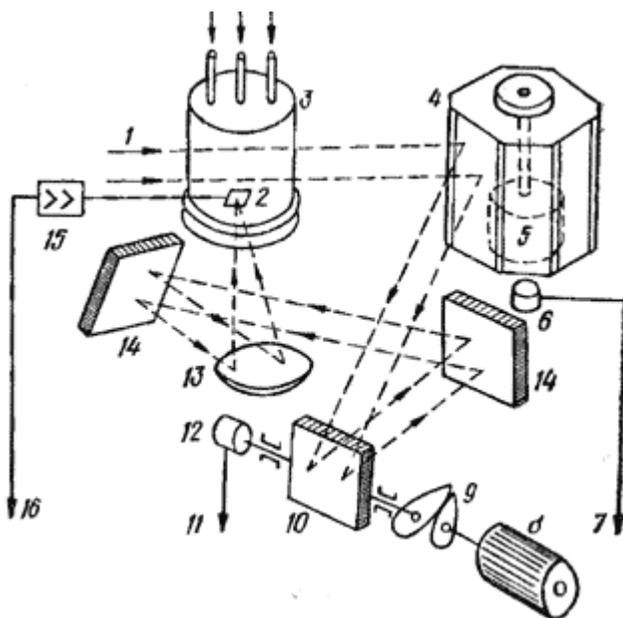


Рис.2.26. Сканирующее устройство с колеблющимся плоским зеркалом и вращающейся призмой, расположенными в пучке параллельных лучей:

1 — излучение объекта; 2 — приемник излучения; 3 — криостат; 4 — зеркальный барабан; 5 — двигатель привода барабана; 6, 12 — элементы синхронизации; 7, 11 — синхронизирующие сигналы; 8 — двигатель привода сканирующего зеркала; 9 — кулачковый механизм; 10 — сканирующее зеркало; 13 — зеркальный объектив; 14 — отражательное зеркало; 15 — усилитель фототока; 16 — видеосигнал

Сканирующее устройство обеспечивает 100 строк разложения при частоте кадров 2 с^{-1} ; поле зрения системы $24 \times 32^\circ$; мгновенный угол зрения 4 мрад.

Для повышения коэффициента использования зеркальной грани сканирующего (вращающегося) зеркала предложена двухканальная схема сканирующего устройства. Такой схема с многогранными призмами (рис. 2.27,а) состоит из двух призм, укрепленных на одной оси и повернутых одна относительно другой на угол $\gamma_{гр}/2$, и двух каналов, работающих с каждой призмой. В образующих половину заданного поля зрения. Сканирующие призмы связаны с переключателем каналов, который попеременно подает сигналы с выхода ПИ на общий усилитель фототока. Одновременно происходит коммутация Генератора строчной развертки. При такой схеме сканирования габаритные размеры призм уменьшаются примерно вдвое, так как угол сканирования каждой зеркальной грани в два раза меньше заданного.

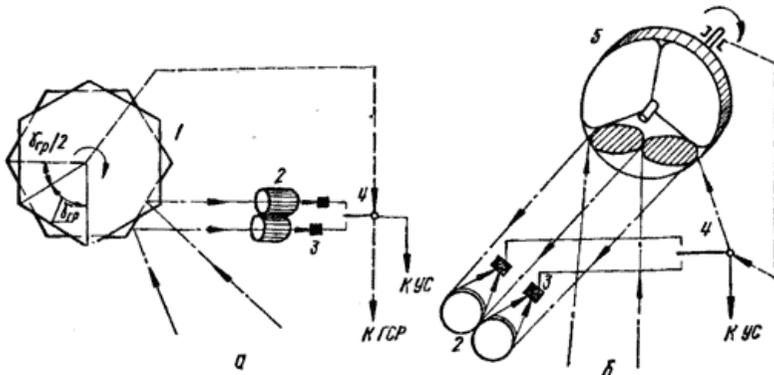


Рис.2.27. Двухканальные схемы сканирующих устройств с многогранными призмами (а) и с многогранной пирамидой (б): 1 — две многогранные призмы; 2 — объектив; 3 — приемник излучения; 4 — переключатель каналов; 5 — многогранная пирамида

В двухканальной схеме сканирования с многогранной зеркальной пирамидой (рис.2.27,б) также имеется два оптических канала с двумя объективами и двумя ПИ. Каждая грань пирамиды последовательно работает на оба канала.

Угловой размер проекции входного зрачка объектива каждого канала на сканирующее зеркало выбран равным $\gamma_{гр}/2$, поэтому общий угол фения соответствует угловому размеру грани, равному γ , т. е. коэффициент использования зеркала $k = 1$.

Сканирование вращающимися преломляющими клиньями и призмами. Оптический клин с углом α при вершине отклоняет луч света на угол $\alpha (n - 1)$, где n — показатель преломления материала клина (рис.2.28,а).

При вращении клина с угловой скоростью (ω) вокруг оси $O0$, совпадающей с осью объектива, луч, прошедший через клин, описывает коническую поверхность, а точка встречи луча с фокальной плоскостью — окружность. Текущие координаты точки $y = a \cos \omega t$; $r = a \sin \omega t$.

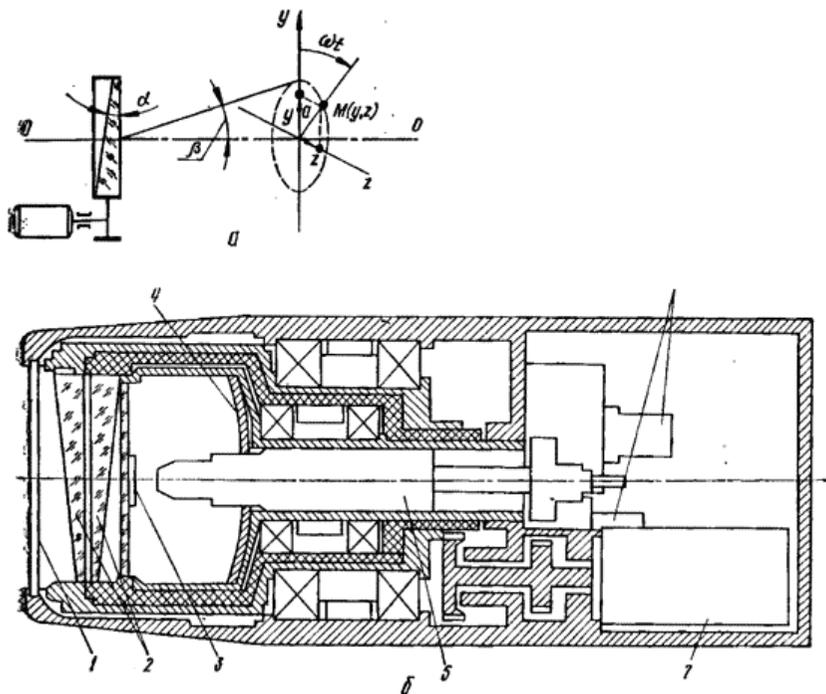


Рис.2.28. Схема сканирования с помощью вращающегося оптического клина (а) и конструкция сканирующего устройства (б): 1 — входное окно; 2 — вращающиеся оптические клинья; 3 — плоское зеркало; 4 — зеркальный объектив; 5 — приемник излучения с кристаллом; 6 — элементы синхронизации; 7 — электродвигатель

Одним из наиболее перспективных материалов для клиньев сканирующих устройств в диапазоне 3,4...5,0 мкм является кремний.

Из него можно изготовить оптические детали диаметром 80...100 мм. Крупногабаритные детали из кремния сложны в производстве и механически непрочны.

К недостаткам сканирующего устройства с вращающимися клиньями» относятся: нелинейность развертки во времени и размытие кружка рассеяния, обусловленное движением клиньев.

Конструкция такого устройства показана на рис.2.28,б. Клинья диаметром 12 мм вращаются с частотой 100 и 101 с⁻¹, что позволяет получить спиральную развертку, содержащую 50 витков. Так как клинья несимметричны, они должны быть сбалансированы. Для этого служит специальная балансная призма, имеющая форму диска. Оправы клиньев связаны с валом электродвигателя. Объектив — зеркальный, состоит из первичного параболического и вторичного плоского зеркал. Диаметр параболического зеркала 120 мм, фокусное расстояние 100 мм. Размер изображения в фокальной плоскости 0,4 мм² что меньше размера чувствительной площадки ПИ (1 мм).

Приемником служит сурьмянисто-индиевый фоторезистор, работающий при температуре жидкого азота; пары азота подаются под давлением через отверстие к чувствительной площадке приемника, находящегося в сосуде Дьюара. Для предотвращения вибрации система охлаждения помещена в корпус из виброзащитного материала. Частота кадров 2 с⁻¹; угол зрения 32е; габаритные размеры устройства — длина 500 мм, диаметр 200 мм, масса около 35 кг.

В основу работы сканирующих устройств с вращающимися преломляющими призмами положено явление изменения хода лучей плоскопараллельной пластиной, установленной за объективом в пучке сходящихся лучей (рис.2.29,а). Если пластина отсутствует, изображение наблюдаемого объекта фокусируется объективом в точку О, находящуюся на оптической оси s фокальной плоскости. При наличии пластины изображение смещается» по оси в точку Оj, а при повороте пластины на угол ν — в точку Ог. Таким образом, положение изображения объекта зависит от угла поворота пластины: сдвиг изображения в направлении, перпендикулярном оптической оси, определяет возможность сканирования. В качестве преломляющей плоскопараллельной пластины применяют четырех-, шести- или восьмигранные призмы (рис.2.29,б), при вращении которых плавно изменяется угол ν , а переход от одной грани к другой соответствует повторному сканированию той же строки. В исходном положении восьмигранной призмы (рис.2.29,в) на приемник попадает излучение от точки, находящейся на оптической оси, перпендикулярной грани призмы (позиция 1). При вращении призмы на приемник попадает

излучение от других точек поля зрения в плоскости диафрагмы (позиция 2).

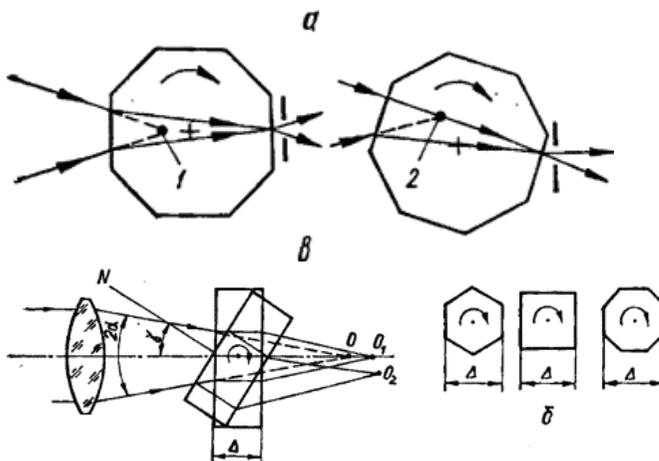


Рис.2.29. Схема сканирования с помощью плоскопараллельной пластины (а) и преломляющей призмы (б, в)

Основные соотношения для сканирования с помощью призмы получаются на основании закономерностей преломления плоскопараллельной пластиной и имеют характер сложных тригонометрических зависимостей. Исследования показали, что координаты изображения объекта при повороте на угол γ преломляющей пластины толщиной Δ или эквивалентной ей призмы (точка 2 на рис.2.29,а) зависят не только от величин γ , Δ и показателя преломления, но и от угла расхождения лучей, падающих на пластину. В результате этого гомоцентрический пучок лучей, после выхода из пластины становится негомоцентрическим.

3. Влияние атмосферы на распространение оптического излучения

3.1. Явление поглощения оптического излучения в атмосфере

Атмосферу принято рассматривать как среду, состоящую из смеси газов, водяного пара, мельчайших взвешенных частиц, называемых аэрозолем. В атмосфере содержится:

N_2 – 78% по объему;
 H_2O – (~10⁻⁵% , 4,5%) по объему;
 CO_2 – 0,03% по объему;
 O_3 – $2,7 \cdot 10^{-6}$ % по объему.

Кроме того, содержится O_2 , CO , CH_4 , Ne , H_2 , NO_2 , N_2O и другие газовые компоненты.

Современные ОЭП и С работают в условиях, когда излучение наблюдаемых объектов поступает на входной зрачок оптической системы ослабленным и искаженным за счет влияния слоев атмосферы между объектами и ОЭП и С. Общее ослабление излучения в атмосфере обусловлено явлением поглощения газовыми компонентами, в результате которого происходит преобразование энергии излучателя в другие ее виды, а также явлением молекулярного и аэрозольного рассеяния, состоящим в изменении направленности излучения. В общем случае неоднородной среды, ослабление оптического излучения описывается законом Бугера – Ламберта – Бера :

$$L(\lambda) = L_0(\lambda) e^{-\int_0^{l_0} K(l, \lambda) dl} \quad (3.1)$$

Здесь, $L(\lambda)$ – спектральная яркость излучения, прошедшего путь l_0 ;
 $L_0(\lambda)$ – спектральная яркость излучения до вхождения в среду;
 $K(l, \lambda)$ – спектральный показатель ослабления, который имеет размерность $[км^{-1}]$.

Формула (3.1) может быть записана в следующем виде:

$$L_l(\lambda) = \tau(l, \lambda) \bullet L_0(\lambda) \quad (3.2)$$

где $\tau(l, \lambda) = e^{-\int_0^{l_0} K(l, \lambda) dl}$ – коэффициент пропускания среды, или прозрачность неоднородного слоя толщиной l_0 на длине волны λ .

Если слой l_0 однороден, то спектральный коэффициент прозрачности $\tau(l, \lambda)$ определяется следующим образом (так как в этом случае $K(l, \lambda) = K(\lambda) = \text{const}$):

$$\tau(l_0, \lambda) = e^{-K(\lambda)l_0}. \quad (3.3)$$

Показатель ослабления $K(l, \lambda)$ является суммой показателей рассеяния $\sigma(l, \lambda)$ и поглощения $\alpha(l, \lambda)$:

$$K(l, \lambda) = \alpha(l, \lambda) + \sigma(l, \lambda) \quad (3.4)$$

3.2. Явления рассеяния в атмосфере

Молекулярное рассеяние. Данный вид рассеяния является следствием возникновения неоднородностей плотности воздуха, вызванных флуктуациями этой величины. Спектральный показатель молекулярного рассеяния определяется по следующей формуле:

$$\sigma_R^{(\lambda)} = 0,83N \cdot A^3 \lambda^{-4} [\text{см}^{-1}] \quad (3.5)$$

где N – число молекул в 1 см^3 ;
 A – площадь поперечного сечения молекулы (см^2);
 λ – длина волны излучения (см).

Аэрозольное рассеяние. Рассмотрим подробнее аэрозольное рассеяние и ослабление. Рассеяние на отдельных частицах характеризуется показателем рассеяния σ , для характеристики рассеивающих свойств частицы по направлениям используется понятие угловой функции рассеяния, которую часто называют индикатрисой рассеяния:

$$f(\gamma) = \frac{L(\gamma)}{\int_{(4\pi)} L(\gamma) d\omega} \quad (3.6)$$

где $L(\gamma)$ – интенсивность излучения, рассеянного частицей в направлении угла γ ;
 $d\omega$ – элементарный телесный угол.

Если в определенном единичном объеме рассеивающей среды находится N частиц, распределение по размерам которых описывается функцией $f(r)$, то объемный показатель аэрозольного рассеяния совокупности частиц N будет выражаться формулой:

$$\sigma_a = N \int_0^{\infty} \sigma(r) f(r) dr \quad (3.7)$$

здесь, $\sigma(r)$ – объемный показатель аэрозольного рассеяния i -й частицы радиуса r . В теории рассеяния частиц сферической формы, разработанной Ми [10], рассмотрены вопросы рассеяния на частицах произвольных размеров и получены выражения для σ_R и σ_a в виде функций параметра Ми $\rho = 2\pi r/\lambda$. Для объемного показателя поглощения α_a совокупности частиц N можно получить выражение, аналогичное (3.7):

$$\alpha_a = N \int_0^{\infty} \alpha(r) f(r) dr \quad (3.8)$$

где $\alpha(r)$ – показатель поглощения i -й частицы радиуса r . Тогда, с использованием формулы (3.7) и (3.8), объемный показатель ослабления объема N частиц будет иметь вид:

$$K_a = \alpha_a + \sigma_a. \quad (3.9)$$

3.3. Поглощение излучения газами атмосферы

Перейдем теперь к явлению поглощения излучения газовыми компонентами атмосферы. Выбор спектральных диапазонов, удобных для работы ОЭП в видимой и ИК областях спектра, в основном основывается на учете полос пропускания атмосферы. Анализ коэффициента поглощения излучения данной длины волны или частоты того или иного газа в атмосфере ведется на основе моделей полос поглощения. Как показали специальные исследования процессов, влияющих на ширину спектральных линий поглощения, в приземном слое атмосферы ширина линий обусловлена столкновением молекул. Теория данного процесса была разработана Лорентцем, который получил формулу распределения интенсивности спектральных линий поглощения как функции частоты ν . Для группы перекрывающихся линий (полосы) спектральный коэффициент поглощения равен:

$$\alpha(V) = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{\pi} \frac{\gamma_i}{(V - V_{oi})^2 + \gamma_i^2} \quad (3.10)$$

где I_i – интегральная интенсивность i -й перекрывающейся линии;
 γ_i – полуширина линии;
 V_{oi} – частота центра линии.

Вообще говоря, вычисления $\alpha(V)$ практически возможны, если известны модели полос поглощения. Современная атмосферная оптика оперирует моделями Эльзассера, Кинга, статистической моделью, квазистатистической и комбинированной моделями, с использованием которых проводятся расчеты $\alpha(V)$ мощных полос поглощения H_2O и CO_2 , а также других газов. Наиболее мощная поглощающая компонента атмосферы – H_2O имеет значительные полосы поглощения, располагающиеся около $\lambda_0 = 0,94; 1,1; 1,38; 1,87; 2,7; 3,2$ и $6,3$ мкм. Наличие этих полос вызвано колебательно-вращательным движением молекул воды. Молекулы CO_2 создают значительное поглощение около $\lambda_0 = 1,4; 1,6; 2,0; 4,3; 4,8; 5,2; 9,4; 10,4$ и $13,9$ мкм, а молекулы O_3 ослабляют излучение около $\lambda_0 = 9,6$ мкм. Для расчетов параметров ОЭП и С очень важно отметить наличие «окон» пропускания атмосферы. Так, в атмосфере приземного слоя имеются следующие полосы пропускания: $\Delta\lambda = 0,95 - 1,05; 1,2 - 1,3; 1,5 - 1,8; 2,1 - 2,4; 3,3 - 4,2; 4,5 - 5,0; 8 - 13$ мкм. Исходя из исследуемых

диапазонов длин волн окон прозрачности атмосферы, целесообразно выбирать и рабочие области спектра оптико-электронных приборов. Помимо чисто расчетных методов определения функций пропускания атмосферы, в литературе имеется ряд эмпирических формул, которые удобны своей простотой. Так, Эльдер и Стронг предложили следующую формулу для функции пропускания τ горизонтальными трассами:

$$\tau = e^{-Kl} = t_0 - K \lg \omega(\%) \quad (3.11)$$

где t_0 и K_1 – параметры, которые зависят от λ ;
 $\omega = V_l$ – слой осажденной воды в мм; (l – путь излучения в км; V – абсолютная влажность, которая практически равна количеству осажденной воды на трассе 1 км).

Для определения V необходимо умножить величину относительной влажности на количество осажденной воды. Формула (3.11) справедлива для трасс, расположенных на высотах $H = 2 \div 3$ км. Для высот $H > 3$ км, по методике Эльдера и Стронга, величина ω имеет вид:

$$\omega = Vl \cdot 10^{-(3+0,2H)} \quad (3.12)$$

где H измеряется в километрах.

Ученые ИОА СО РАН под руководством В.Е. Зуева получили аппроксимационную формулу для интегральной прозрачности τ в диапазоне 0,7 – 14 мкм:

$$\tau = 66,7 \cdot 10^{-0,059\sqrt{\omega}} \cdot 10^{-0,015l} (\%) \quad (3.13)$$

где ω – осажденный слой воды в см;
 l – дистанция в км.

3.4. Флуктуации параметров оптического излучения в атмосфере

При распространении оптического излучения в атмосфере наблюдаются флуктуации его параметров: интенсивности, фазы,

состояния поляризации, угла прихода, т.е. расходимости и т.д. Эти флуктуации обусловлены турбулентными явлениями, связанными с колебаниями плотности воздуха, т.е. его показателя преломления.

1. Флуктуации интенсивности приходящего оптического излучения (эффект «мерцания»).

Мерой флуктуации интенсивности служит дисперсия флуктуации \lg силы излучения источника

$$\sigma_M^2 = \overline{(\ln I - \overline{\ln I})^2} \quad (3.14)$$

Допустим, что длина трассы l намного больше внешнего масштаба l_B турбулентности. Тогда плотность распределения вероятности $P(I)$ амплитуды оптического сигнала имеет вид:

$$P(I) = \frac{1}{\sigma_M \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln I - \overline{\ln I})^2}{2\sigma_M^2}} \quad (3.15)$$

т. е. подчиняется логарифмически-нормальному закону статистики, причем величина дисперсии σ_M^2 равна:

$$\sigma_M^2 = 1,23 \cdot C_n^2 \cdot K^{7/6} \cdot l^{11/6} \quad (3.16)$$

где $K = 2\pi/\lambda$, а C_n – структурная постоянная турбулентности показателя преломления, величина, которая зависит от времени суток, метеорологической дальности видимости S_M и высоты H . При этом должно выполняться условие:

$$l \leq l_0^2 / \lambda \quad (3.17)$$

где l_0 – внутренний масштаб турбулентности. Мерцание имеет низкочастотный временной характер, а максимум этого спектра лежит на частоте

$$f_M = 0,32V_{\perp}\sqrt{\lambda l} \quad (3.18)$$

где V_{\perp} – скорость ветра перпендикулярна направлению излучения.

С увеличением зенитного угла Z наблюдаемого источника излучения амплитуда мерцания возрастает по закону $\sec Z$, а частота уменьшается. Так у горизонта $f_m \approx 5 - 10$ Гц, а вблизи зенита $f_m \sim 1000$ Гц.

2. Флуктуация фазы и угла прихода излучения.

Изменения хода лучей из-за турбулентности атмосферы приводят к флуктуации фазы вдоль и поперек пучка. Поперечные флуктуации нарушают пространственную когерентность волнового фронта, искривляют и изгибают пучок, вызывают «дрожание» изображения. Флуктуации фазы вдоль пучка уменьшают временную когерентность. Выяснено, что выражение для структурной функции фазы φ имеет вид:

$$D\varphi(r) = (\varphi_1 -)^2 = 2,9K^2l \bullet C_n^2 r^{5/3} \quad (3.19)$$

при $l_e > r > \sqrt{\lambda l}$

$$D\varphi(r) = 1,46D^{5/3} C_n^2 l \quad (3.20)$$

при $l_0 < r < \sqrt{\lambda l}$, а дисперсия угла прихода излучения для ОЭП с входным зрачком D , определяется как

$$\sigma_{\beta}^2 = \frac{1}{K^2 D^2} D_{\varphi}(D) = 1,46D^{-1/3} C_n^2 \bullet l \quad (3.21)$$

при $l_0 < D < \sqrt{\lambda l}$,

$$\sigma_{\beta}^2 = 2,9D^{-1/3} \bullet C_n^2 \bullet l \quad (3.22)$$

при $l_g > D > \sqrt{\lambda l}$, $K = 2\pi/\lambda$.

3. Рефракция.

Из-за рефракции оптический луч входит в зрачок приемной системы под углом α_p :

$$\alpha_p = \int_0^l (\sin \alpha / n)(dn / dT) \bullet \left| \overline{\nabla T} \right| dl \quad (3.23)$$

где α – угол между направлением градиента $\overline{\nabla T}$ и осью ОЭП;
 dn/dT – температурный градиент показателя преломления.

4. Сигналы и помехи в оптическо-электронном приборе

4.1. Детерминированные сигналы и способы их описания

Сигналом принято называть физический процесс, несущий информацию и пригодный для передачи на расстояние. В ОЭП и С носителем информации является оптическое излучение. Рассмотрим периодические сигналы, которые, как правило, содержат несущую информацию о наблюдаемых объектах в виде изменяющихся амплитуды, фазы и частоты.

1. Сложный периодический процесс.

Любой сложный периодический сигнал может быть представлен с помощью ряда Фурье в виде суммы элементарных гармонических колебаний. Пусть функция $U(t)$, заданная в интервале от t_1 до t_2 , повторяется с частотой $\omega_1 = 2\pi/T$. Тогда, с несущественными математическими погрешностями, сводящимися к тому, что функция должна быть:

- а) непрерывной или иметь конечное число разрывов;
б) также иметь в пределах одного периода конечное число \max и \min (условие Дирихле), функция $U(t)$ может быть представлена рядом Фурье в виде суммы тригонометрических функций:

$$U(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_k^{\infty} (a_k \cos K\omega_1 t + b_k \sin K\omega_1 t) \quad (4.1)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} U(t) dt, \\ a_k &= \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} U(t) \cos K\omega_1 t dt, \\ b_k &= \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} U(t) \sin K\omega_1 t dt. \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

Разложение сигнала $U(t)$ может быть записано и в другой форме.

Пусть

$$a_k = A_k \cos \psi_k; b_k = A_k \sin \psi_k, \quad (4.3)$$

т.е.

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \psi_k = \arctg(b_k / a_k)$$

Тогда найдем, что

$$\begin{aligned}
 & a_k \cos K\omega_1 t + b_k \sin K\omega_1 t = \\
 & = A_k (\cos \psi_k \cos K\omega_1 t + \sin \psi_k \sin K\omega_1 t = A_k \cos(K\omega_1 t - \psi_k)
 \end{aligned}$$

и

$$U(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos K\omega_1 t - \psi_k) \quad (4.4)$$

где $A_0 = a_0$.

Следовательно, сигнал $U(t)$ определяется совокупностью значений A_k и ψ_k . Запишем теперь ряд Фурье в комплексной форме. Известно, что

$$A_k \cos(K\omega_1 t - \psi_k) = \frac{1}{2} A_k e^{j(K\omega_1 t - \psi_k)} + \frac{1}{2} A_k e^{-j(K\omega_1 t - \psi_k)}$$

Тогда

$$\begin{aligned}
 U(t) & \approx \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(K\omega_1 t - \psi_k) = \\
 & = \sum_{k=1}^{\infty} (A_k / 2) e^{j(K\omega_1 t - \psi_k)} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k / 2) e^{-j(K\omega_1 t - \psi_k)}
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Можно убедиться, что A_k – четная функция относительно k , а ψ_k – функция нечетная. Это получается, используя (4.3) и (4.2), откуда имеем, что

$$a(-k) = a(+k); b(-k) = -b(+k)$$

и

$$A(-k) = A(+k); \psi(-k) = -\psi(+k) \quad (4.6)$$

Следовательно

$$\sum_{k=1}^{+\infty} (A_k / 2) e^{j(K\omega_1 t - \psi_k)} = \sum_{k=1}^{-\infty} (A_k / 2) e^{-j(K\omega_1 t - \psi_k)}$$

и

$$u(t) \approx \frac{1}{2} \left[\sum_{k=-\infty}^{k=-1} (A_k e^{j(K\omega_1 t - \psi_k)}) + \sum_{k=+1}^{+\infty} (A_k e^{j(K\omega_1 t - \psi_k)}) \right]$$

Кроме того, при $k = 0$ $b_k = b_0 = 0$;

$$\Psi_k = \Psi_0 = 0; e^{j(K\omega_1 - \Psi_k)} = 1$$

то

$$\sum_{k=0} (A_k / 2) e^{i(K\omega_1 - \psi_k)} = \frac{A_0}{2} = \frac{a_0}{2} \quad (4.7)$$

Таким образом,

$$u(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} (A_k e^{i(K\omega_1 t - \psi_k)}) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} (A_k e^{-i\Psi_k} e^{-ik\omega_1 t}) \quad (4.8)$$

Обозначая

$$\dot{A}_k = A_k e^{-i\Psi_k}, \quad (4.9)$$

найдем окончательное выражение сигнала $u(t)$ в комплексной форме:

$$u(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} \dot{A}_k e^{ik\omega_1 t} \quad (4.10)$$

2. Спектры непериодических сигналов.

Предположим, что сигнал задан в виде функции времени, удовлетворяющей условию Дирихле и абсолютно интегрируемой. Для удобства вывода примем, что $u(t)$ действует в конечном интервале $t_1 < t < t_2$, а в целях проведения гармонического анализа, превратим $u(t)$ в периодическую $u_1(t)$ путем повторения ее с произвольным периодом $T > (t_2 - t_1)$. Тогда, для $u_1(t)$ ряд Фурье имеет вид:

$$u_1(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} \dot{A}_k e^{ik\omega t} \quad (4.11)$$

причем амплитуда гармоник будет тем меньше, чем больше T :

$$A_k = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} u(t) e^{-ik\omega t} dt, \quad (4.12)$$

а количество гармоник будет бесконечно большим, так как основная частота $f_1 = \omega / 2\pi = 1/T$ при $T \rightarrow \infty$ стремится к 0, т. е. расстояние между спектральными линиями становится бесконечно малым, а спектр сплошным.

Действительно,

$$\begin{aligned} u_1(t) &= \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} \dot{A}_k e^{ik\omega t} = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} \left[\frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} u_1(t) e^{-ik\omega t} dt \right] e^{ik\omega t} = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} e^{ik\omega t} \cdot f_1 \cdot \int_{t_1}^{t_2} u_1(t) e^{-ik\omega t} dt. \end{aligned} \quad (4.13)$$

При $T \rightarrow \infty$ $u_1(t) = u(t)$ $f_1 = df$ $k\omega_1 = \omega = 2\pi f$, а операция суммирования превращается в операцию интегрирования, т. е.

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i2\pi ft} df \int_{t_1}^{t_2} u(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (4.14)$$

Обозначим внутренний интеграл некоторой функцией частоты с волнистой линией сверху, показывающей, что при вычислении этой функции осуществляется разложение Фурье:

$$\tilde{u}(f) = \int_{t_1}^{t_2} u(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (4.15)$$

Тогда найдем

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}(f) e^{i2\pi ft} df \quad (4.16)$$

Функция $\tilde{u}(f)$ называется **прямым преобразованием Фурье**, а $u(t)$ – **обратным преобразованием Фурье**.

Достаточно часто **функцию $\tilde{u}(f)$** называют **спектральной плотностью, спектральной характеристикой** или **комплексным спектром Фурье** функции $u(t)$.

Преобразование Фурье, естественно, может быть приемлемо не только к функции времени, но и к функции $u(x)$ пространственной координаты x . В этом случае спектр Фурье

$$\tilde{u}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x) e^{-i2\pi vx} dx \quad (4.17)$$

или

$$\tilde{u}(p) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u(x) e^{-ipx} dx \quad (4.18)$$

где $p = (2\pi/\lambda)$ круговая пространственная частота; $v = (1/\lambda)$ – линейная пространственная частота.

В этом случае $\tilde{u}(v)$ измеряется в $[B \cdot \text{см}]$, $\tilde{u}(p)$ – в $[B \cdot \text{рад}^{-1}]$, если амплитуду выражать в $[B]$, а x в $[\text{см}]$.

4.2. Свойства спектров сигналов и их свертка

Основные свойства спектров определяются рядом теорем, которые рассмотрим применительно к пространственным координатам:

А. Теорема о спектре суммы (свойство линейности).

Пусть функции $\tilde{u}_1(v)$ и $\tilde{u}_2(v)$ имеют спектры $u_1(x)$ и $u_2(x)$, т.е.

$$\tilde{u}_1(v) = \int_{-\infty}^{\infty} u_1(x) e^{-i2\pi vx} dx$$

$$\tilde{u}_2(v) = \int_{-\infty}^{\infty} u_2(x) e^{-i2\pi vx} dx$$

Тогда сумма спектров имеет вид:

$$u(v) = \tilde{u}_1(v) + \tilde{u}_2(v) = \int_{-\infty}^{\infty} [u_1(x) + u_2(x)] e^{-i2\pi vx} dx$$

Б. Теорема запаздывания.

Пусть функция $u(x)$ имеет спектр

$$\tilde{u}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x) e^{-i2\pi vx} dx$$

Требуется найти спектр $\tilde{u}_1(v)$, соответствующий $u_1(x)$
 $= u(x-x_0)$.

По определению имеем

$$\tilde{u}_1(v) = \int_{-\infty}^{\infty} u_1(x-x_0)e^{-i2\pi vx} dx$$

то, проведя замену переменной интегрирования на $x_1 = x-x_0$, получим

$$\tilde{u}_1(v) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x_1)e^{-i2\pi v(x_1+x_0)} dx_1 = e^{-i2\pi vx_0} \int_{-\infty}^{\infty} u(x_1)e^{-i2\pi vx_1} dx_1$$

но

$$\tilde{u}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x_1)e^{-i2\pi vx_1} dx_1$$

и

$$\tilde{u}_1(v) = \tilde{u}(v)e^{-i2\pi vx_0} \tag{4.19}$$

В. Теорема смещения, или теорема о транспозиции (переносе) спектра.

Пусть спектр функции $u(x)$ есть $\tilde{u}(v)$. Очевидно, что смещенный спектр

$$\begin{aligned} \tilde{u}_1(v) &= \tilde{u}(v+v_0) = \int_{-\infty}^{\infty} u_1(x)e^{-i2\pi(v+v_0)x} dx = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} u(x)e^{-i2\pi v_0 x} dx \end{aligned}$$

Обозначив $u_1(x) = u(x)e^{-i2\pi v_0 x}$ найдем

$$\tilde{u}_1(v) = \tilde{u}(v + v_0) = \int_{-\infty}^{\infty} u_1(x)e^{-i2\pi vx} dx$$

т.е. смещенным спектром обладает функция

$$u_1(x) = u(x)e^{-i2\pi v_0 x} \tag{4.20}$$

Следовательно, функции $u(x)$ соответствует спектр $\tilde{u}(v)$, а функции $u_1(x)$ – смещенный спектр $\tilde{u}(v) = \tilde{u}(v + v_0)$.

Г. Закон сохранения энергии (равенство Парсеваля) или теорема о связи между произведениями функций и их комплексных спектров.

Пусть заданы две функции $u_1(x)$ и $u_2(x)$. В соответствии с прямым преобразованием Фурье имеем:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_1(v) &= \int_{-\infty}^{\infty} u_1(x)e^{-i2\pi vx} dv, \\ \tilde{u}_2(v) &= \int_{-\infty}^{\infty} u_2(x)e^{-i2\pi vx} dx \end{aligned}$$

На основании обратного преобразования Фурье можно найти

$$u_1(x) \bullet u_2(x) = u_2(x) \bullet \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}_1(v)e^{+i2\pi vx} dv \tag{4.21}$$

Интегрируя (4.21) по x в пределах $\pm \infty$, получим

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u_1(x) \bullet u_2(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} u_2(x) dx \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}_1(v) e^{+i2\pi vx} dv =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}_1(v) dv \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}_2(x) e^{+i2\pi vx} dx \quad (4.22)$$

Но внутренний интеграл представляет собой сопряженный спектр функции $u_2(x)$. Следовательно,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u_1(x) \bullet u_2(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}_1(v) \bullet \tilde{u}_2^*(v) dv \quad (4.23)$$

Закон сохранения энергии W будет выражаться следующим образом.

Если, $u_1(x) = u_2(x) = u(x)$, то $\tilde{u}_1(v) = \tilde{u}_2(v) = \tilde{u}(v)$,

$$\tilde{u}_1(v) \bullet \tilde{u}_2^*(v) = |\tilde{u}(v)|^2$$

Тогда

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} [u(x)]^2 dx = \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{u}(x)|^2 dv \quad (4.24)$$

Д. Теорема о свертке спектров.

Пусть задано две функции $u_1(x)$ и $u_3(x)$. Их комплексные спектры $u_1(m)$ и $u_3(m)$. Тогда можно записать следующее исходное равенство:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u_1(x) \bullet u_3(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}_1(m) \bullet \tilde{u}_3^*(m) dm \quad (4.25)$$

Рассмотрим также функцию $u_2(x)$ со спектром $u_2(m)$, удовлетворяющую соотношению:

$$u_2(x) = u_3(x)e^{i2\pi vx},$$

или

$$u_3(x) = u_2(x)e^{-i2\pi vx}$$

Тогда в соответствии с теоремой смещения спектр функции $u_1(x)$ равен смещенному спектру $u_2(x)$, т. е.

$$\tilde{u}_3(m) = \tilde{u}_2(m + v)$$

или

$$\tilde{u}_3^*(m) = \tilde{u}_3(-m) = \tilde{u}_2(-m + v) \sim$$

Тогда можно преобразовать левую и правую части уравнения (4.25).

1. Левая часть:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u_1(x) \bullet u_3(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} u_1(x) \bullet u_2^*(x) e^{-i2\pi vx} dx \quad (4.26)$$

Полученное выражение (4.26) представляет собой *спектр*

произведения двух функций, и обозначим его $\frac{\sim}{u_1(x) \bullet u_2(x)}$.

2. Правая часть:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}_1(m) \bullet u_3^*(m) dm = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}_1(m) \bullet \tilde{u}_2(v - m) dm \quad (4.27)$$

Выражение (4.27) представляет собой операцию интегрирования, которую принято называть *сверткой функции* $\tilde{u}_1(m)$ и $\tilde{u}_2(m)$:

$$\tilde{u}_1(m) \otimes \tilde{u}_2(m) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}_1(m) \bullet \tilde{u}_2(v-m) dm \quad (4.28)$$

Следовательно, имеем

$$\sim$$

$$\overline{u_1(x) \bullet u_2(x)} = \tilde{u}_1(m) \otimes \tilde{u}_2(m)$$

т.е. спектр произведения равен свертке спектров.

Е. Теорема о спектре свертки.

Рассмотрим свертку $u(y)$ двух функций $u_1(x)$, $u_2(x)$:

$$u(y) = u_1(x) \otimes u_2(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_1(x) \cdot u_2(y-x) dx.$$

Спектр свертки $u(y)$ равен

$$\tilde{u}(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(y) e^{-i2\pi v y} dy = \int_{-\infty}^{+\infty} u_1(x) dx \int_{-\infty}^{+\infty} u_2(y-x) e^{-i2\pi v y} dy,$$

замена переменной: $z = y - x$

Тогда

$$\tilde{u}(v) = \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} u_1(x) e^{-i2\pi v x} dx}_{\tilde{u}_1(v)} \cdot \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} u_2(z) e^{-i2\pi v z} dz}_{\tilde{u}_2(v)},$$

Откуда получаем

$$\tilde{u}(v) = \tilde{u}_1(v) \cdot \tilde{u}_2(v), \quad (4.29)$$

т.е. спектр свертки двух функций равен произведению спектров этих функций.

Ж. Теорема о спектре производной сигнала.

Пусть спектр функции $u(x)$ равен $\tilde{u}(v)$.

Найдем спектр $\tilde{u}_2(v)$ производной от заданной

$$u'(x) = \frac{du(x)}{dx}.$$

функции

В соответствии с преобразованием Фурье имеем

$$\tilde{u}_1(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} u'(x) e^{-i2\pi vx} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i2\pi vx} du(x). \quad (4.30)$$

Интегрируя (4.30) по частям, найдем:

$$\tilde{u}_1(v) = u'(x) e^{-i2\pi vx} \Big|_{-\infty}^{+\infty} - \int_{-\infty}^{+\infty} u(x) d(e^{-i2\pi vx}).$$

Так как функция $u(x) \rightarrow 0$ при $x \rightarrow \pm \infty$, то

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u(x) e^{-i2\pi vx} \Big|_{-\infty}^{+\infty} \rightarrow 0.$$

В то же время

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u(x) d(e^{-i2\pi\nu x}) = -i2\pi\nu \int_{-\infty}^{+\infty} u(x) e^{-i2\pi\nu x} dx = i2\pi\nu \tilde{u}(\nu),$$

т.е. спектр производной равен спектру исходной функции, умноженному на $i2\pi\nu$.

3. Теорема о спектре интегрированного сигнала.

Пусть спектр функции $u(x)$ равен $\tilde{u}(\nu)$.

Найдем спектр $\tilde{u}_1(\nu)$ интеграла заданной функции в пределах от $-\infty$

$$\int_{-\infty}^x u(x) dx$$

до $+\infty$, т.е. $-\infty$. Очевидно, что

$$u_1(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^x u(x) dx \right) e^{-i2\pi\nu x} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^x u(x) dx \right) \frac{de^{-i2\pi\nu x}}{-i2\pi\nu}. \quad (4.31)$$

Интегрируя (4.31) по частям, найдем:

$$u_1(\nu) = \left[\left(\int_{-\infty}^{\infty} u(x) dx \right) \frac{de^{-i2\pi\nu x}}{-i2\pi\nu} \right]_{-\infty}^{+\infty} - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-i2\pi\nu x}}{-i2\pi\nu} \cdot u(x) dx.$$

При условии, что $\int_{-\infty}^{\infty} u(x) dx = 0$, найдем

$$u_1(\nu) = \frac{1}{i2\pi\nu} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x) e^{-i2\pi\nu x} dx = \frac{\tilde{u}(\nu)}{i2\pi\nu},$$

т.е. спектр интеграла заданной функции равен ее спектру, деленному на $i2\pi\nu$.

4.3. Случайные сигналы и способы их описания

Случайный сигнал (СС) может быть стационарным, когда его характеристики (математическое ожидание, дисперсия и др.) не зависят от аргумента спектральной функции. Основными характеристиками случайных функций являются: 1) плотность распределения вероятностей случайного процесса, 2) математическое ожидание, 3) дисперсия, 4) ковариационная и корреляционная функция, 5) энергетический спектр.

1. Плотность распределения вероятности случайного процесса. Если функция $u(x)$ является случайной функцией аргумента x , то плотностью распределения непрерывной случайной величины u является функция

$$p(u) = \frac{dp}{du}, \quad (4.32)$$

так как $dp = p(u) \cdot du$, т.е. вероятность dp попадания случайной величины u внутрь интервала $du \sim$ величине интервала.

2. Математическое ожидание непрерывной случайной величины u равно:

$$\bar{u} = M(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} up(u)du. \quad (4.33)$$

3. Дисперсия случайной величины x

$$\overline{\Delta u^2} = D(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} [u - M(u)]^2 p(u)du = \bar{u} - (\bar{u})^2. \quad (4.34)$$

4. Корреляционная функция случайного процесса $u_1(x)$, имеющего математическое ожидание $M_1(x)$:

$$R_1(\Delta x) = \int_{-\infty}^{+\infty} [u_1(x) - M_1(x)] \cdot [u_1^*(x + \Delta x) - M_1(x)] dx, \quad (4.35)$$

где $u_1(x)$ – случайный процесс аргумента x .

Корреляционная функция обычно определяется, если $u_1(x)$ – центрированный случайный процесс. В других случаях пользуются понятием ковариационной функции $K_1(x)$:

$$K_1(\Delta x) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_1(x) \cdot u_1^*(x + \Delta x) dx, \quad (4.36)$$

которая, в нормированном виде, имеет вид:

$$K_1(\Delta x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2x} \int_{-x}^x u_1(x) \cdot u_1^*(x + \Delta x) dx.$$

В тех случаях, когда анализируются два случайных процесса, имеет место понятие взаимно ковариационной функции процессов $u_1(x)$ и $u_2(x)$

$$K_{12}(\Delta x) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_1(x) \cdot u_2^*(x + \Delta x) dx. \quad (4.37)$$

5. В отличие от детерминированной функции (сигналов), преобразование Фурье к случайным функциям неприменимо, так как спектральная плотность самой спектральной функции – понятие бессмысленное. Можно ввести понятие о спектральной плотности дисперсии, так как последняя – неслучайная функция. Эта величина часто эквивалентна мощности, приходящейся на единицу частоты, поэтому ее называют *энергетическим спектром* случайной функции

(статистическим спектром): $E_1(\omega) = \frac{\overline{du^2}}{d\omega}$, откуда

$$\overline{u^2} = \int_{-\infty}^{\infty} E_1(\omega) d\omega$$

Н. Винер и А.Я. Хинчин показали для случайного стационарного процесса, что ковариационная функция $K_1(x)$ и энергетический спектр $E_1(\omega)$ являются парой преобразований Фурье.

$$E_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K_1(\Delta x) \cdot e^{-i2\pi\omega\Delta x} d(\Delta x); \quad (4.38)$$

$$K_1(\Delta x) = \int_{-\infty}^{\infty} E_1(\omega) \cdot e^{i\pi\omega\Delta x} d\omega. \quad (4.39)$$

Рассмотрим это подробнее.

Предположим, что задана функция $u_1(x)$, которая в интервале $[-X, X]$ определяется:

$$u_1(x) = \begin{cases} u(x), & \text{при } |x| \leq X; \\ 0, & \text{при } |x| > X. \end{cases}$$

Найдем функцию автокорреляции рассматриваемой функции $u_1(x)$:

$$K_1(\Delta x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2x} \int_{-x}^x u(x) \cdot u(x + \Delta x) dx, \quad (4.40)$$

где $u(x)$ – центрированное значение функции $u_1(x)$.

Функции $u(x)$ и $u(x+\Delta x)$ можно представить в виде интегралов Фурье.

$$u_1(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}_1^*(v) e^{+i2\pi vx} dv, \quad (4.41)$$

$$u_1(x + \Delta x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}_1(v_1) e^{+i2\pi v_1(x+\Delta x)} dv_1.$$

Тогда

$$\begin{aligned} K_1(\Delta x) &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2x} \int_{-x}^x \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}_1(v_1) \tilde{u}_1^*(v) \cdot e^{i2\pi v_1 \Delta x} \times e^{i2\pi(v_1-v)x} dx dv dv_1 = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\tilde{u}_1(v) \tilde{u}_1^*(v)}{2x} \right] e^{i2\pi v_1 \Delta x} \cdot \left[\lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-x}^x e^{i2\pi(v_1-v)x} dx \right] dv dv_1. \end{aligned} \quad (4.42)$$

Но внутренний интеграл в (4.42) представляет собой дельта-функцию:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-x}^x e^{i2\pi(v_1-v)x} dx = \delta(v_1 - v),$$

поэтому

$$K_1(\Delta x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\tilde{u}_1(v_1) \tilde{u}_1^*(v)}{2x} \right] e^{i2\pi v_1 \Delta x} \cdot \delta(v_1 - v) dv dv_1.$$

Так как $\delta(v_1-v) \neq 0$ при $v_1=v$, то

$$K_1(\Delta x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \lim \frac{|\tilde{u}_1(v)|^2}{2x} e^{i2\pi v \Delta x} dv.$$

Обозначив

$$E_1(v) = \lim \frac{|\tilde{u}_1(v)|^2}{2x},$$

найдем

$$K_1(\Delta x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \lim \frac{|\tilde{u}_1(v)|^2}{2x} e^{i2\pi v \Delta x} dv.$$

Поскольку $K_1(\Delta x)$ есть преобразование Фурье $E_1(v)$, то справедливо и преобразование

$$E_1(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_1(\Delta x) e^{-i2\pi v \Delta x} d(\Delta x). \quad (4.43)$$

Пользуясь зависимостью $v = w/2\pi$, получим

$$K_1(\Delta x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} E_1(v) e^{i w \Delta x} dv, \quad (4.44)$$

$$E_1(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_1(\Delta x) e^{-i\omega\Delta x} d(\Delta x). \quad (4.45)$$

Функцию $E_1(\omega)$ или $(E_1(\nu))$ называют *энергетическим спектром*, или *спектром мощности* случайного процесса $u(x)$. Это становится понятным из следующего:

при $\Delta x = 0$

$$K_1(\Delta x) = K(0) = \overline{u^2} = \overline{\Delta u^2} = \overline{(u - \bar{u})^2}, \quad \text{т.е.}$$

представляет собой дисперсию процесса.

$$K_1(\Delta x) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_1(\nu) e^{i2\pi\nu x} d\nu,$$

Поскольку

$$\overline{u^2} = K_1(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_1(\nu) d\nu;$$

откуда имеем, что:

$$E_1(\nu) = \frac{d\overline{u^2}}{d\nu} \quad (4.46)$$

представляет собой *спектральную плотность дисперсии*.

Двумерный спектр Хинчина – Винера для двумерного процесса имеет вид:

$$E_1(\omega_x, \omega_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_1(\Delta x, \Delta y) e^{-[i(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)]} d(\Delta x) d(\Delta y). \quad (4.47)$$

Рассмотрим характерные случайные сигналы для ОЭП. Ими являются внутренние шумы приемников оптического излучения. Основные источники внешних случайных помех для ОЭП – излучение естественных фонов, на которых наблюдаются или исследуются объекты (излучение наземных ландшафтов, небесных тел, облаков и т.д.). В ряде случаев источником помех для ОЭП является искажающее влияние атмосферы на оптический сигнал, например, «мерцание» и «дрожание» изображения.

Иногда флуктуирующий излучающий фон представляют в виде случайной стационарной совокупности двумерных импульсов яркости, амплитуда которых подчиняется гауссовому (нормальному) закону распределения:

$$p(L) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(L-\bar{L})^2}{2\sigma_L^2}}, \quad (4.48)$$

а размеры участков фона – закону распределения Пуассона:

$$p(L) = \left(\frac{1}{r}\right) e^{-\left(\frac{L}{r}\right)}, \quad (4.49)$$

где L – энергетическая яркость какой-либо точки фона;

\bar{L} – средняя ее величина;

σ_L^2 – дисперсия L ;

r – расстояние между отдельными точками фона;

\bar{r} – средняя величина r .

Если случайные величины L и r не зависят друг от друга, то двумерную автокорреляционную функцию можно записать в виде:

$$R(r) = \sigma_L^2 \cdot e^{-(r/\bar{r})} + \bar{L}^2. \quad (4.50)$$

Тогда, на основании преобразования Фурье, получим двумерный спектр мощности фона:

$$E_1(w_x, w_y) = \frac{2\pi\sigma_L^2/\bar{r}}{\left(1/\bar{r}^2 + w_x^2 + w_y^2\right)^{3/2}}, \quad (4.51)$$

где w_x, w_y – составляющие вектора пространственной частоты.

Одномерный спектр мощности определяется как

$$E(w) = \frac{4\pi\sigma_L^2/\bar{r}}{1/\bar{r}^2 + w^2}. \quad (4.52)$$

Результаты современных статистических исследований фонов в области спектра $\Delta\lambda = 2 - 3$ мкм, где преобладает рассеянное солнечное излучение, показали, что распределение яркости городского ландшафта и неба подчиняются закону Пуассона. Во всех остальных случаях для фонов типа неба, лесного и городского ландшафтов это распределение подчиняется гауссовой статистике.

Для облачного изотропного фона в полярной системе координат спектр Хинчина – Винера иногда представляется в следующем виде:

$$E(\vec{w}_{\vec{p}}) = 2\pi\vec{p}^2\sigma_L^2(1 + \vec{w}_{\vec{p}}^2\vec{p}^2)^{-1}, \quad (4.53)$$

где \vec{p} – радиус корреляции – параметр, аналогичный интервалу корреляции, на котором корреляционная функция составляет 0,37% от дисперсии яркости фона σ_L^2 .

Для области высоких частот спектр Хинчина – Винера равен:

$$E(\vec{w}_{\vec{p}}) \approx 2\pi\sigma_L^2 w_{\vec{p}}^{-2}. \quad (4.54)$$

Установлено, что случайная функция, описывающая фон неба, в общем случае нестационарна. Однако в пределах сравнительно небольших углов вдали от направлений на Солнце и на горизонт, фон облачного неба все же можно считать стационарным процессом. Радиус корреляции облачного неба обычно не превышает в угловой мере 1° , 3° .

5. Основные узлы и элементы ОЭП и С

5.1. Оптическая система

Одним из наиболее важных узлов ОЭП и С является *оптическая система (ОС)*. Структура оптической системы ОЭП и С может быть различной в зависимости от способа работы всего прибора и от стоящих перед ним задач.

Обобщенные структурные схемы оптических систем активных (а) и пассивных (б) ОЭП приведены на рис. 5.1.

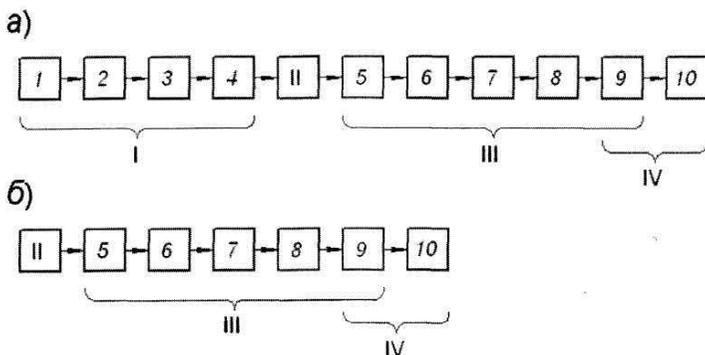


Рис. 5.1. Структурные схемы оптических систем активных (а) и пассивных (б) ОЭП:

I – передающая система; II – объект исследования; III – приемная система; IV – электрическая система;

1 – источник излучения, 2 – модулятор, 3 – фильтр, 4 – оптическая система осветителя, 5 – объектив, 6 – компенсатор, 7 – оптический анализатор, 8 – конденсор, 9 – приемник излучения, 10 – усилитель сигнала

Основными задачами, решаемыми оптическими системами ОЭП, являются:

- 1) обзор части пространства, в которой находится объект поиска, ориентир или объект наблюдения;
- 2) анализ оптического изображения объекта в определенном масштабе с целью последующей его регистрации;
- 3) обеспечение требуемой освещенности на поверхности приемника излучения;
- 4) концентрация потока излучения искусственных источников;
- 5) определение угловых координат объектов и дальности до них.

Оценку свойств, качества и эффективности действия оптических систем (ОС) приборов проводят с помощью ряда характеристик, которые можно разделить на следующие группы:

- технико-экономические и эксплуатационные;
- габаритные;
- энергетические;
- абберационные;
- пространственно-частотные.

Габаритные характеристики ОС.

Основными характеристиками этой группы являются: фокусное расстояние f' , поле зрения 2ω , относительное отверстие q_0 , или диаметр входного зрачка $D_{\text{вх. зр.}}$, и разрешающая способность V .

Исходя из рис. 5.2, линейное увеличение определяется по формуле:

$$\beta = \frac{l'}{l} = \frac{f}{x} = \frac{f'}{x'}, \quad (5.1)$$

а угловое увеличение равно

$$\Gamma = \frac{\text{tg } u'}{\text{tg } u}, \quad (5.2)$$

где

$$\text{tg } u' = \left(\frac{f}{l'} \right)^{-1} = \frac{l}{f'};$$

$$\operatorname{tgu} = \frac{l'}{f}$$

Подставив последние два выражения в формулу (5.2), получим

$$\Gamma = \frac{l}{l'} \cdot \frac{f}{f'} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{f}{f'}, \quad (5.3)$$

$$\Gamma \cdot \beta = \frac{f}{f'}. \quad (5.3')$$

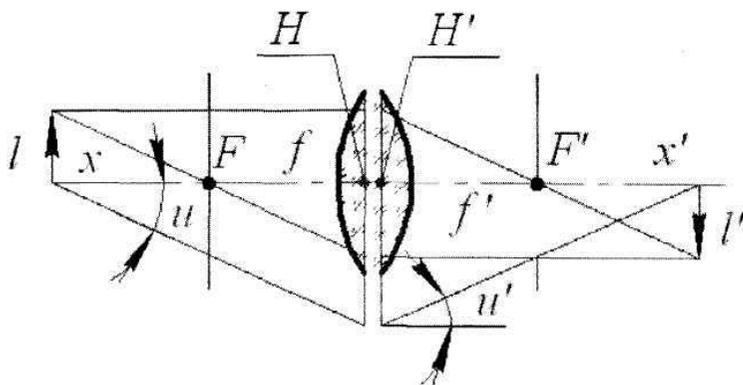


Рис. 5.2. Схема построения изображения в эквивалентной схеме ОС

Оптическая сила определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{1}{f'}, \quad (5.4)$$

а телесный угол поля зрения 2ω выражается через фокусное расстояние и диаметр полевой диафрагмы D_{Π} следующим образом:

$$2\omega = (\pi D_{\Pi}^2 / 4) / (f')^2. \quad (5.5)$$

Следует отметить, что относительное отверстие

$$q_0 = D_{\text{вх. сп.}} / f'$$

определяет освещенность в изображении объекта, т.е. оказывает влияние на энергетические характеристики ОС.

5.2. Энергетические характеристики ОС

Рассмотрим методику расчета энергетических характеристик ОС, основными из которых являются: освещенность в изображении объекта $E_{\text{из}}$, светосила H , коэффициент пропускания τ_0 и матрица пропускания τ_{ij} . Для этого определим поток оптического излучения от объекта на входе ОС:

$$\Phi_{\text{ц}} = I_{\text{ц}} \omega_{\text{ц}} = L_{\text{ц}} S_{\text{ц}} \omega_{\text{ц}}, \quad (5.6)$$

где $L_{\text{ц}}$ – энергетическая яркость цели с площадью S в направлении ОЭП, подробно методы расчета которой нами рассматривались выше.

Величина потока $\Phi_{\text{из}}$, создающего изображение объекта, будет

$$\Phi_{\text{из}} = \tau_0 \Phi_{\text{ц}} = \tau_0 L_{\text{ц}} S \omega. \quad (5.7)$$

Из геометрических соображений, и согласно рис. 5.3, имеем:

$$\omega = \frac{A_{\text{вх. зр.}}}{d^2} = \frac{\pi D_{\text{вх. зр.}}^2}{4d^2}. \quad (5.8)$$

Тогда, используя (5.7) и (5.8), имеем:

$$\Phi_{\text{из.}} = \tau_0 L_{\text{ч}} S \frac{\pi D_{\text{вх. зр.}}^2}{4d^2}. \quad (5.9)$$

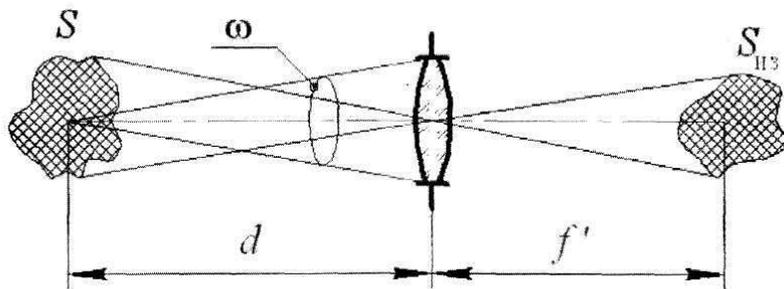


Рис. 5.3. К методике расчета энергетических характеристик ОС

Согласно рис. 5.3,

$$S = \frac{S_{\text{из.}} d^2}{f'^2},$$

то для освещенности изображения $E_{\text{из}}$ имеем:

$$E_{us} = \frac{\Phi_{us}}{S_{us}} = \frac{\pi L_{\psi}}{4} \tau_0 \left(\frac{D_{\text{ex.зр.}}}{f'} \right)^2 \quad (5.10)$$

или

$$E_{us} = \tau_0 \frac{\pi L_{\psi}}{4} q_0^2. \quad (5.11)$$

В поляризованном свете (рис. 5.4) освещенность в изображении объекта E_i^{us} определяется по формуле:

$$E_i^{us} = \frac{\pi}{4} q_0^2 \sum_{j=1}^4 \tau_{ij}^0 L_j^0, \quad (5.12)$$

где τ_{ij}^0 – матрица пропускания оптической системы;
 L_j^0 – вектор-параметр Стокса излучения на входном зрачке оптической системы.

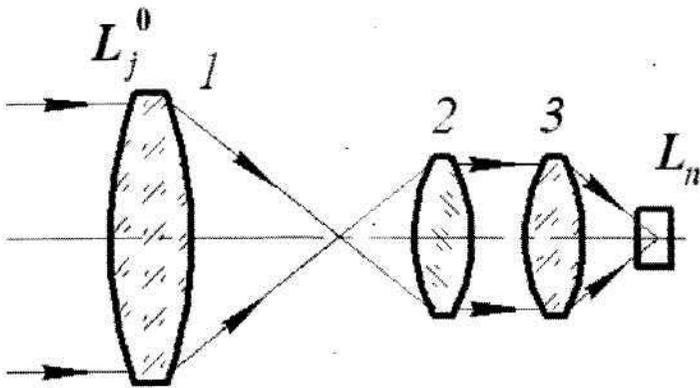


Рис. 5.4. К методике расчета освещенности в изображении объекта в поляризованном свете

Следует заметить, что коэффициент пропускания оптической системы τ_0 определяется по формуле:

$$\tau_0 = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) \pi_0(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) d\lambda}, \quad (5.13)$$

где $\Phi_0(\lambda)$ – спектральная плотность потока оптического излучения на входном зрачке ОС.

Рассмотрим методику определения матрицы пропускания ОС, состоящей, например, из трех линз.

Допустим, что вектор-параметр Стокса для яркости входящего в ОС излучения есть L_j^0 , а матрицы пропускания оптических элементов 1, 2, 3 обозначим через $\tau_{ij}^{(1)}$, $\tau_{ik}^{(2)}$ и $\tau_{kn}^{(3)}$.

Тогда процесс прохождения поляризованного излучения через элементы 1-3 можно записать в виде:

$$L_n = \sum_{k=1}^4 \tau_{nk}^{(3)} \sum_{i=1}^4 \tau_{ik}^{(2)} \sum_{j=1}^4 \tau_{ij}^{(1)} L_j^0, \quad (5.14)$$

где L_n – компоненты вектора параметра Стокса яркости излучения на выходе ОС.

Выражение (5.14) показывает, что операция умножения проходит справа налево в той последовательности, которая соответствует ходу лучей в ОС.

В тех случаях, когда необходимо определить коэффициент $\tau_0(\lambda)$ большого числа преломляющих и отражающих элементов, то он определяется по формуле:

$$\tau_0(\lambda) = (1 - \rho_{n\lambda})^m \cdot \rho_{\lambda}^n \cdot \tau_l(\lambda), \quad (5.15)$$

где $\rho_{n\lambda}$ – спектральный коэффициент отражения преломляющих поверхностей;

m – число преломляющих поверхностей;

ρ_{λ} – спектральный коэффициент отражения зеркальных отражающих поверхностей,

n – число зеркально отражающих поверхностей;

$\tau_l(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания, учитывающий только поглощение внутри оптического материала толщиной l по закону Бугера – Ламберта – Бера.

5.3. Пространственно-частотные характеристики (ПЧ) ОС

ПЧ характеризует реакцию ОС на входное воздействие.

Рассмотрим случай, когда в поле зрения прибора имеется светящийся объект, распределение яркости по поверхности которого описывается функцией $L(x, y)$. Освещенность изображения точки, имеющей координаты (x, y) , в идеальной оптической системе, т.е. системе без аберраций и дифракционного рассеяния, равна определенному значению. Тогда в других точках плоскости изображения она равна нулю.

В реальной оптической системе дифракционное рассеяние и аберрации вызывают размытие светящейся точки по пятну рассеяния, в результате чего освещенность в некоторой точке (x', y') плоскости изображения оказывается отличной от нуля. Степень размытия изображения характеризуется функцией рассеивания $H(x', y')$, которая представляет собой закон изменения освещенности в точке (x', y') , когда из точки (x, y) направляем поток, равный единице.

Так как весь размытый поток должен быть равен исходному падающему потоку, то

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x' - x, y' - y) dx' dy' = 1. \quad (5.16)$$

Рассмотрим распределение освещенности в изображении, когда имеется совокупность светящихся точек, составляющих объект наблюдения.

В этом случае из элементарной площадки $d_x \cdot d_y$ вокруг точки (x, y) падает поток излучения $kL(x, y)dx dy$; в точке же (x', y') этот поток создает освещенность

$$dE(x', y') = kL(x, y) H(x' - x_1, y' - y_1) dx dy, \quad (5.17)$$

где $k = \pi \tau_0 \sin^2 \gamma$.

Полная освещенность в точке (x', y') равна сумме возникающих из-за рассеяния потоков, исходящих из всех элементов $dx \cdot dy$.

$$E(x', y') = k \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L(x, y) H(x' - x, y' - y) dx dy. \quad (5.18)$$

Получаемый интеграл является интегралом свертки двух функций и показывает распределение освещенности $E(x', y')$ изображения при заданном изменении яркости $L(x, y)$ объекта в совокупности с функцией рассеяния каждой точки изображения.

Преобразование Фурье функции $E(x', y')$ позволяет получить

пространственно-частотный спектр $\tilde{E}(v_1, v_2)$ распределения освещенности изображения:

$$\tilde{E}(v_1, v_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x', y') e^{-2\pi j(x'v_1 + y'v_2)} dx' dy', \quad (5.19)$$

где $v_1 = 1/a$; $v_2 = 1/b$; где a и b – периоды первых гармоник по соответствующим осям X и Y .

Заменив переменные $X = x' - x$ и $Y = y' - y$ и преобразовав (5.19), получим:

$$\begin{aligned} \tilde{E}(v_1, v_2) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x', y') e^{-2\pi j(x'v_1 + y'v_2)} dx dy \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(X, Y) e^{-2\pi j(Xv_1 + Yv_2)} dX dY. \end{aligned} \quad (5.20)$$

Выражение (5.20) показывает, что энергетический пространственно-частотный спектр распределения освещенности в плоскости изображения равен преобразованию Фурье функции распределения яркости объекта (функции рассеяния) оптической системы.

Сокращенно (5.20) можно представить в виде

$$\tilde{E}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = \tilde{L}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) \cdot \tilde{H}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2), \quad (5.21)$$

причем $\tilde{L}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$ называется ПЧС распределения яркости объекта, а $\tilde{H}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$ – комплексной пространственно-частотной передаточной функцией оптической системы.

Из (5.21) следует, что оптическая передаточная функция ОС может быть получена, как отношение частотных спектров освещенности изображения и яркости объекта:

$$\tilde{H}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = \frac{\tilde{E}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)}{\tilde{L}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)}. \quad (5.22)$$

Функция $\tilde{H}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$ является комплексной. Ее модуль $|\tilde{H}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)|$ называется модуляционной передаточной функцией оптической системы.

Иногда в литературе эту величину называют амплитудно-пространственно-частотной характеристикой (АПЧХ) или контрастно-частотной характеристикой (КЧХ).

5.4. Пространственно-частотные характеристики (ПЧХ) объектов наблюдения

1. ПЧХ точечного источника.

Математической моделью точечного источника излучения является двумерная дельта-функция, т.е.

$$L(x, y) = I\delta(x - x_0, y - y_0), \quad (5.23)$$

где I – сила света источника в данном направлении.

Спектр точечного источника определяем по следующей формуле:

$$\tilde{L}(v_1, v_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L(x, y) e^{-2\pi j(xv_1 + yv_2)} dx dy. \quad (5.24)$$

Если (5.23) подставить в (5.24), то имеем с учетом фильтрующего свойства дельта-функции:

$$\tilde{L}(v_1, v_2) = I e^{-2\pi j(x_0 v_1 + y_0 v_2)}$$

здесь $\tilde{L}(v_1, v_2)$ – пространственно-частотный спектр яркости объекта, а амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

представляется модулем $|\tilde{L}(v_1, v_2)| = I$, т. е. является const на всех частотах, а фазово-частотная характеристика (ФЧХ) равна: $\psi(v_1, v_2) = 2\pi(v_1 x_0 + v_2 y_0)$.

2. ПЧХ объекта прямоугольной формы, рис. 5.5.

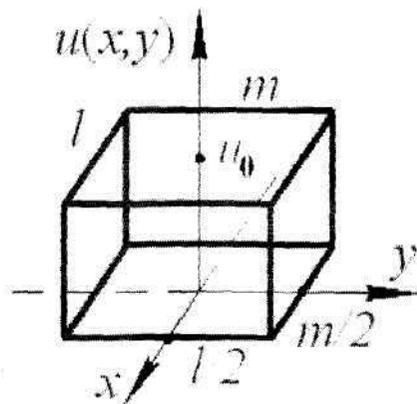


Рис. 5.5. К определению пространственно-частотного спектра объекта прямоугольной формы

Допустим, что $L_{xy} = L_0 = \text{const}$.

$$L(x, y) = \begin{cases} L_0 & |x| \leq \frac{l}{2}, |y| \leq \frac{m}{2}, \\ 0 & |x| > \frac{l}{2}, |y| > \frac{m}{2}. \end{cases} \quad (5.25)$$

Пространственно-частотный спектр равен:

$$\begin{aligned}
 \tilde{L}(v_1, v_2) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L(x, y) e^{-2\pi j(xv_1 + yv_2)} dx dy = \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L(x, y) e^{-2\pi jv_1 x} e^{-2\pi jv_2 y} dx dy = \\
 &= L \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} e^{-2\pi jv_1 x} dx \int_{-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} e^{-2\pi jv_2 y} dy.
 \end{aligned} \tag{5.26}$$

Интегралы в (5.26) равны:

$$\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} e^{-2\pi jv_1 x} dx = -\frac{1}{j2\pi v_1} \left(e^{-2\pi jv_1 \frac{l}{2}} - e^{+2\pi jv_1 \frac{l}{2}} \right) = l \frac{\sin\left(2\pi v_1 \frac{l}{2}\right)}{2\pi v_1 \frac{l}{2}};$$

$$\int_{-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} e^{-2\pi jv_2 y} dy = m \frac{\sin\left(2\pi v_2 \frac{m}{2}\right)}{2\pi v_2 \frac{m}{2}}.$$

Тогда имеем:

$$\tilde{L}(v_1, v_2) = L_0 \cdot l \cdot m \left[\frac{\sin\left(2\pi v_1 \frac{l}{2}\right)}{2\pi v_1 \frac{l}{2}} \right] \cdot \left[\frac{\sin\left(2\pi v_2 \frac{m}{2}\right)}{2\pi v_2 \frac{m}{2}} \right]. \quad (5.27)$$

С учетом функции Sin с модуль ПЧС запишется в виде:

$$|\tilde{L}(v_1, v_2)| = L_0 \cdot l \cdot m \cdot \left| \operatorname{sinc}\left(2\pi v_1 \frac{l}{2}\right) \operatorname{sinc}\left(2\pi v_2 \frac{m}{2}\right) \right|. \quad (5.28)$$

Для получения нормированного вида модуля ПЧС объекта, выражение (5.28) необходимо разделить на L_0 (рис. 5.6)

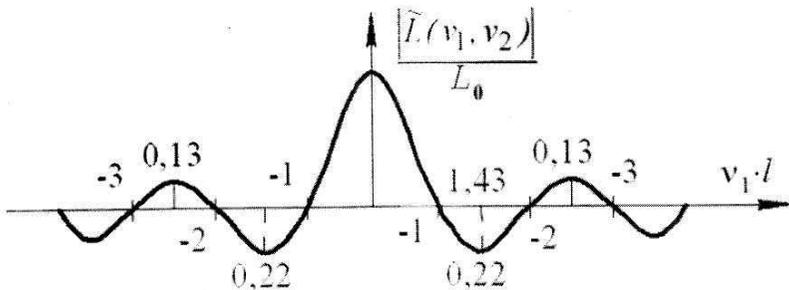


Рис. 5.6. Нормированный вид модуля ПЧС объекта прямоугольной формы по координате v_1

3. ПЧХ круглого объекта равномерной яркости.

Согласно рис. 5.7, яркость объекта зависит от цилиндрических координат ρ и ϕ следующим образом:

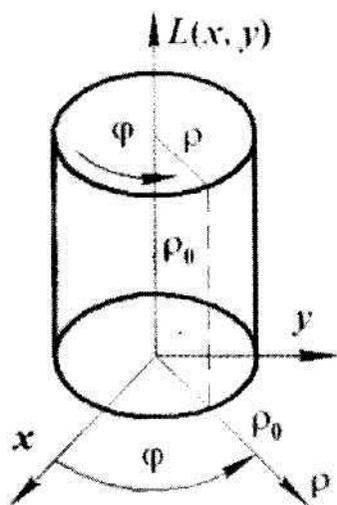


Рис. 5.7. Геометрия объекта с равномерной яркостью L_0

$$L(\rho, \varphi) = L(\rho), \quad (5.29)$$

где

$$L(\rho) = \begin{cases} L_0 & \rho \leq \rho_0; \\ 0 & \rho > \rho_0. \end{cases}$$

На основании прямого преобразования Фурье имеем:

$$\begin{aligned} \tilde{L}(v) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L(\rho, \varphi) \cdot e^{-j2\pi\rho \cos(\varphi)} \rho d\rho d\varphi = \\ &= 2\pi \int_0^{\infty} L(\rho) \rho d\rho \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-j2\pi\rho v \cos(\varphi)} d\varphi, \end{aligned} \quad (5.30)$$

обозначим интеграл

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-j2\pi\nu\rho \cos\varphi} d\varphi = I_0(2\pi\nu\rho),$$

где I_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

Тогда для соотношения (5.30) получим:

$$\tilde{L}(\nu) = 2\pi \int_0^{\infty} L(\rho) I_0(2\pi\nu\rho) \rho d\rho, \quad (5.31)$$

или с учетом (5.29)

$$\tilde{L}(\nu) = 2\pi L_0 \int_0^{\rho_0} I_0(2\pi\nu\rho) \rho d\rho. \quad (5.32)$$

Для вычисления интеграла в (5.32) воспользуемся формулой приведения бesselевых функций:

$$\frac{d[z^k \cdot I_k(z)]}{dz} = z^k I_{k-1}(z),$$

в нашем случае $k = 1$, поэтому

$$z I_0(z) = \frac{d[z \cdot I_1(z)]}{dz}. \quad (5.33)$$

Введем обозначение: $z = 2\pi\nu\rho$.

Тогда

$$\begin{aligned}\tilde{L}(\nu) &= 2\pi L_0 \int_0^{\rho_0} I_0(2\pi\nu\rho) \rho d\rho = 2\pi L_0 \cdot \left(\frac{1}{2\pi\nu}\right)^2 \int_0^{z_0} I_0(z) z dz = \\ &= \frac{L_0}{2\pi\nu^2} \int_0^{z_0} d[I_1(z) \cdot z] = \frac{L_0 z_0}{2\pi\nu^2} I_1(z_0); \end{aligned}$$

так как $z_0 = 2\pi\nu\rho_0$, то имеем:

$$\tilde{L}(\nu) = L_0 \pi \rho_0^2 \frac{2I_1(z_0)}{z_0},$$

откуда получаем, что ПЧ данного объекта равна

$$|\tilde{L}(\nu)| = L_0 \left(\pi \rho_0^2 \right) \left(\frac{2I_1(z_0)}{z_0} \right). \quad (5.34)$$

5.5. Спектры собственного излучения сложных тел и использование их для распознавания формы

Рассмотрим объект сложной формы, излучающий по законам теплового излучения (рис. 5.8).

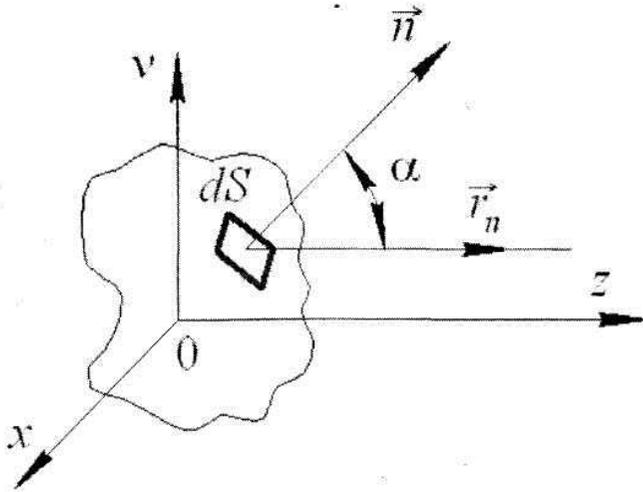


Рис. 5.8. К вопросу о свойствах собственного излучения сложных тел

Тогда распределение яркости теплового излучения по поверхности объекта представится в виде:

$$L(x, y) = \varepsilon(\alpha) \cdot L^0(T) \cos \alpha,$$

где, согласно рис. 5.8, α – угол между нормалью \vec{n}

к элементу dS поверхности объекта и направлением на наблюдателя, которое характеризуется вектором \vec{r}_n ;

$$\cos \alpha = \frac{(\vec{n} \cdot \vec{r}_n)}{|\vec{n} \cdot \vec{r}_n|}.$$

С использованием прямого преобразования Фурье, пространственно-частотный спектр получается в виде:

$$\begin{aligned}
 L(v_1, v_2) &= \int \int_{(x, y)} \varepsilon(\alpha) \cdot L^0(T) \cos \alpha \cdot e^{-j2\pi(v_1x+v_2y)} dx dy = \\
 &= L^0(T) \int \int_{(x, y)} \varepsilon(\alpha(x, y)) \cdot L^0(T) \cos \alpha(x, y) \cdot e^{-j2\pi(v_1x+v_2y)} dx dy.
 \end{aligned}
 \tag{5.35}$$

Если поверхность объекта описывается уравнением:

$$\begin{aligned}
 f(x, y, z) &= a_1x^2 + a_2y^2 + a_3y + a_4xy + \\
 &+ a_5xz + a_6yz + a_7x + a_8y + a_9z + a_{10} = 0,
 \end{aligned}
 \tag{5.36}$$

где a_i ($i = 1, 2, 3 \dots 9, 10$) – коэффициенты, характеризующие форму объекта, то локальную нормаль \vec{n} определим по формуле:

$$\vec{n} = \vec{\nabla}f = \frac{df}{dx} \vec{i} + \frac{df}{dy} \vec{j} + \frac{df}{dz} \vec{k}.
 \tag{5.37}$$

В свою очередь, вектор наблюдателя \vec{r}_n в сферической системе координат представляется в виде:

$$\vec{r}_n = \sin \Theta \cdot \cos \Phi \vec{i} + \sin \Theta \cdot \sin \Phi \vec{j} + \cos \Theta \vec{k},
 \tag{5.38}$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные орты координатных осей ox, oy, oz .

6. Приемники оптического излучения как внутренний элемент оптико-электронных систем

В зависимости от характера физических процессов, протекающих в приемниках при преобразовании энергии излучения, они делятся на следующие основные группы: фотоэлектрические, тепловые, оптико-акустические, фотохимические и т. д.

В оптико-электронных системах наиболее широкое применение находят фотоэлектрические и тепловые приемники.

Фотоэлектрическое действие излучения может проявляться различным образом. Если под действием поглощающего потока излучения из вещества в вакуум эмитируются электроны, то имеет место *внешний фотоэффект*.

Внутреннее возбуждение кристаллической решетки полупроводникового материала под действием поглощающего излучения, обуславливающего перевод электронов из связанных состояний в свободное без выхода наружу, носит название внутреннего фотоэффекта. Появление свободных зарядов, способных перемещаться в твердом теле, приводит к изменению электропроводности материала чувствительного слоя; фотоэлементы, основанные на фотопроводимости, т. е. на изменении электропроводности под действием падающего оптического излучения называются **фотоспротивлением**. Явление внутреннего фотоэффекта возникает в системах, состоящих из двух различных контактирующих веществ (металл – полупроводник, два полупроводника) и вызывает возникновение фото-ЭДС на границах системы при облучении приконтактной области. Это явление внутреннего фотоэффекта известно как **вентильный фотоэффект**. Фотоэлементы, основанные на данном фотоэффекте называются **вентильными фотоэлементами** или **фотоэлементами с запирающим слоем**. Фототок в цепи вентильных фотоэлементов возникает при отсутствии внешнего питающего напряжения.

Если в качестве ионизирующих веществ применяются полупроводники с различным типом проводимости, то, наряду с возникновением разности потенциалов между слоями с р- и n-проводимостью,

образуется разность потенциалов вдоль р-п-перехода. Эту фото-ЭДС называют продольной или боковой. Фотоэлементы, основанные на использовании продольной фото-ЭДС, называются фотоэлементами с **продольным** или **боковым фотоэффектом**.

Продольный фотоэффект проявляется только при неравномерном освещении чувствительного слоя. Вентильные фотоэлементы на основе электронно-дырочных переходов, работающие с приложенным внешним напряжением, называют фотодиодами.

Кроме того, приемниками могут быть и системы, похожие на фотодиоды, но обладающие внутренним усилением фототока, их называют фототриоды или фототранзисторы.

Тепловые приемники реагируют на повышение температуры чувствительного слоя. В этой группе приемников энергия квантов падающего излучения распределяется равномерно между частицами вещества фотослоя. Поэтому они, как правило, обладают неселективной чувствительностью, т.е. одинаково реагируют на излучение всех длин волн. Нагрев чувствительного слоя обнаруживается по возникновению термо-ЭДС в **термоэлементах** и по изменению сопротивления в болометрах и термисторах, которые входят в группу тепловых приемников.

Параметрами приемников оптического излучения обычно называют величины, характеризующие свойства приемника при работе его в определенных условиях и служащие критериями оценки его качества. При проектировании ОЭС выбор приемника в качестве его узла осуществляется по параметрам и характеристикам приемника. Рассмотрим основные параметры приемников, с которыми приходится иметь дело разработчику ОЭС, в том числе, оптику-конструктору и оптику-технологу.

Чувствительность на данной длине волны – это отношение излучения измеренной электрической величины, вызванное падением на приемник излучения, к изменению количественной характеристики этого излучения:

$$S_{\lambda} = \frac{du_{\lambda}}{d\Phi_{\lambda}}.$$

Интегральная чувствительность S – это мера реакции приемника на сложный по спектру поток излучения:

$$S = \frac{u}{\Phi}, \quad (6.1)$$

где u – реакция приемника на сложный поток излучения Φ .

Если воспользоваться понятием спектральной чувствительности S_{λ} приемника, которая, вообще говоря, является характеристикой приемника, то вывод выражения для интегральной чувствительности S можно получить следующим образом.

Так как

$$S_{\lambda} = \frac{du_{\lambda}}{d\Phi_{\lambda}}, \quad (6.2)$$

то

$$du_{\lambda} = S_{\lambda} \cdot d\Phi_{\lambda}. \quad (6.3)$$

В свою очередь, приращение потока равно:

$$d\Phi_\lambda = f(\lambda)d\lambda, \quad (6.3')$$

где f_λ – спектральная плотность потока оптического излучения.

Тогда для (6.3) имеем:

$$du_\lambda = S_\lambda \cdot f(\lambda)d\lambda, \quad (6.4)$$

а для реакции u на сложное излучение:

$$u = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} du_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda)S_\lambda d\lambda. \quad (6.5)$$

Если $S_\lambda = S(\lambda)S_{\lambda m}$, то (6.5) имеет вид:

$$u = S_{\lambda m} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda)S(\lambda)d\lambda. \quad (6.6)$$

С другой стороны, учитывая (6.3), можно записать

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda. \quad (6.7)$$

Тогда, подставив (6.6) и (6.7) в (6.1), имеем:

$$S = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) S_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda} = S_{\lambda m} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) S_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda}. \quad (6.8)$$

Из (6.8) видно, что интегральная чувствительность S зависит от характера функции спектральной плотности потока $f(\lambda)$ излучателя. Следовательно, S зависит не только от свойств приемника, но и от характеристик излучения объекта. Поэтому, при исследовании чувствительности S обязательно указываются параметры излучателя, по которому определяется чувствительность. Приводимые в паспортах приемников значения S обычно измеряются по излучению эталонных источников:

- источник типа А – это АЧТ с $T = 2848 \text{ K}$;
- источник типа Б – АЧТ с $T = 2500 \text{ K}$;
- источник типа В – это АЧТ с $T = 2900 \text{ K}$.

В качестве эталонного источника при измерении паспортной чувствительности сопротивлений для ИК области используется еще АЧТ при $T = 373 \text{ K}$ или $T = 573 \text{ K}$.

В США параметры фотосопротивлений чаще всего измеряются по излучению АЧТ с $T = 500 \text{ K}$.

В последнее время так делается и в России. Это позволяет сравнивать чувствительности отечественных и зарубежных приемников излучения.

Коэффициент использования приемников излучения представляет собой отношение интегралов в соответствии с формулой (6.8), рис. 6.1.

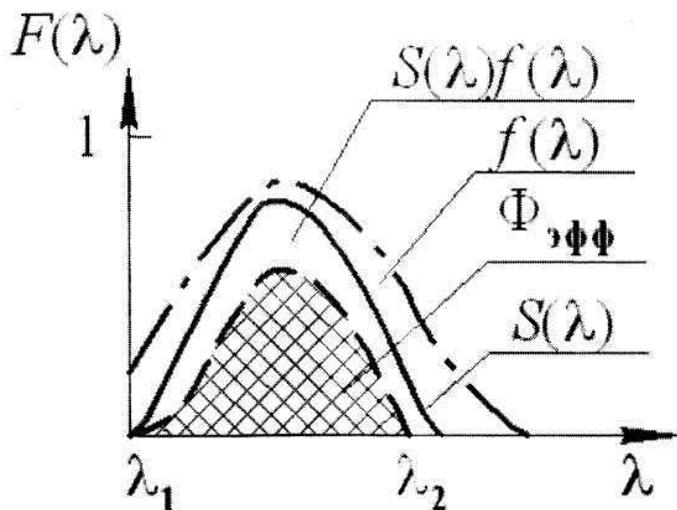


Рис. 6.1. К выводу выражения для коэффициента использования приемников

Этот коэффициент показывает, какую долю сложного потока излучения, падающего на приемник, составляет эффективный для этого приемника поток; тогда (6.9) можно записать в виде:

$$k = \frac{\Phi_{эфф}}{\Phi}. \quad (6.9')$$

Коэффициент использования, как правило, определяется графическим или численным интегрированием.

Рассмотрим расчет этого коэффициента для излучения АЧТ. Если в качестве источника излучения берется АЧТ, то спектральная плотность потока излучения АЧТ $f(\lambda)$ имеет вид:

$$f(\lambda) = r^0(\lambda, T) \cdot A = y\left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right) \cdot r^0(\lambda_{\max}, T) \cdot A, \quad (6.10)$$

где A – площадь фоточувствительного слоя;

$$y(\lambda) = \frac{r^0(\lambda, T)}{r^0(\lambda_{\max}, T)}. \quad (6.11)$$

Тогда

$$k = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} y\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\max}}\right) \cdot S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} y\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\max}}\right) d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r_0(\lambda, T) \cdot S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r_0(\lambda, T) d\lambda}. \quad (6.12)$$

Если эффективный поток нормировать не на поток в интервале $\lambda_1 - \lambda_2$, а на поток в бесконечно большом интервале, знаменатель в формуле (6.12) равняется:

$$\int_0^{\infty} r_0(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot T^4.$$

Теперь в (6.11) светимость $r_0(\lambda, T)$ примет следующий вид:

$$r_0(\lambda, T) = y\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\max}}\right) \cdot r_0(\lambda_{\max}, T).$$

Тогда коэффициент использования излучения будет следующим:

$$k = \frac{r_0(\lambda_{\max}, T) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} y\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\max}}\right) \cdot S(\lambda) d\lambda}{\sigma \cdot T^4}, \quad (6.13)$$

$$r_0(\lambda_{\max}, T) = 1,315 \left(\frac{T}{1000}\right)^5;$$

где

σ – постоянная Стефана – Больцмана;

$$\lambda_{\max} = 2898/T \quad \text{– на основании закона Голицына – Вина.}$$

Подставляя в (6.13) числовые значения $r_0(\lambda_{\max}, T)$ и σ , получим:

$$k = 0,232 \frac{T}{1000} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} y\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\max}}\right) \cdot S(\lambda) d\lambda. \quad (6.14)$$

Заменяя интеграл в (6.14) суммой, можно получить:

$$k = 0,232 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot \Delta\lambda \cdot \sum_{i=1}^n y\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_{\max}}\right) \cdot S(\lambda_i). \quad (6.15)$$

Значение функции $y(\lambda/\lambda_{\max})$ приведено в учебниках (см., например, Ю.Г. Якушенков. Физические основы оптико-электронных приборов. – М.: Сов. радио, 1965. – С. 33).

Коэффициент использования и интегральная чувствительность S могут определить S_λ , т.е. спектральную чувствительность в абсолютных единицах.

Действительно, согласно (6.8) и (6.9) имеем:

$$S = S_{\lambda_{\max}} \cdot k \quad \text{ИЛИ} \quad S_{\lambda_{\max}} = S/k. \quad (6.15')$$

Спектральная чувствительность S_λ может быть представлена как:

$$S_\lambda = S_{\lambda_{\max}} \cdot S(\lambda). \quad (6.16)$$

Учитывая по формуле (6.15) значение $S_{\lambda_{\max}}$, формула (6.16) тогда примет вид:

$$S_{\lambda} = \left(\frac{S}{k} \right) \cdot S(\lambda). \quad (6.17)$$

Пороговым потоком $\Phi_{\text{п}}$ называется минимальный поток излучения, который вызывает на выходе приемника сигнал, эквивалентный уровню собственных шумов.

Если
$$S = I_{\text{п}} / \Phi_{\text{п}}$$

, то заменяя $I_{\text{п}}$ через среднеквадратичное значение шумов, применительно к $\Phi_{\text{п}}$ получаем:

$$\Phi_{\text{п}} = \sqrt{u^2} / S. \quad (6.18)$$

Иногда принимают, что пороговый поток $\Phi_{\text{п}}$ имеет вид:

$$\Phi_{\text{п}} = \rho \frac{\sqrt{u^2}}{S}, \quad (6.19)$$

где ρ – коэффициент пропорциональности > 1 .

Ниже мы будем рассматривать структуру шумов приемника, пока же следует указать, что среднеквадратичное значение шумов зависит от размеров площадки A и полосы пропускания Δf электрической схемы включения приемника; таким образом пороговый поток есть функция A и Δf .

$$\Phi_n = c \left(\sqrt{A \cdot \Delta f} \right). \quad (6.20)$$

Поэтому для более объективного сравнения различных типов ПЛЭ принято выражать пороговый поток для единичной полосы частот и единичной площади чувствительного слоя:

$$\Phi'_\Pi = \frac{\Phi_n}{\sqrt{A \cdot \Delta f}} = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{см}^{1/2} \Gamma_\Psi^{1/2}} \right]. \quad (6.21)$$

Этот пороговый поток называется приведенным к единичной полосе частот и единичной площади чувствительного слоя.

Иногда в расчетах удобно пользоваться величиной, обратной Φ'_Π , впервые введенной Р.К. Джонсом и названной способностью к обнаружению:

$$D^* = \frac{1}{\Phi'_\Pi} = \frac{c \sqrt{A \cdot \Delta f}}{\sqrt{i^2}} \left[\frac{\text{см}^{1/2} \Gamma_\Psi^{1/2}}{\text{Вт}} \right]. \quad (6.21')$$

В настоящее время её используют как в России, так и за рубежом.

Шумами приемника оптического излучения называют сигналы с переменной амплитудой и частотой, возникающие на его выходе при включении в схему.

1. Тепловой шум (шум Джонсона).

Свободные электроны в любом проводнике, в том числе и в приемнике лучистой энергии, находятся в состоянии хаотического теплового движения. В результате этого в любой момент времени число электронов, движущихся вдоль проводника в одном направлении, не равно числу электронов, движущихся в противоположном направлении. Поэтому на зажимах проводника возникает флуктуационная ЭДС, дисперсия которой в интервале частот $\Delta f = f_1 - f_2$ определяется формулой Найквиста:

$$\overline{u_T^2} = 4kT \int_{f_1}^{f_2} R(f) df, \quad (6.22)$$

где T – абсолютная температура чувствительности слоя;
 k – постоянная Больцмана, численно равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град.
 $R(f)$ – функция, описывающая зависимость сопротивления от f .

2. Дробовой шум.

Электрический ток, является потоком электронов, т.е. потоком дискретных частиц. Величина тока определяется числом этих частиц, которое флуктуирует во времени, что приводит к появлению дробового шума. Величина этой флуктуации определяется из статистических соображений и выражается формулой Шоттки.

$$\overline{i^2} = 2ei_0\Delta f, \quad (6.23)$$

и

$$\overline{u^2} = 2ei_0R_H^2\Delta f, \quad (6.24)$$

где e – заряд электрона;
 i_0 – среднее значение тока;
 Δf – полоса частот;
 R_H – сопротивление нагрузки.

3. Токовый шум ($1/f$ – шум).

Природа этого шума до сих пор недостаточно исследована. Предполагают, что составляющими его являются: генерационно-рекомбинационный, модуляционный и контактный шумы, так что это название в значительной степени условно.

Генерационно-рекомбинационный шум возникает из-за флуктуаций числа и времени жизни токоносителей, образованных при термовозбуждении. Простого и общего выражения для этого вида шумов не существует.

Модуляционный шум иногда называют также избыточным, что обычно выражается как:

$$\overline{u_M^2} = A_M \frac{i^2 \cdot R^2}{f} \Delta f. \quad (6.25)$$

Контактный шум обусловлен плохим качеством контактов, имеет следующее выражение:

$$\overline{u_K^2} = A_K \frac{i^2 \cdot R^2}{f} \Delta f, \quad (6.26)$$

где A_M и A_K – некоторые постоянные.

Поэтому, в общем виде выражение для токового шума можно записать:

$$\overline{u_i^2} = A_T \frac{i^2 \cdot R^2}{f} \Delta f, \quad (6.27)$$

где A_T – постоянная, которая зависит от типа приемника; например, для РБС $A_T = 10^{-11} \dots 10^{-12}$.

4. Радиационный шум.

Наряду с шумами, присущими самому приемнику, флуктуации сигналов на выходе ПЛЭ могут возникнуть из-за флуктуации излучения фона, падающего на приемник с площадью A , имеющего коэффициент излучения ϵ_T . Выяснено, что флуктуации мощности излучения вызывают радиационный шум, определяемый по следующей формуле:

$$\Delta \overline{\Phi_P^2} = 8kT_\phi^5 A \epsilon_T \sigma \Delta f, \quad (6.28)$$

где k – постоянная Больцмана;
 σ – постоянная Стефана – Больцмана;
 T_ϕ – температура фона.

5. Тепловые флуктуации.

Температура приемника определяется статистическим обменом энергии между телом приемника и окружающей средой. Эта температура будет всегда колебаться около некоторой средней величины T_n . Отсюда и появляется тепловой шум, который возникает, из-за того, что приемник сам является излучателем с температурой T_n .

Мощность излучения, вызывающая тепловые флуктуации приемников, имеет вид:

$$\Delta \bar{\Phi}_T^2 = 8kA\sigma\varepsilon_m T_n^5 \Delta f. \quad (6.29)$$

6. Шум мерцания (фликкер-эффект).

Шум мерцания обусловлен случайными изменениями эмиссии фотокатода.

Установлено, что шум мерцания зависит от типа материала и свойств чувствительного слоя. Выражение для шума мерцания имеет вид:

$$\Delta \bar{\Phi}_T^2 = 8kA\sigma\varepsilon_m T_n^5 \Delta f. \quad (6.30)$$

где B_m – постоянная величина, характеризующая природу фотокатода.

7. Пересчет параметров приемника оптического излучения

7.1. Методика пересчета чувствительности приемников оптического излучения

В реальных условиях объект, по которому работает ОЭС, имеет температуру, отличную от температуры АЧТ или другого источника, по которому калибруется приемник. Поэтому, в нашем случае, параметры приемника, такие как интегральная вольтовая и пороговая чувствительности, должны быть пересчитаны для новых условий. Рассмотрим это подробнее.

Пусть имеется приемник с чувствительностью S_{u1} к излучению со спектральной плотностью потока излучения $f_1(\lambda)$. Требуется определить его чувствительность S_{u2} к излучению, описываемому формулой $f_2(\lambda)$. Воспользуемся следующей зависимостью:

$$S_u = \frac{u}{\Phi} = S_{\lambda m} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda} S(\lambda) f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda} f(\lambda) d\lambda}, \quad (7.1)$$

где τ_{λ} – спектральный коэффициент пропускания среды, который в дальнейшем примем равным 1.

Для S_{u1} и S_{u2} можно записать:

$$S_{u1} = S_{\lambda m} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) f_1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_1(\lambda) d\lambda}, \quad (7.2)$$

$$S_{u2} = S_{\lambda m} \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} S(\lambda) f_2(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} f_2(\lambda) d\lambda}. \quad (7.3)$$

На основании (7.2) и (7.3) имеем:

$$S_{\lambda m} = S_{u1} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) f_1(\lambda) d\lambda} = S_{u2} \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} f_2(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} S(\lambda) f_2(\lambda) d\lambda}. \quad (7.3')$$

Откуда искомая величина S_{u2} определяется как

$$S_{u2} = S_{u1} \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} S(\lambda) f_2(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} f_2(\lambda) d\lambda} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) f_1(\lambda) d\lambda}. \quad (7.4)$$

В том случае, когда $\Delta\lambda$ стремится к бесконечности, (7.4) примет вид:

$$S_{u2} = S_{u1} \frac{K_2}{K_1}. \quad (7.5)$$

Очень часто в практике подобных расчетов приходится переходить от параметров, размерность которых выражается в световых единицах к параметрам с размерностью, выражаемой в энергетических единицах. Например, значение токовой чувствительности кремниевого фотодиода приводится в единицах $a \cdot \text{лм}^{-1}$, в то время как максимум его чувствительности приходится на ближнюю ИК область, где поток измеряется не в люменах, а в ваттах. Величина паспортной чувствительности S_I в $a/\text{лм}$ определяется по источнику – лампе с температурой $T_1 (T_1 = 2856 \text{ К})$ и спектром $f_1(\lambda)$ и может быть представлена для диапазона $\lambda_1 - \lambda_2$ как:

$$S_{I1} = \frac{I}{\Phi} = \frac{S_{\lambda m} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) f_1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_1(\lambda) d\lambda}. \quad (7.6)$$

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_1(\lambda) d\lambda$$

Если $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_1(\lambda) d\lambda$ есть энергетический поток, то эквивалентный световой поток будет равен:

$$\Phi = \int_{0,4}^{0,78} K_{\lambda} f_1(\lambda) d\lambda, \quad (7.7)$$

где $K_{\lambda} = \frac{f_c(\lambda)}{f_1(\lambda)}$ – спектральная световая эффективность.

Воспользуемся зависимостью:

$$V_{\lambda} = \frac{K_{\lambda}}{K_{\lambda m}}, \quad (7.8)$$

где $K_{\lambda m} = 683 \text{ лм/Вт}$.

Тогда

$$\Phi_C = 683 \int_{0,4}^{0,78} V_\lambda f_1(\lambda) d\lambda \quad (7.9)$$

Подставляя (7.9) в выражение $S_{I_1}^C = I / \Phi_C$, получим выражение для чувствительности в световых величинах:

$$S_{I_1}^C = \frac{S_{\lambda m} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) f_1(\lambda) d\lambda}{683 \cdot \int_{0,4}^{0,78} V_\lambda f_1(\lambda) d\lambda} \quad (a/\text{ЛМ}). \quad (7.10)$$

Рассуждая также как и при выводе формулы (7.4), можно получить значение чувствительности S_{I_2} , определяемой для излучателя со спектром $f_2(\lambda)$ в интервале $\lambda_3 - \lambda_4$:

$$S_{I_2} = S_{I_1} \frac{683 \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} S(\lambda) f_2(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} f_2(\lambda) d\lambda} \frac{\int_{0,4}^{0,78} V_\lambda f_1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) f_1(\lambda) d\lambda}. \quad (7.11)$$

7.2. Пересчет интегральных параметров в спектральные

Пусть требуется определить чувствительность приемника, откалиброванного по излучению известного спектрального состава $f(\lambda)$ для какой-либо длины волны λ в абсолютных единицах S_λ , если известна кривая относительной спектральной чувствительности $S(\lambda)$ и значение абсолютной чувствительности S_Σ , измеренное в диапазоне $\lambda_1 - \lambda_2$, включающим λ .

Для S_Σ имеем:

$$S_\Sigma = S_{\lambda m} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda}; \quad (7.12)$$

так как $S_\lambda = S(\lambda) \cdot S_{\lambda m}$, то после подстановки из (7.12) $S_{\lambda m}$, искомая величина S_λ определяется как:

$$S_\lambda = S(\lambda) \cdot S_\Sigma \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) f(\lambda) d\lambda}. \quad (7.13)$$

8. Характеристики приемников излучения

Зависимость, определяющая изменение функционального параметра приемника при изменении внешнего воздействия на него, называется характеристикой приемника оптического излучения.

1. Спектральная характеристика.

Из-за избирательности поглощения энергии излучения большинства приемников, их чувствительность к монохроматическому излучению меняется с изменением длины волны падающего потока. Эту чувствительность принято называть спектральной, а зависимость ее от длины волны называют спектральной характеристикой приемника.

2. Чувствительности по напряжению или потоку – параметры, характеризующие чувствительность приемника в применении к реальной схеме его включения.

3. Характеристики выражают зависимость тока или напряжения в цепи приемника интегральной или вольтовой чувствительности приемника от величины потока, падающего на его чувствительную площадку.

Конечное время протекания процессов преобразования потока оптического излучения приемниками вызывает необходимость учета их энергетических свойств. Считая приемник линейной системой, его инерционные свойства можно характеризовать импульсной чувствительностью или частотной характеристикой и постоянной времени.

4. Импульсная чувствительность $S_u(t)$ – это отношение импульсной реакции приемника $u(t)$ к величине энергии излучения W входного импульса:

$$S_u(t) = \frac{u(t)}{W}. \quad (8.1)$$

5. Частотная характеристика приемника.

При воздействии на приемник импульса мощностью $\Phi(t)$, величина энергии в нем определяется следующим образом:

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(t) dt. \quad (8.2)$$

Подставляя (8.2) в (8.1) получим:

$$S_u(t) = \frac{u(t)}{\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(t) dt}. \quad (8.3)$$

Если вся энергия поступает на приемник мгновенно, то может быть введена функция $\delta(t)$ – функция, связывающая мощность с энергией: $\Phi(t) = W \cdot \delta(t)$.

Тогда

$$S_u(t) = u(t)/W. \quad (8.3')$$

При импульсном поступлении потока излучения на приемник, его реакцию найдем с помощью интеграла свертки:

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_u(\tau) \Phi(t - \tau) d\tau, \quad (8.4)$$

где τ – период импульса.

При этом будем иметь в виду, что $S_u(\tau) \equiv 0$, когда $t \leq 0$.

Рассмотрим случай, когда падающий поток изменяется по синусоидальному закону.

Его можно представить в виде комплексной функции:

$$\Phi(t - \tau) = \Phi_0 e^{2\pi f_1(t - \tau)}, \quad (8.5)$$

где f_1 – частота модуляции потока.

Подставим (8.5) в (8.4):

$$\begin{aligned} u(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} S_u(\tau) \Phi_0 e^{2\pi f_1(t - \tau)} d\tau = \\ &= \Phi_0 e^{2\pi f_1 t} \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} S_u(\tau) \Phi_0 e^{-j2\pi f_1 \tau} d\tau}_{\tilde{S}(f_1)}, \end{aligned} \quad (8.6)$$

обозначим

$$\int_{-\infty}^{\infty} Su(\tau)\Phi_0 e^{-j2\pi f_1 \tau} d\tau = \tilde{S}(if_1). \quad (A)$$

Тогда

$$u(t) = \Phi_0 e^{-j2\pi f_1 t} \tilde{S}(if_1). \quad (8.7)$$

Выражение (8.7) показывает, что при синусоидальном изменении потока излучения сигнал на выходе приемника также изменяется по

синусоидальному закону, но, благодаря множителю $\tilde{S}(if_1)$,

, это изменение для данной частоты будет иметь соответствующую амплитуду и другую фазу.

Согласно (8.7) имеем:

$$\tilde{S}(if_1) = \frac{u(t)}{\Phi_0 e^{-j2\pi f_1 t}}, \quad (8.8)$$

т.е. $\tilde{S}(if_1)$ является интегральной чувствительностью приемника на данной частоте f_1 модуляции потока. Зависимость интегральной чувствительности S от частоты f представляет собой частотную характеристику приемника.

6. Спектр реакции приемника.

На основании частотной характеристики, с помощью преобразования Фурье можно получить зависимость импульсной чувствительности:

$$Su(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}(jf) e^{2\pi jft} df. \quad (8.9)$$

Пользуясь преобразованием Фурье, величину импульса потока можно получить в виде:

$$\Phi(t - \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\Phi}(jf) e^{2\pi j(t-\tau)} df; \quad (8.10)$$

подставим (8.10) в (8.4):

$$\begin{aligned} u(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} Su(\tau) d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\Phi}(jf) e^{2\pi j(t-\tau)} df = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\Phi}(jf) e^{2\pi jft} df \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} Su(\tau) e^{-2\pi j\tau} d\tau}_{\tilde{S}(jf)} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\Phi}(jf) \tilde{S}(jf) e^{2\pi jft} df. \end{aligned} \quad (8.11)$$

Поскольку реакция приемника как функция времени $u(t)$ связана с реакцией приемника в функции частоты $\tilde{u}(jf)$ преобразованием Фурье:

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}(jf) e^{2\pi jft} df, \quad (8.12)$$

то на основании (8.11) и (8.12) имеем:

$$\tilde{u}(jt) = \tilde{\Phi}(jt) \cdot \tilde{S}(jt). \quad (8.13)$$

Таким образом, спектр реакции на выходе приемника определяется частотным спектром сигнала на входе и частотной характеристикой приемника излучения.

9. Фотоэлектрические приемники оптического излучения (ПОИ)

9.1. Принципы действия фотоэлектрических ПОИ

В основе внешнего фотоэффекта лежит эмиссия фотоэлектронов под действием падающего излучения. Эмитируемые электроны под действием приложенного напряжения направляются от эмиттера к аноду, создавая во внешней цепи ток. Рассмотрим основные закономерности внешнего фотоэффекта.

1. Закон Столетова – Герца: фототок прямо пропорционален интенсивности возбуждающего его излучения.

2. Закон Эйнштейна: энергия фотоэлектрона не зависит от интенсивности излучения, а линейно зависит от частоты излучения:

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - e\varphi, \quad (9.1)$$

где $e\varphi$ – работа выхода вещества фотокатода;

m, e – масса и заряд электрона;

v – скорость электронов;

ν – частота падающего излучения;

h – постоянная Планка.

Согласно (9.1), можно получить значение длины волны

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{c}{\nu_{\text{эф}}},$$

при котором оптическое излучение уже не вызывает эмиссии фотоэлектронов с поверхности фотокатода:

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - e\varphi.$$

При $\nu = 0, h\nu = e\varphi$

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{c}{\nu_{\text{эф}}} = \frac{ch}{e\varphi}. \quad (9.2)$$

Из (9.2) видно, что с уменьшением $e\varphi$ увеличивается $\lambda_{\text{эф}}$, поэтому для работы в ИК области спектра необходимо в качестве материалов фотокатодов иметь вещества с малой работой выхода, как, например,

соединение щелочных металлов: цезия, натрия, калия и др. Рассмотрим, как формируется чувствительность фотоэлектрических приемников оптического излучения.

При некоторой постоянной облученности число эффективных фотоэлектронов в единицу времени определяется как:

$$n_{\Phi} = \frac{q_v \cdot \Phi_v}{h\nu}, \quad (9.3)$$

где q_v – квантовая эффективность (отношение числа квантов, вызвавших фотоэффект, к общему числу квантов, попавших на фотокатод);
 Φ_v – поток, облучающий фотокатод;
 $h\nu$ – энергия одного кванта.

Предположим, что все фотоэлектроны дойдут до анода фотоэлемента, тогда фототок i_v равен:

$$i_v = n_{\Phi} e = \frac{eq \cdot \Phi_v}{h\nu}. \quad (9.4)$$

Напряжение сигнала на нагрузке R_n определяется из следующей формулы:

$$u_v = iR_n = \frac{eq_v \cdot \Phi_v R_n}{h\nu}. \quad (9.5)$$

В общем случае, для сплошного по спектру излучения, выражение (9.5) будет иметь вид:

$$u = \int_{\nu_1}^{\nu_2} u_{\nu} d\nu = \frac{eR_h}{h} = \frac{eR_h}{h} \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{q_{\nu} \cdot \Phi_{\nu}}{\nu} d\nu. \quad (9.6)$$

Используя (9.6), интегральную чувствительность фотоэлемента на внешнем фотоэффекте получим в виде:

$$S_u = \frac{u}{\Phi} = \frac{eR_h}{h} \cdot \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \Phi_{\nu} q_{\nu} \left(\frac{1}{\nu} \right) d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \Phi_{\nu} d\nu}. \quad (9.7)$$

Как следует из (9.7), в значительной степени чувствительность S_u зависит от квантовой эффективности фотокатода.

9.2. Фотоэлементы и фотоэлектронные умножители

9.2.1. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом

К этим приемникам относятся газонаполненные фотоэлементы (ФЭ).

В качестве фотокатодов таких приемников наиболее часто используется:

- А) кислородно-серебряно-цезиевый фотокатод;
- Б) сурьмяно-цезиевый фотокатод;
- В) мультищелочные катоды (соединение натрия, калия, сурьмы и

цезия);

Г) фотокатод с «отрицательным электронным средством».

А. Спектральная характеристика таких фотокатодов имеет ярко выраженный максимум приблизительно на $\lambda = (0,5 \dots 0,7)$ мкм. В зависимости от технологии изготовления катода, этот максимум смещается до 0,9 мкм. Граничная длина волны обычно равна $\lambda_{гр} = 1,1 \dots 1,2$ мкм. Эти характеристики определяются для излучателя (источника типа А) – лампа накаливания с вольфрамовой нитью, имеющей цветовую температуру $T_c = 2854$ К.

Интегральная чувствительность S_I таких катодов лежит в пределах 20 – 60 мка/лм. Постоянная времени $\tau = 10^{-9}$ с.

Б. Сурьмяно-цезиевый фотокатод: $\lambda_m = 0,6$ мкм; в ИК области катод чувствителен до 0,9 мкм; $S_I = 40 \dots 60$ мка/лм.

В. Кривая спектральной чувствительности мультищелочных катодов схожа с аналогичной для сурьмяно-цезиевого фотокатода, но S_I у данного катода гораздо выше – 150 мка/лм, что объясняется большей чувствительностью в длинноволновой границе спектральной характеристики.

Рассмотрим характеристики ФЭ.

А. Фотокатоды ФЭ имеют неодинаковую чувствительность по всей поверхности.

Б. Характеристики воздушных и газонаполненных фотоэлементов существенно различны. Так, для вакуумных ФЭ, фототок насыщения наступает при 25 В для малых долей световых потоков (порядка десятых долей люмена); для световых потоков порядка 1 лм и более – насыщение наступает при ~ 100 В (рис. 9.1).

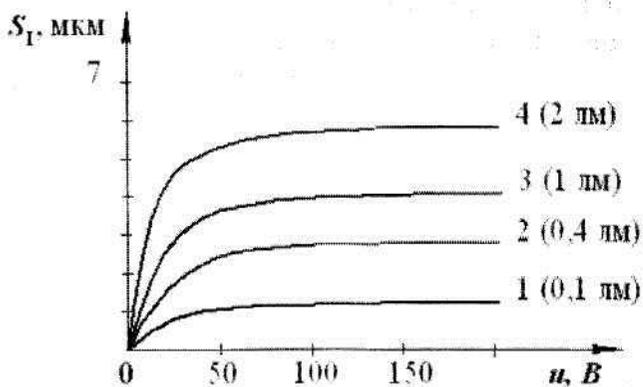


Рис. 9.1. Вольт-амперные характеристики фотоэлементов

Вольт-амперные характеристики газонаполненных ФЭ вообще не допускают насыщения (рис. 9.2).

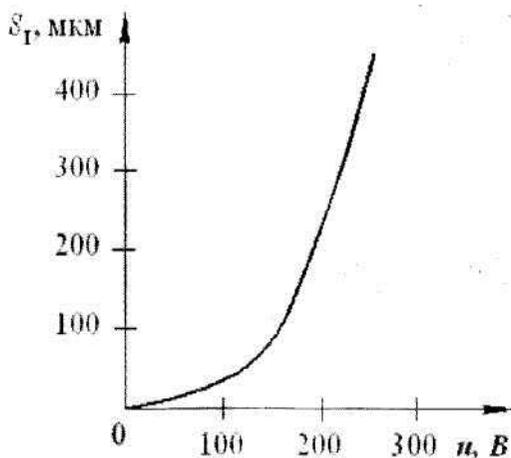


Рис. 9.2. Вольт-амперная характеристика газонаполненных фотоэлементов

В. Световые характеристики вакуумных ФЭ, снимаемые при токе насыщения, линейны в широком диапазоне падающих на них световых потоков (рис. 9.3).

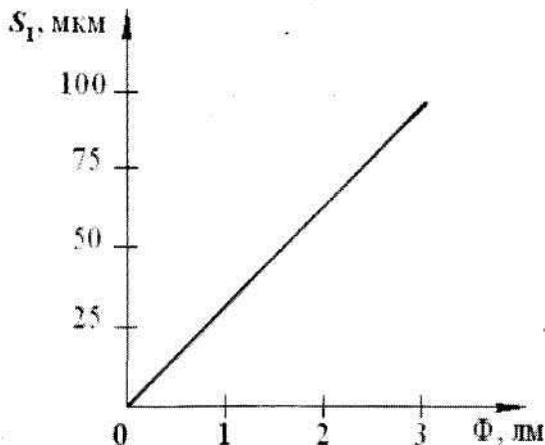


Рис. 9.3. Световые характеристики вакуумных фотоэлементов

9.2.2. Фотоэлектрические умножители (ФЭУ)

А. Работа ФЭУ основана на вторичной электронной эмиссии, суть которой состоит в эмиссии вторичных электронов из некоторых веществ при их бомбардировке первичными фотоэлектронами с соответствующей энергией.

ФЭУ состоит из вторичных эмиттеров-доноров D_1 , D_2 и электрода, собирающего вторичные электроны – анода А (рис. 9.4).

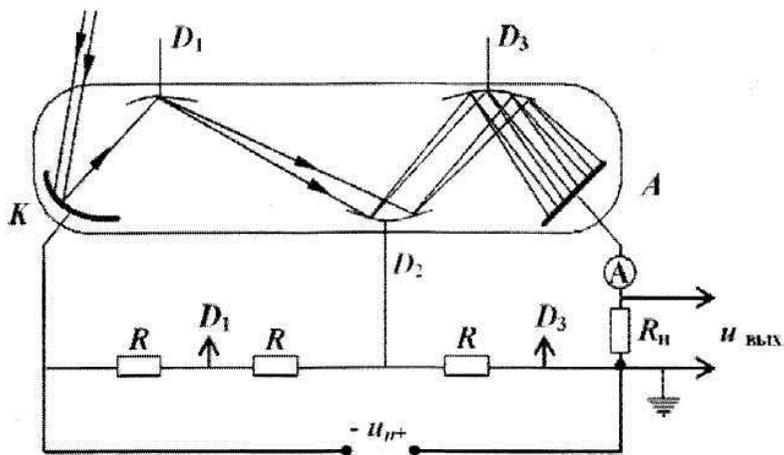


Рис. 9.4. Схема включения фотоэлектрического умножителя

Вся конструкция помещается в стеклянный баллон, в котором создан вакуум ($\sim 10^{-8} \dots 10^{-9}$ мм рт.ст.). Напряжение u_n , приложенное к ФЭУ, с помощью делителей напряжения R, R, R, \dots распределяется между электродами так, что каждый последующий динод, начиная с первого после катода, находится под более высоким положительным потенциалом, чем предыдущий. Поэтому, первичный электрон, вырванный светом из фотокатода, под действием ускоряющего поля направляется на первый динод и падает на него, обладая кинетической энергией для эмиссии вторичных электронов. Материал динода имеет коэффициент вторичной электронной эмиссии $\gamma > 1$, т.е. каждый первичный электрон выбивает из его поверхности более одного вторичного электрона. Следовательно, после 1-го динода число электронов, направленных ко второму диноду будет в γ раз больше числа электронов, вырванных излучением из фотокатода. Таким образом, общий коэффициент усиления первичного фототока в ФЭУ будет равен:

$$\mu = \gamma^n, \quad (9.8)$$

где n – число каскадов усиления.

В современных ФЭУ μ доходит до 10^{10} , а их интегральная чувствительность $100 \dots 1000$ а/лм, т. е. превосходит чувствительность вакуумных элементов в $10^6 - 10^7$ раз;

Б. Не останавливаясь на конструкциях и многочисленных возможностях в применении ФЭУ, следует отметить, что параметры современных ФЭУ позволяют применять их как для регистрации чрезвычайно малых световых потоков (10^{-16} лм) или ($\sim 10^{-18}$ Вт), так и в случае приема очень мощных излучений.

Необходимо еще отметить свойства линейности световых характеристик ФЭУ.

К недостаткам ФЭУ следует отнести необходимость очень большого стабилизированного напряжения ($\sim 600 \dots 1800$ В) для питания, возможность потери эмиссионной способности некоторых видов ФЭУ при освещении значительными световыми потоками, большие габариты и сложность включения.

Для ФЭУ следует также учитывать шум, обусловленный вторичной эмиссией, и шум в нагрузке. Это приводит к увеличению среднеквадратичного значения дробового шума, что учитывается вводом дополнительного множителя $(1 + V)$ и коэффициентом усиления ФЭУ $\mu = \gamma^n$ в формуле для дробового шума (см. раздел по шумам).

Рассмотрим это подробнее.

С учетом дробового тока первого эмиттера на выходе первого каскада имеем:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta i}^2 &= 2ei_1 \Delta f \quad \text{– дробовой шум фотокатода;} \\ \overline{\Delta i}_{g1}^2 &= \overline{\Delta i}^2 \cdot m_{1g}^2 + 2ei_1 \Delta f. \end{aligned} \quad (9.9)$$

Выражение (9.9) – дисперсия дробового тока фотокатода после динода (эмиттера), где

$m_{1э}$ – коэффициент усиления первого эмиттера;
 $2ei_1\Delta f$ – дробовой ток первого эмиттера;
 $i_1 = im_{1э}$ – ток первого эмиттера;
 i – ток фотокатода.

Раскрывая значения Δi^2 в (9.9), получаем:

$$\Delta \bar{i}_{\partial 1}^2 = 2ei\Delta f m_{1э}^2 + 2ei\Delta f m_{1э} = \bar{\Delta i}^2 m_{1э} (m_{1э} + 1). \quad (9.10)$$

Аналогично, на входе второго каскада дробовой ток будет следующим:

$$\Delta \bar{i}_{\partial 2}^2 = \bar{\Delta i}^2 m_{1э} m_{2э} (1 + m_{2э} + m_{1э} m_{2э}). \quad (9.11)$$

и на выходе n -го каскада:

$$\bar{\Delta i}_{n2}^2 = \bar{\Delta i}^2 m_{1э} \cdot m_{2э} \dots m_{nэ} (1 + m_{nэ} + \dots + m_{nэ} \cdot m_{(n-1)э} \dots m_{2э} \cdot m_{1э}). \quad (9.12)$$

Допустим, что $m_{1э} = m_{2э} = \dots = m_{nэ} = \gamma$ и $\gamma^n = \mu$, то (9.12) имеет вид:

$$\Delta \bar{i}_{\partial n}^2 = 2ei\Delta f \mu^2 \frac{\gamma^{n+1} - 1}{\gamma - 1}. \quad (9.13)$$

Поскольку $\gamma^{n+1} \gg 1$, то (9.13) можно представить в виде:

$$\Delta \bar{i}_{\partial n}^2 = 2ei\Delta f \mu^2 \frac{\gamma}{\gamma - 1}. \quad (9.14)$$

Введем обозначение: $\gamma/(\gamma-1) = 1+B$, тогда (9.14) будет выглядеть следующим образом:

$$\overline{\Delta i_{on}^2} = 2ei\Delta f\mu^2(1+B), \quad (9.15)$$

В ФЭУ с электростатической фокусировкой множитель $(1+B)$ принимаем равным 2,5. Учтем тепловой шум на нагрузочном сопротивлении R_n по формуле:

$$\overline{\Delta i_T^2} = 4kT\Delta fR_n^{-1}. \quad (9.16)$$

Тогда, учитывая (9.15) и (9.16), суммарный шум на входе усилителя будет иметь вид:

$$\overline{\Delta i_{ш}^2} = \overline{\Delta i_{on}^2} + \overline{\Delta i_T^2} = 2ei\Delta f\mu^2(1+B) + 4kT\Delta fR_n^{-1}. \quad (9.17)$$

Пороговый поток ФЭУ определяется из выражения:

$$\Phi_n = \frac{\sqrt{\overline{\Delta i_{ш}^2}}}{S_{ФЭУ}}, \quad (9.18)$$

где $S_{ФЭУ}$ – интегральная чувствительность ФЭУ.

Используя (9.17) и (9.18), имеем:

$$\Phi_n = \frac{\sqrt{2ei\Delta f\mu^2(1+B) + 4kT\Delta fR_n^{-1}}}{S_{ФЭУ}}. \quad (9.19)$$

9.2.3. ПОИ на внутреннем фотоэффekte

В основе механизма работы фотосопротивления и фоторезистора лежит изменение электропроводимости чувствительного слоя при его облучении. Основными параметрами и характеристиками этого типа приемников оптического излучения являются спектральная характеристика, интегральная чувствительность, постоянная времени, темновое сопротивление, энергетические, температурные и фоновые характеристики.

Типовая схема включения фоторезистора представлены на рис. 9.5.

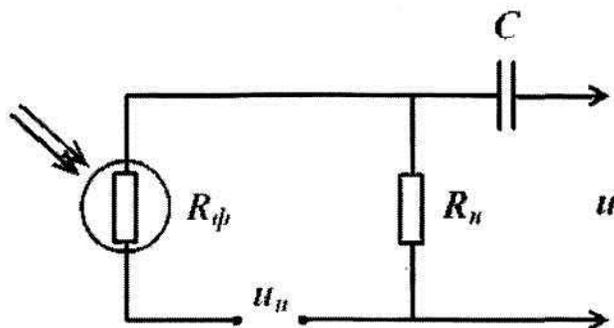


Рис. 9.5. Типовая схема включения фоторезистора

Величина наблюдаемого сигнала определяется изменением напряжения на нагрузочном сопротивлении R_n при изменении сопротивления фотослоя R_ϕ .

Если u_n – напряжение питания приемника, то при изменении R_ϕ на dR_ϕ , сигнал изменится на du . Разберем это подробнее:

а) $\Delta R_\phi \ll R_\phi$

$$I_\phi = \frac{u_n}{R_n + R_\phi}; \quad (9.20)$$

$$dI_{\phi} = -\frac{u_n dR_{\phi}}{(R_n + R_{\phi})^2}; \quad (9.21)$$

$$|dI_{\phi}| = \frac{u_n dR_{\phi}}{(R_n + R_{\phi})^2}; \quad (9.21')$$

$$du = |dI_{\phi}| \cdot R_n = \frac{u_n R_n}{(R_n + R_{\phi})^2} dR_{\phi}; \quad (9.22)$$

б) как известно из теоретической электротехники, для получения минимальной мощности в схеме из 2-х последовательных сопротивлений (R_n и R_{ϕ}) необходимо, чтобы $R_n = R_{\phi}$; тогда (9.22) примет вид:

$$du = \frac{u_n}{4} \cdot \frac{dR_{\phi}}{R_{\phi}}. \quad (9.23)$$

Интегральная и вольтовая чувствительность:

$$S_E = \frac{(dR_{\phi}/R_{\phi})}{d\Phi}; \quad (9.24)$$

$$S_u = \frac{du}{d\Phi} = \frac{u_n}{4} \cdot \left(\frac{dR_\phi}{R_\phi} \right) / d\Phi = \frac{u_n}{4} \cdot \frac{(dR_\phi/R_\phi)}{d\Phi} = \frac{u_n}{4} \cdot S_E. \quad (9.25)$$

Параметры и характеристики фоторезисторов. Наиболее широко применяются следующие фоторезисторы: сернисто-свинцовые (PbS), селеново-свинцовые (PbSe), теллуристо-свинцовые (PbTe), сурьмяно-индиевые (InSb) и фотосопротивления на базе германия или кремния (например, (Ge:Au)):

а) PbS – область спектральной чувствительности $\Delta\lambda = 0,6 \dots 3,0$ мкм – неохлажденный; $\lambda_{\max} = 2,1$ мкм, $\lambda_{\text{гр}} = 3$ мкм. При охлаждении: $\lambda_{\max} = 2,7$ мкм ($T \sim 77$ К)), $\lambda_{\text{гр}} = 4$ мкм.

Порог чувствительности $\sim 10^{-10} \dots 10^{-11}$ Вт·см⁻¹·Гц^{-1/2}. Вольтовая чувствительность зависит от параметров цепи включения и достигает при $u_n = 10 \dots 50$ В и $R_n = 10^4 \dots 10^5$ Ом величин ~ 1000 В/Вт;

б) PbSe – обладает большими шумами в неохлажденном состоянии. При охлаждении: $\lambda_{\max} = 2,3 \dots 3,4$ мкм, $\lambda_{\text{гр}} = 5,5$ мкм. Порог чувствительности достигает 10^{-10} Вт·см·Гц^{-1/2}, $\tau = 10^{-4}$ с; $R_m = 10^6 \dots 5 \cdot 10^6$ Ом;

в) PbTe – при $T = 77$ К, $\lambda_{\max} = 4,5$ мкм, $\lambda_{\text{гр}} = 6$ мкм, $\tau = 10^{-5}$ с. Пороговая чувствительность примерно та же, что и у PbSe;

г) InSb появился сравнительно недавно, но сразу привлек внимание разработчиков ОЭС, что объясняется его широким диапазоном спектральной чувствительности ($\Delta\lambda \sim 3 \dots 6$ мкм), $\lambda_{\max} = 5,5$ мкм, $\lambda_{\text{гр}} = 5,6 \dots 6,0$ мкм; $\Phi_n = 10^{-10}$ Вт·см⁻¹·Гц^{-1/2}, $R_m = 10^4$ Ом, $\tau = 10^{-6}$ с;

д) в реальных ОЭС, помимо получения оптического сигнала от объектов, на чувствительный слой попадает и излучение мерцающих фонов. Наличие последних вызывает уменьшение R_ϕ и в отсутствии полезных сигналов. Это необходимо учитывать при выборе R_n . Это осуществляется, если известна энергетическая характеристика приемника, т.е. зависимость $R_\phi = f(E)$. Типичная зависимость $f(E)$ представлена на рис. 9.6:

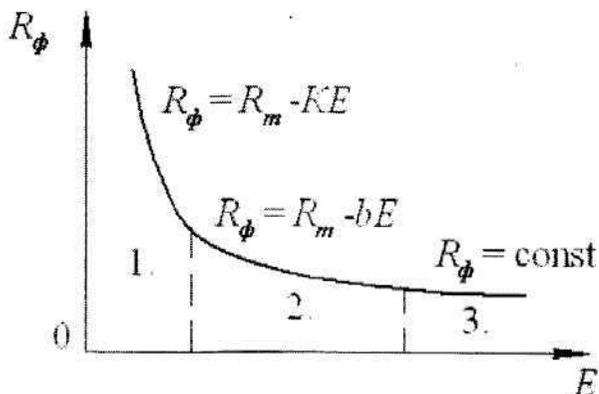


Рис. 9.6. Энергетическая характеристика фоторезисторов

В качестве аргумента взята освещенность слоя E немодулированным излучением фона.

На рис. 9.6 для небольших E справедлива линейная зависимость:

$$R_{\phi} = R_{\Gamma} - KE, \quad (9.26)$$

где K – крутизна характеристики.

Для несколько больших E , кривую можно аппроксимировать зависимостью:

$$R_{\phi} = R_{\Gamma} - bE,$$

где b – постоянный коэффициент, характерный для конкретных экземпляров фотосопротивлений.

10. Элементы общей теории оптической фильтрации

10.1. Классификация оптических фильтров

Носителями информации в оптико-электронных приборах служит оптическое излучение, идущее от исследуемого объекта. Основными параметрами этого полезного оптического излучения являются длина волны, поляризационные характеристики, интенсивность (амплитуда) и их пространственное распределение, которое характеризует форму и размеры исследуемого объекта. Каждый из перечисленных параметров может нести полезную информацию об исследуемом объекте.

Аналогичными параметрами можно характеризовать и излучение от других предметов, на фоне которых производится наблюдение исследуемого объекта. Излучение от этих предметов создает помеху, искажающую полезную информацию об исследуемом объекте.

При проектировании оптико-электронных систем (ОЭС) проводится предварительное изучение параметров излучений исследуемого объекта и фона, а также выбор в качестве основного параметра сигнала такого параметра излучения, который в большей степени характеризует исследуемый объект и в меньшей степени – вредный фон. Использование фильтров позволяет выделить сигнал из смеси «сигнал-помеха», поступающей на вход оптико-электронной системы, и, тем самым, улучшить ее информационно-измерительные характеристики.

По виду основного информационного параметра оптического сигнала фильтрации подразделяют на спектральную, поляризационную и пространственную.

Спектральная фильтрация заключается в использовании спектральных фильтров, пропускающих на фотоприемник оптическое излучение в заданном интервале длин волн.

Пространственная фильтрация характеризуется использованием в качестве информационного параметра пространственного распределения интенсивности излучения, которое выделяется из смеси «сигнал-помеха» с помощью пространственно-частотных фильтров, выполненных в виде щелей, масок, растров, фурье-голограмм. Пространственная фильтрация широко используется в задачах поиска, обнаружения, распределения и контроля объектов заданной формы.

Поляризационная фильтрация заключается в применении фильтров, пропускающих на фотоприемник излучение определенной поляризации для объектов и не пропускающих поляризованное излучение помех.

10.2. Пространственная фильтрация в ОЭП и С

Рассмотрим пространственную фильтрацию излучения объекта и фонов в ОЭП и С (рис. 10.1).

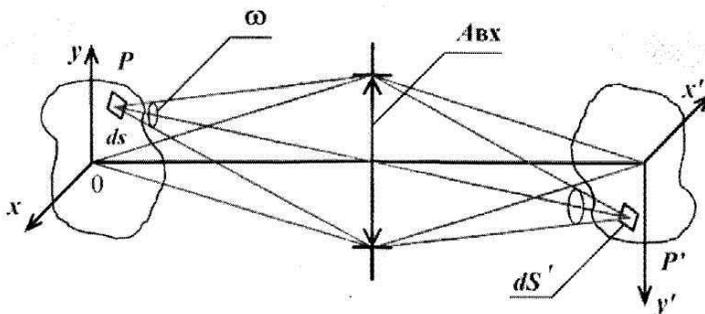


Рис. 10.1. К теории изображений в оптических системах с использованием свертки

На основании рис. 10.1 освещенность в окрестности площадки dS' равна:

$$dE(x', y') = \pi \tau_0 \omega' L(x, y) \cdot h_0(x' - x, y - y') dx dy. \quad (10.1)$$

Суммарная освещенность, формируемая за счет излучения всей поверхности объекта, равна:

$$E(x', y') = \pi \tau_0 \omega' \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L(x, y) \cdot h_0(x' - x, y' - y) dx dy. \quad (10.2)$$

Пространственно-частотный спектр изображения объекта имеет вид:

$$E(v_x, v_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x', y') \cdot e^{-j2\pi(v_x x' + v_y y')} dx' dy'. \quad (10.3)$$

Подставив в (10.3) соотношение (10.2), получаем:

$$E(v_x, v_y) = \pi \tau_0 \omega' \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L(x, y) \times \\ \times h_0(x', y') \cdot e^{-j2\pi(v_x x' + v_y y')} dx dy dx' dy'. \quad (10.4)$$

Введем замену переменных:

$$\begin{cases} X = x' - x, \\ Y = y' - y. \end{cases} \quad (10.5)$$

Тогда, с учетом (10.5), (10.4) принимает вид:

$$E(v_x, v_y) = \pi \tau_0 \omega' \int \int_{-\infty}^{\infty} L(x, y) \cdot e^{-j2\pi(v_x x' + v_y y')} dx dy \times \\ \times \int \int_{-\infty}^{\infty} h_0(X, Y) \cdot e^{-j2\pi(X v_x + Y v_y)} dX dY. \quad (10.6)$$

В итоге получаем:

$$E(v_x, v_y) = \pi \tau_0 \omega' L(v_x, v_y) \cdot h_0(v_x, v_y). \quad (10.7)$$

Если в плоскости изображения поместим растр, то спектр принимает вид:

$$E_p(v_x, v_y) = \pi \tau_0 \omega' L(\tilde{v}_x, v_y) \cdot h_0(\tilde{v}_x, v_y) \cdot \tau_p(\tilde{v}_x, v_y). \quad (10.8)$$

$$E(x', y') = \pi \tau_0 \omega' \iint L(v_x, v_y) \cdot h_0(v_x, v_y) \times \\ \times \tau_p(v_x, v_y) \cdot e^{j2\pi(v_x x' + v_y y')} \quad (10.9)$$

Здесь $E(v_x, v_y)$ и $E_p(v_x, v_y)$ – пространственно-частотные спектры изображения объекта в плоскости изображения и после растра с передаточной функцией $\tau_0(v_x, v_y)$; $E_p(x', y')$ – освещенность в изображении объекта после пространственной фильтрации растром.

10.3. Теория пространственно-частотной фильтрации

Допустим, что ОЭП обнаружения с квадратным полем зрения имеет фокусное расстояние f' и апертурный угол ω . На расстояние l поле зрения ОЭП охватывает участок фона с разрешением $A_\phi \times A_\phi$. В поле зрения находится еще излучающий объект (цель) с размерами $A_0 \times A_0$.

В фокальной плоскости объектива ОЭП располагается растр в виде целевой диафрагмы, ширина A'_0 которой равна размеру изображения объекта. После растра располагается приемник излучения, размер чувствительной площадки которого равен $A'_\phi \times A'_\phi$. Чувствительная площадка сопряжена с участком фона $A_\phi \times A_\phi$. В случае работы ОЭП обнаружения без анализатора изображений (растра), отношение «сигнал/помеха» можно рассчитать по формуле:

$$\mu = \frac{\tau_0 \cdot \Phi_0 \cdot S \cdot \tau_a}{\tau_0 \cdot \Phi_\phi \cdot S \cdot \tau_a}, \quad (10.10)$$

где Φ_0, Φ_ϕ – интегральный поток излучения объекта и фона.

С учетом яркости объекта и фона выражение (10.10) принимает следующий вид:

$$\mu = \frac{L_0 \cdot \tau_0 \tau_a \cdot \omega \cdot A_0^2 \cdot S}{L_\phi \cdot \tau_0 \tau_a \cdot \omega \cdot A_\phi^2 \cdot S} = \frac{T_0^4}{T_\phi^4} \cdot \frac{A_0^2}{A_\phi^2}, \quad (10.11)$$

где L_0, L_ϕ – интегральная яркость излучения объекта и фона;

T_0, T_ϕ – температура объекта и фона;

S – интегральная чувствительность приемника излучения;

τ_0 – интегральный коэффициент пропускания оптических элементов;

τ_a – интегральный коэффициент пропускания слоя атмосферы между объектом и прибором.

При введении анализатора изображений (растра) в качестве пространственно-частотного фильтра, если размеры объекта и фона различны, то отношение «сигнал/помеха» можно существенно увеличить. Этот эффект рассмотрим на основе следующих рассуждений.

Согласно дифракционной теории формирования изображений с учетом пространственно-частотных спектров (ПЧС) объекта и фона, а также

пространственно-частотной передаточной функции (ПЧПФ) раstra и оптической передаточной функции оптической системы, освещенность в изображении объекта и фона после раstra можно представить в виде:

$$E_0(x', y') = \pi \tau_0 \omega' \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{L}_0(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y) \cdot \tilde{\tau}_p(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y) \times \\ \times \tilde{h}(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y) \cdot e^{j2\pi(\tilde{v}_x x' + \tilde{v}_y y')} d\tilde{v}_x d\tilde{v}_y. \quad (10.12)$$

$$\tilde{L}_0(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_0(x', y') e^{-j2\pi(\tilde{v}_x x' + \tilde{v}_y y')} dx' dy', \quad (10.13)$$

$$\tilde{\tau}_p(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tau(x', y') \cdot e^{-j2\pi(\tilde{v}_x x' + \tilde{v}_y y')} dx' dy', \quad (10.14)$$

$$\tilde{h}(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x', y') \cdot e^{-j2\pi(\tilde{v}_x x' + \tilde{v}_y y')} dx' dy'. \quad (10.15)$$

Здесь ω' – задний апертурный угол оптической системы ОЭП;

$\tilde{L}_0(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y)$ – ПЧС объекта в пространстве изображений;

$\tilde{\tau}_p(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y)$ – ПЧПФ раstra;

$\tilde{h}(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y)$ – оптическая передаточная функция (ОПФ) оптической системы;

$h(x', y')$ – функция рассеяния оптической системы;

v_x, v_y – пространственные частоты в пространстве изображений.

Выражение (10.12) показывает следующее.

1. Оптическая система осуществляет двумерное обратное преобразование Фурье произведения спектра яркости излучения объекта и ПЧС оптической системы растра.
2. Освещенность изображения объекта после растра есть не что иное, как двумерное обратное преобразование Фурье произведения ПЧС объекта, ОПФ оптической системы и ПЧПФ растра.
3. ПЧС освещенности изображения есть произведение ПЧС яркости объекта, ОПФ оптической системы и ПЧПФ растра:

$$E_0(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y) = \pi\tau_0\omega' L_0(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y)h(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y)\tau_p(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y). \quad (10.16)$$

Аналогично для фона можно записать:

$$E_{\tilde{\phi}}(x', y') = \pi\tau_0\omega' \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_{\tilde{\phi}}(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y) \cdot \tau_p(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y) \times \\ \times h(\tilde{v}_x, \tilde{v}_y) \cdot e^{j2\pi(v_x x' + v_y y')} dv_x dv_y. \quad (10.17)$$

Качество фильтрации оценивается отношением «сигнал/помеха» с пространственным фильтром (растром) по формуле:

$$\mu_{\tilde{\phi}} = \frac{|E_0(x', y')| \cdot A_0^2}{|E_{\tilde{\phi}}(x', y')| \cdot A_{\tilde{\phi}} \cdot A_0}. \quad (10.18)$$

В случае безаберрационных оптических систем,

$$h(\tilde{v}_x, v_y) = \text{const},$$

когда $\tau_p(\tilde{v}_x, v_y)$, и с учетом выражений (10.12) и (10.17), формула (10.18) может быть записана в виде:

$$\mu_{\tilde{\phi}} = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_0(\tilde{v}_x, v_y) \cdot \tau_p(\tilde{v}_x, v_y) \cdot e^{j2\pi(v_x x' + v_y y')} dv_x dv_y \right| \cdot \frac{A_0'}{A_{\tilde{\phi}}'}}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_{\tilde{\phi}}(\tilde{v}_x, v_y) \cdot \tau_p(\tilde{v}_x, v_y) \cdot e^{j2\pi(v_x x' + v_y y')} dv_x dv_y \right| \cdot \frac{A_0'}{A_{\tilde{\phi}}'}}. \quad (10.19)$$

Применив к числителю и знаменателю в (10.19) неравенство Буняковского – Шварца, последнее запишем в виде:

$$\mu_{\tilde{\phi}} = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_0(\tilde{v}_x, v_y) dv_x dv_y \right| \cdot \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tau_p(\tilde{v}_x, v_y) dv_x dv_y \right| \cdot A_0'}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_{\tilde{\phi}}(\tilde{v}_x, v_y) dv_x dv_y \right| \cdot \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tau_p(\tilde{v}_x, v_y) dv_x dv_y \right| \cdot A_{\tilde{\phi}}'} = \quad (10.20)$$

$$= \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_0(\tilde{v}_x, v_y) dv_x dv_y \right| \cdot A_0'}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_{\tilde{\phi}}(\tilde{v}_x, v_y) dv_x dv_y \right| \cdot A_{\tilde{\phi}}'}.$$

Рассмотрим случай, когда объект и фон являются тепловыми излучателями. Тогда:

$$L_0(x', y') = \frac{\sigma T_\phi^4}{\pi} \begin{cases} 1 & |x'|, |y'| \leq \frac{A'_0}{2}, \\ 0 & |x'|, |y'| > \frac{A'_0}{2}. \end{cases} \quad (10.21)$$

$$I_i = \frac{S}{\pi} \sum_{j=1}^4 \bar{\beta}_{ij} \cdot E_j \wedge. \quad (10.22)$$

Здесь T_0, T_ϕ – температура объекта и фона соответственно.

Тогда отношение «сигнал/помеха», когда растр является щелевой диафрагмой с размерами $A'_0 \cdot A'_\phi$, будет следующим (так как $(A'_0/A'_\phi)^2 = (A_0/A_\phi)^2$):

$$\mu_\phi = \mu \frac{A'_0 \left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi v_x A'_0)}{(\pi v_x A'_0)} dv_x \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi v_y A'_0)}{(\pi v_y A'_0)} dv_y \right|}{A'_\phi \left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi v_x A'_\phi)}{(\pi v_x A'_\phi)} dv_x \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi v_y A'_\phi)}{(\pi v_y A'_\phi)} dv_y \right|} = \quad (10.23)$$

$$= \mu \frac{A'_0 \left| \int_{-\infty}^{\infty} \sin c(\pi v_x A'_0) dv_x \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \sin c(\pi v_y A'_0) dv_y \right|}{A'_\phi \left| \int_{-\infty}^{\infty} \sin c(\pi v_x A'_\phi) dv_x \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \sin c(\pi v_y A'_\phi) dv_y \right|}$$

При расчете следует принять во внимание следующее. Из справочника имеем:

$$\int_0^{\infty} \frac{\sin ax}{x} dx = \frac{\pi}{2}. \quad (10.24)$$

Тогда:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi v_y A'_0)}{\pi v_y A'_0} dv_y &= 2 \int_0^{\infty} \frac{\sin(\pi v_y A'_0)}{\pi v_y A'_0} dv_y = \\ &= 2 \cdot \frac{1}{\pi A'_0} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{1}{A'_0}. \end{aligned} \quad (10.25)$$

11. Спектральная фильтрация (теория)

Принцип спектральной фильтрации чаще всего состоит в выборе такого рабочего участка $\lambda_1 \dots \lambda_2$ оптического спектра, для которого на выходе приемника излучения ОЭП отношение сигнала от наблюдаемого объекта к сигналу от помех является наибольшим. Оптимальная спектральная фильтрация возможна только при одновременном учете спектральных характеристик объектов, фонов и приемников излучения, а также оптических сред, расположенных между объектом и ОЭП. Приведенные выше положения общей теории оптимальной фильтрации полностью приемлемы к этому случаю.

Рассмотрим спектральную фильтрацию оптического излучения объекта, имеющего спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) $L_0(\lambda)$. При этом известны спектральные характеристики помехи, приемника оптического излучения, оптических элементов ОЭП и среды распространения излучения (рис. 11.1):

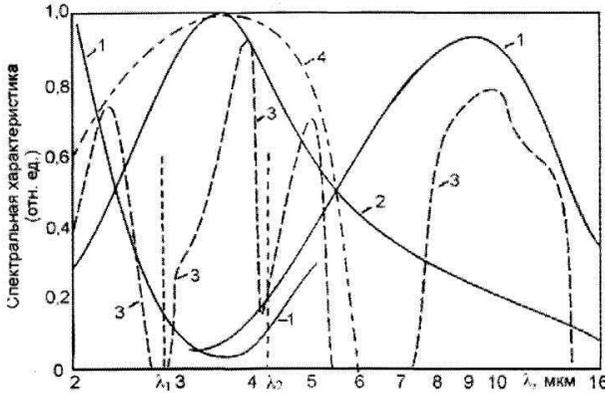


Рис. 11.1. К объяснению спектральной фильтрации:

- 1 – спектральная плотность энергетической яркости излучения помехи ($L_n(\lambda)$);
- 2 – спектральная плотность энергетической яркости излучения объекта ($L_0(\lambda)$);
- 3 – спектральный коэффициент пропускания слоя атмосферы ($\tau_a(\lambda)$);
- 4 – спектральная чувствительность приемника излучения ($S(\lambda)$)

Расчет качества спектральной фильтрации можно осуществить с помощью понятия эффективной спектральной ширины полосы пропускания фильтра:

$$\Delta\lambda_{эф} = \lambda_2^0 - \lambda_1^0,$$

где

$$\lambda_1^0 = \lambda_m - \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_m} L_0(\lambda)S(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_o(\lambda)d\lambda}{(L_0 \cdot S)_m}, \quad (11.1)$$

$$\lambda_2^0 = \lambda_m + \frac{\int_{\lambda_m}^{\lambda_2} L_0(\lambda)S(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_0(\lambda)d\lambda}{(L_0 \cdot S)_m}, \quad (11.2)$$

λ_1, λ_2 – границы чувствительности приемника.

Для определения эффективности спектрального фильтра находим отношение «сигнал/помеха» с использованием фильтра (μ_ϕ) и без него ($\mu_{\phi.}$):

$$\mu_\phi = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2^0} L_0(\lambda)S(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_\phi(\lambda)\tau_0(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2^0} L_n(\lambda)S(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_\phi(\lambda)\tau_0(\lambda)d\lambda}; \quad (11.3)$$

$$\mu_{\phi.} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(\lambda)S(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_0(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_n(\lambda)S(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_0(\lambda)d\lambda}. \quad (11.4)$$

Тогда

$$\gamma = \frac{\mu_\phi}{\mu_{\phi.}} \quad (11.5)$$

-эффективность фильтра

Если $\gamma > 1$, то спектральный фильтр эффективен.

Рассмотрим частный случай, когда объект и фон излучают с температурой $T_0 \sim T_n$.

Допустим, что $\tau_a(\lambda) = \tau_0(\lambda) = 1$.

Так как

$$\left. \begin{aligned} L_0(\lambda) &= y_0 \left(x = \frac{\lambda}{\lambda_m^0} \right) \cdot L_0(\lambda_m^0) \\ L_n(\lambda) &= y_n \left(x = \frac{\lambda}{\lambda_m^n} \right) \cdot L_n(\lambda_m^n) \end{aligned} \right\}, \quad (11.6)$$

тогда, выражение (11.1) и (11.2), если интеграл заменить суммой, примет вид:

$$\lambda_1^0 = \lambda_m - \frac{\sum_{i=1}^k y_0(x_i) \cdot S(\lambda_i) \Delta \lambda}{(y_0 \cdot S)_m}; \quad (11.7)$$

$$\lambda_2^0 = \lambda_m + \frac{\sum_{i=k}^n y_0(x_i) \cdot S(\lambda_i) \Delta \lambda}{(y_0 \cdot S)_m}. \quad (11.8)$$

Индекс i принимает значения $1, k, n$, что соответствует длинам волн λ_1, λ_m и λ_2 , где λ_1 и λ_2 – левая и правая границы чувствительности приемника излучения, а λ_m соответствует максимальному значению выходного сигнала приемника.

Применительно для формулы (11.3) и (11.4) имеем:

$$\mu_{\phi} = \frac{L_0(\lambda_m^0) \sum_{i=\alpha}^{\beta} y_0(x_i) \cdot S(\lambda_i) \cdot \tau_{\phi}(\lambda_i) \Delta\lambda}{L_n(\lambda_m^n) \sum_{i=\alpha}^{\beta} y_n(x_i) \cdot S(\lambda_i) \cdot \tau_{\phi}(\lambda_i) \Delta\lambda}; \quad (11.9)$$

$$\mu_{\beta, \phi} = \frac{L_0(\lambda_m^0) \sum_{i=\alpha'}^{\beta'} y_0(x_i) \cdot S(\lambda_i) \Delta\lambda}{L_n(\lambda_m^n) \sum_{i=\alpha'}^{\beta'} y_n(x_i) \cdot S(\lambda_i) \Delta\lambda}. \quad (11.10)$$

Аналогично, что при значениях индекса $i = \alpha, \beta, \alpha'$ и β' длины волн соответствуют следующим значениям:

λ_1^0 и λ_2^0 – левая и правая границы спектрального фильтра;

λ_1 и λ_2 – левая и правая границы чувствительности приемника излучения.

12. Вектор-параметр Стокса и анализ произвольно поляризованного света в ОЭП и С

Рассмотрим вектор-параметр Стокса оптического излучения:

$$E_j = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_0 + E_{90} \\ E_0 - E_{90} \\ E_{45} - E_{135} \\ E_{np} - E_{л} \end{bmatrix}, \quad (12.1)$$

где $E_0, E_{45}, E_{90}, E_{135}$ – компоненты, поляризованные соответственно под углами $0, 45, 90$ и 135° по отношению к плоскости референции;

$E_{np}, E_{л}$ – право- и левозакрученные поляризованные компоненты (рис. 12.1).

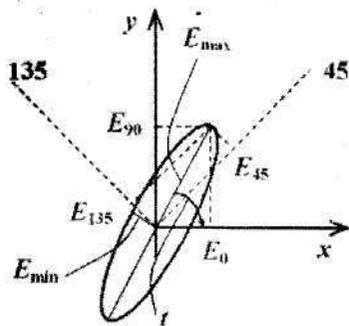


Рис. 12.1. Геометрия анализа поляризованного излучения

Для удобного вида в инженерной практике, при описании поляризованного излучения, его представляют в виде:

$$E_j = \begin{bmatrix} 1 \\ P \cdot \cos 2t \cos 2\gamma \\ P \cdot \sin 2t \cos 2\gamma \\ P \cdot \sin 2\gamma \end{bmatrix} E, \quad (12.2)$$

где P , t , γ – это степень, азимут и степень эллиптичности поляризации излучения.

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}.$$

Согласно рис. 12.1 имеем:

$$\begin{aligned} E_0 &= E_{\max} \cos^2 t + E_{\min} \sin^2 t, \\ E_{90} &= E_{\max} \sin^2 t + E_{\min} \cos^2 t, \\ E_{45} &= E_{\max} \cos^2(t - 45^\circ) + E_{\min} \sin^2(t - 45^\circ), \\ E_{135} &= E_{\max} \cos^2(135^\circ - t) + E_{\min} \sin^2(135^\circ - t). \end{aligned} \quad (12.1, a)$$

Так как для линейно поляризованного излучения, справедливо равенство:

$$E_{np} = E_{л} = 0, \quad (12.1,б)$$

тогда, подставляя (а) и (б) в (12.1), имеем:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{\max} (\cos^2 t + \sin^2 t) + E_{\min} (\cos^2 t + \sin^2 t) = E_{\max} + E_{\min}, \\ E_2 &= E_{\max} (\cos^2 t - \sin^2 t) - E_{\min} (\cos^2 t - \sin^2 t) = \\ &= (E_{\max} - E_{\min}) \cos 2t, \\ E_3 &= E_{\max} [\cos^2(t - 45^\circ) - \cos^2(135^\circ - t)] + \\ E_{\min} [\sin^2(t - 45^\circ) - \sin^2(135^\circ - t)] &= (E_{\max} - E_{\min}) \sin 2t, \\ E_4 &= 0. \end{aligned} \quad (12.1,в)$$

Воспользуемся теперь выражениями:

$$P = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}, \quad (12.1,г)$$

$$E_{\max} - E_{\min} = P(E_{\max} + E_{\min}) = P \cdot E^0. \quad (12.1,д)$$

На основании формул (г) и (д), (в) принимает вид:

$$E_1 = E^\circ,$$

$$E_2 = PE^\circ \cos 2t,$$

$$E_3 = PE^\circ \sin 2t,$$

$$E_4 = 0.$$

Вектор-параметр Стокса (12.1) можно записать в виде, идентичном (12.2):

$$E_j = E^\circ \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos 2t \\ P \cos 2t \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (12.3)$$

Для понимания сущности выражения (12.1) рассмотрим частный случай освещения объекта коллимированным пучком, вектор-параметр Стокса для освещенности которого в месте нахождения объекта имеет вид:

$$E_{\lambda j} = E_{\lambda}^\circ \begin{bmatrix} 1 \\ P \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad t = 0, \quad (12.4)$$

то есть объект освещается линейно поляризованным излучением с азимутом $t = 0$.

Допустим, что объект обладает матрицей отражения следующего вида:

$$\bar{\beta}_{ij} = \bar{\beta} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(R_{\parallel} + R_{\perp}) & \frac{1}{2}(R_{\parallel} - R_{\perp}) & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}(R_{\parallel} - R_{\perp}) & \frac{1}{2}(R_{\parallel} + R_{\perp}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (+\sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \cos \delta) & (-\sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \sin \delta) \\ 0 & 0 & (\sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \sin \delta) & (\sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \cos \delta) \end{bmatrix}, \quad (12.5)$$

где R_{\parallel} , R_{\perp} – поляризационные компоненты френелевского коэффициента отражения, а разность фаз этих компонентов есть δ .

Выразим вектор-параметрическое представление в виде:

$$I_{\lambda i} = \frac{S}{\pi} \sum_{j=1}^4 \bar{\beta}_{ij} \cdot E_{\lambda j}, \quad (12.6)$$

где

$$\bar{\beta}_{ij} = \bar{\beta} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(R_{\parallel} + R_{\perp}) & \frac{1}{2}(R_{\parallel} - R_{\perp}) & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}(R_{\parallel} - R_{\perp}) & \frac{1}{2}(R_{\parallel} + R_{\perp}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (+\sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \cos \delta) & (-\sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \sin \delta) \\ 0 & 0 & (\sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \sin \delta) & (\sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \cos \delta) \end{bmatrix}, \quad (12.7)$$

есть не что иное, как матрица отражения объекта.

Тогда, подставляя (12.4) и (12.5) в (12.6), компоненты вектор-параметра Стокса поляризованного отраженного излучения будут следующими:

$$\begin{aligned}
 I_{\lambda} = \bar{\beta} & \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(R_{\parallel} + R_{\perp}) & \frac{1}{2}(R_{\parallel} - R_{\perp}) & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1}{2}(R_{\parallel} - R_{\perp}) & \frac{1}{2}(R_{\parallel} + R_{\perp}) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & (+\sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \cos \delta) & (-\sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \sin \delta) & \\ 0 & 0 & (\sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \sin \delta) & (\sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \cos \delta) & \end{bmatrix} \times \\
 & \times \frac{S \cdot E_{\lambda 0}}{\pi} \begin{bmatrix} 1 \\ P \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(R_{\parallel} + R_{\perp}) + \frac{1}{2}(R_{\parallel} - R_{\perp})P \\ \frac{1}{2}(R_{\parallel} - R_{\perp}) + \frac{1}{2}(R_{\parallel} + R_{\perp})P \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \bar{\beta} \left(\frac{E_0}{\pi} \right) \cdot S = \\
 & = \frac{1}{2} \bar{\beta} \left(\frac{E_0}{\pi} \right) \cdot S \begin{bmatrix} R_{\parallel}(1+P) + R_{\perp}(1-P) \\ R_{\parallel}(1+P) - R_{\perp}(1-P) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{12.8}$$

Выражение (12.8) позволяет определить степень и положение плоскости поляризации излучения объекта, если воспользоваться выражениями:

$$P_0 = (I_{\lambda 2}^2 + I_{\lambda 3}^2 + I_{\lambda 4}^2)^{1/2} / I_{\lambda 1}, \tag{12.9}$$

$$t_0 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{I_{\lambda 3}}{I_{\lambda 2}}. \tag{12.10}$$

Тогда, подставив значения $I_{\lambda 1}$, $I_{\lambda 2}$, $I_{\lambda 3}$, и $I_{\lambda 4}$ в (14.9), а также $I_{\lambda 2}$ и $I_{\lambda 3}$ в (12.10), получим окончательное выражение для P_0 и t_0 :

$$P_0 = \frac{R_{\parallel}(1+P) - R_{\perp}(1-P)}{R_{\parallel}(1+P) + R_{\perp}(1-P)}, \tag{12.11}$$

$$t_0 = 0. \tag{12.12}$$

Таким образом, выражение (12.8) для отраженного излучения объектов при освещении их поляризованным излучением позволяет определить как общую энергию отраженного излучения, так и состояние поляризации, что подтверждают выражения (12.9) ... (12.12).

Рассмотрим анализ эллиптически поляризованного света (рис. 12.2).

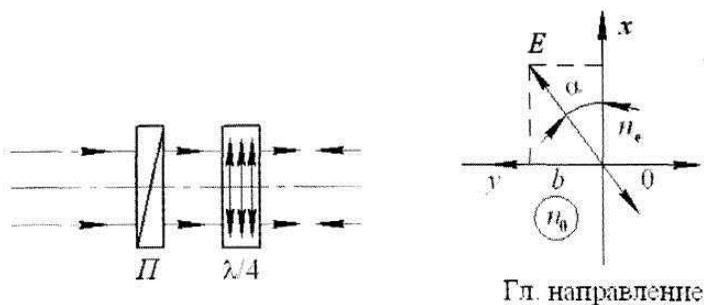


Рис. 12.2. К анализу эллиптически поляризованного света

Допустим, что на систему из пластинки $\lambda/4$ и линейного поляризатора П падает эллиптически поляризованный свет.

Тогда имеем:

$$a = E \cdot \cos \alpha; \tag{12.13}$$

$$b = E \cdot \sin \alpha;$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d \tag{12.14}$$

– разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами в поляризационном кристалле.

Значит:

$$\begin{aligned} E_x &= E \cos \alpha \cos \omega t = a \cdot \cos \omega t; \\ E_y &= E \sin \alpha \cos(\omega t - \varphi) = b \cdot \cos(\omega t - \varphi). \end{aligned} \quad (12.15)$$

Чтобы получить траекторию результирующего колебания, исключим время t :

$$\begin{aligned} \cos \omega t &= \frac{E_x}{a}, \\ E_y &= b(\cos \omega t \cos \varphi + \sin \omega t \sin \varphi) \end{aligned}$$

или

$$\sin \omega t + \sin \varphi = \frac{E_y}{b} + \frac{E_x}{a} \cos \varphi. \quad (12.16)$$

Возводим (12.16) в квадрат и суммируем его с выражением:

$$(\cos \omega t \sin \varphi)^2 = \frac{E_x^2}{a^2} \sin^2 \varphi.$$

Тогда получим:

$$\frac{E_x^2}{a^2} + \frac{E_y^2}{b^2} - \frac{2E_x E_y}{ab} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (12.17)$$

Анализируя (12.17), можно отметить, что форма и ориентация эллипса зависит от углов α и φ .

Рассмотрим действие пластинки $\lambda/4$.

Оптическая разность хода в этом случае равна:

$$(n_o - n_e)d = \frac{\lambda}{4}, \quad (12.18)$$

тогда

$$\varphi = \pi/2. \quad (12.19)$$

Подставив (12.19) в (12.17), получим:

$$\frac{E_x^2}{a^2} + \frac{E_y^2}{b^2} = 1. \quad (12.20)$$

Эллипс ориентирован вдоль осей OX и OY.

Если $\alpha = 45^\circ$, то $a = b$ и получаем:

$$E_x^2 + E_y^2 = a^2, \quad (12.21)$$

т. е. имеем свет циркулярный.

Если $\varphi = \pi/2$, то E_x опережает E_y по фазе на $\pi/2$.

Если $\varphi = -\pi/2$, то E_x отстает от E_y на $\pi/2$ по фазе.

В соответствии с этим, результирующий вектор вращается против часовой стрелки (влево) или по часовой стрелки (вправо). Поэтому и принято различать левую и правую эллиптическую и циркулярную поляризацию.

13. Поляризационная фильтрация в АОЭП

Пусть Φ_j – компоненты вектор-параметра Стокса мощности лазера передающей системы АОЭП. Тогда компоненты вектор-параметра Стокса силы излучения передающей системы будут следующие (рис. 13.1 и 13.2):

$$I_j^{\wedge} = \frac{\Phi_j^{\wedge}}{\omega_n}, \quad (13.1)$$

где ω_n – телесный угол расходимости лучей лазера на выходе передающей системы АОЭП, $j = 1, 2, 3, 4$.

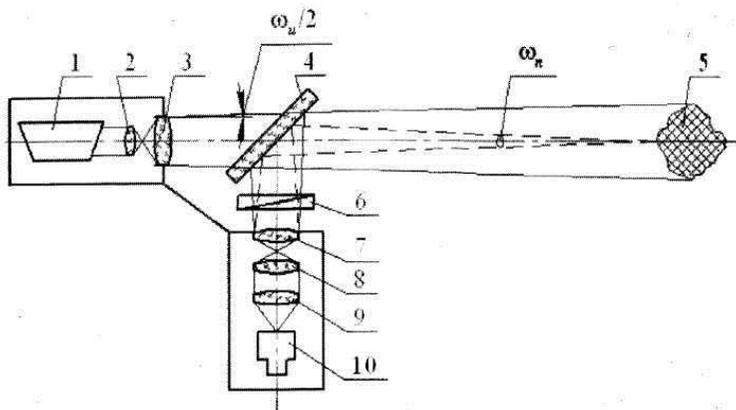


Рис. 13.1. Схема активного ОЭП (АОЭП) с поляризационной фильтрацией

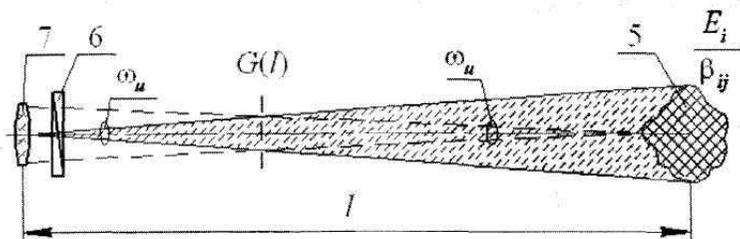


Рис. 13.2. Эквивалентная схема работы АОЭП с поляризационной фильтрацией

В месте расположения объекта на расстоянии l вектор-параметр Стокса I_j создает энергетическую освещенность на объекте, компоненты вектор-параметр Стокса которого будут

$$E_j^{\wedge} = \frac{\Phi_j^{\wedge}}{\omega_u l^2} \cdot \tau. \quad (13.2)$$

В связи с тем, что характеристикой объекта в поляризованном свете является матрица отражения $\bar{\beta}_{ij}$, то при взаимодействии E_j с $\bar{\beta}_{ij}$ формируются компоненты вектор-параметр Стокса отраженного излучения объекта; так компоненты вектор-параметр Стокса для энергетической яркости будут:

$$E_j^\wedge = \frac{\Phi_j^\wedge}{\omega_n l^2} \cdot \tau. \quad (13.3)$$

Если S – площадь объекта в направлении приемной части АОЭП, то для силы излучения объекта имеем:

$$I_i = \frac{S}{\pi} \sum_{j=1}^4 \bar{\beta}_{ij} \cdot E_j^\wedge. \quad (13.4)$$

Так как приемная часть имеет апертурный угол ω_n , который равен

$$\omega_n = \frac{A_{ex\ sp}}{l^2}, \quad (13.5)$$

то поток Φ_i на входном зрачке АОЭП получит значение:

$$\Phi_i = I_i \cdot \omega_n \tau = \frac{A_{ex\ sp}}{l^2} \cdot \tau I_i. \quad (13.5')$$

Тогда, учитывая (13.5'), компоненты вектор-параметра Стокса для энергетической освещенности на поверхности приемника системы, будут равны:

$$E_i = \frac{\Phi_i}{A_{\text{вх. зр.}}} = \frac{I_i}{l^2} \cdot \tau. \quad (13.6)$$

И, наконец, подставляя (13.4) с учетом (13.3) и (13.2) в (13.6), получаем следующее выражение для E_i :

$$E_i = \frac{\tau^2 \cdot S}{\pi \cdot \omega_u \cdot l} \cdot \sum_{j=1}^4 \bar{\beta}_{ij} \cdot \Phi_j. \quad (13.7)$$

Учитывая, что $\bar{\beta}_{ij} = \bar{\beta} \cdot \tilde{\beta}_{ij}$, где $\tilde{\beta}_{ij}$ – нормированная матрица яркости объекта, (13.7) принимает вид:

$$E_i = \frac{\tau^2 \cdot S \cdot \bar{\beta}}{\pi \cdot \omega_u \cdot l^4} \cdot \sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_{ij} \cdot \Phi_j \wedge. \quad (13.8)$$

Аналогичным образом можно получить выражение, формирующее вектор-параметр Стокса энергетической освещенности рассеянного излучения слоя l :

$$E_i^j = \frac{\sigma \times \bar{\beta}^s \left[\int_0^{l_0} \left(\frac{e^{-2\epsilon l}}{l_4} \right) G(l) dl \right]}{\omega_u} \times \sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_{ij}^c \times \Phi_j \wedge, \quad (13.9)$$

где $G(l)$ – площадь, образуемая конусами излучения и визирования в плоскости перпендикулярной оси приемной системы прибора. Следует отметить, что рассеянное излучение слоя l между объектом и АОЭП представляет собой излучение диффузной помехи в АОЭП.

Выражение (13.8) и (13.9) можно еще представить в виде:

$$E_i = \left(\frac{\tau^2 \cdot S \cdot \bar{\beta} \cdot \Phi_n}{\pi \cdot \omega_u \cdot l^4} \right) \cdot \sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_{ij} \cdot \tilde{\Phi}_j^{\wedge}; \quad (13.10)$$

$$E_i^c = \frac{\sigma \cdot \beta^c \left[\int_0^{k_0} \left(\frac{e^{-2sl}}{l^4} \right) G(l) dl \right] \bar{\Phi}_n}{\omega_u} \cdot \sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_{ij}^c \cdot \bar{\Phi}_j^{\wedge}, \quad (13.11)$$

где Φ_n – мощность лазера; $\bar{\Phi}_j^{\wedge}$ – нормированный вектор Стокса лазера.

Если поместить перед входным объективом приемной системы АОЭП поляризационный фильтр, который имеет матрицу преобразования (пропускания) τ_{ki} , то на выходе поляризационного фильтра получаем:

- для компонент вектор-параметра Стокса энергетической освещенности, создаваемой излучением объекта:

$$E_k = \sum_{i=1}^4 \tau_{ki} E_i = \frac{\tau^2 \cdot S \cdot \bar{\beta} \cdot \Phi_n}{\pi \cdot \omega_u \cdot l^4} \cdot \sum_{i=1}^4 \tau_{ki} \left(\sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_{ij} \cdot \tilde{\Phi}_j^{\wedge} \right) \quad (13.12)$$

и излучением помехи

$$E_k^j = \sum_{i=1}^4 \tau_{ki} E_i^j = \frac{\sigma \cdot \beta \left[\int_0^{k_0} \left(\frac{e^{-2sl}}{l^4} \right) G(l) dl \right] \cdot \bar{\Phi}_n}{\pi \cdot \omega_u \cdot l^4} \cdot \sum_{i=1}^4 \tau_{ki} \left(\sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_{ij}^c \cdot \bar{\Phi}_j^{\wedge} \right), \quad (13.13)$$

($k = 1, 2, 3, 4$).

Для случая неполяризованного излучения отношение «сигнал/помеха» будет иметь вид:

$$\mu = \frac{\tau^2 \cdot S \cdot \bar{\beta}}{\pi \cdot l^4 \cdot \sigma \cdot \beta^c \cdot \left[\int_0^{l_0} \left(\frac{e^{-2\sigma l}}{l^4} \right) G(l) dl \right]} \quad (13.14)$$

В случае поляризованного излучения отношение «сигнал/помеха»

будет определяться отношением $\mu_k = E_k / E_k^i$:

$$\mu_k = \frac{E_k}{E_k^i} = \frac{\tau^2 \cdot S \cdot \bar{\beta} \sum_{i=1}^4 \tau_{ki} \left(\sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_{ij} \cdot \tilde{\Phi}_j \wedge \right)}{\pi \cdot l^4 \cdot \sigma \cdot \beta^c \cdot \left[\int_0^{l_0} \left(\frac{e^{-2\sigma l}}{l^4} \right) G(l) dl \right] \sum_{i=1}^4 \tau_{ki} \left(\sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_{ij}^c \cdot \tilde{\Phi}_j \wedge \right)} \quad (13.15)$$

и, учитывая (13.14), (13.15) принимает вид:

$$\mu_k = \mu \frac{\sum_{i=1}^4 \tau_{ki} \left(\sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_{ij} \cdot \tilde{\Phi}_j \wedge \right)}{\sum_{i=1}^4 \tau_{ki} \left(\sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_{ij}^c \cdot \tilde{\Phi}_j \wedge \right)} \quad (13.16)$$

Сущность поляризационной фильтрации состоит в выборе такой матрицы τ_{ki} , чтобы отношение «сигнал/помеха» в поляризованном

свете при заданных конкретных значениях $\tilde{\beta}_{ij}$ и $\tilde{\beta}_{ij}^c$ было максимальным и превышало отношение «сигнал/помеха» в неполяризованном свете. Рассмотрим конкретный случай

поляризационной фильтрации излучения диффузной помехи типа «дымка».

Согласно литературным данным, нормированная матрица рассеянного излучения дымки имеет вид:

$$\tilde{\beta}_{ij}^c = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{\beta}_{12}^c & 0 & 0 \\ \tilde{\beta}_{21}^c & \tilde{\beta}_{22}^c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\beta}_{33}^c & \tilde{\beta}_{34}^c \\ 0 & 0 & \tilde{\beta}_{43}^c & \tilde{\beta}_{44}^c \end{bmatrix}. \quad (13.17)$$

В свою очередь, нормированная матрица отражения диффузного объекта представляется в виде:

$$\tilde{\beta}_{ij}^c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (13.18)$$

Выражение (13.16) запишем в виде:

$$\frac{\mu_k}{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^4 \tau_{ki} \left(\sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_{ij} \cdot \tilde{\Phi}_j^{\wedge} \right)}{\sum_{i=1}^4 \tau_{ki} \left(\sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_{ij}^c \cdot \tilde{\Phi}_j^{\wedge} \right)}. \quad (13.19)$$

Из общих соображений известно, что матрица поляризационного фильтра имеет вид (для неизвестного значения угла δ):

$$\tau_{ij} = \tau_0 \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\delta & \sin 2\delta & 0 \\ \cos 2\delta & \cos^2 2\delta & \cos 2\delta \sin 2\delta & 0 \\ \sin 2\delta & \cos 2\delta \sin 2\delta & \sin^2 2\delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (13.20)$$

Необходимо определить значение δ , при котором (13.19) имеет максимум для условий (13.17) и (13.18) при освещении объекта светом, вектор-параметр Стокса нормированной мощности которого имеет вид:

$$\tilde{\Phi}_j^{\wedge} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13.21)$$

Решение осуществляется следующим образом. Определим сначала

выражение в скобках формулы (13.19) в общем виде, т.е. когда $\tilde{\beta}_{ij}$

имеет общий вид:

$$\tilde{\beta}_y = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{\beta}_{12} & 0 & 0 \\ \tilde{\beta}_{21} & \tilde{\beta}_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\beta}_{33} & \tilde{\beta}_{34} \\ 0 & 0 & \tilde{\beta}_{43} & \tilde{\beta}_{44} \end{bmatrix}. \quad (13.22)$$

В числителе:

$$\left(\sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_y \cdot \tilde{\Phi}_j \wedge \right) = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{\beta}_{12} & 0 & 0 \\ \tilde{\beta}_{21} & \tilde{\beta}_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\beta}_{33} & \tilde{\beta}_{34} \\ 0 & 0 & \tilde{\beta}_{43} & \tilde{\beta}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \tilde{\beta}_{12} \\ \tilde{\beta}_{21} + \tilde{\beta}_{22} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13.23)$$

В знаменателе:

$$\left(\sum_{j=1}^4 \tilde{\beta}_y^c \cdot \tilde{\Phi}_j \wedge \right) = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{\beta}_{12}^c & 0 & 0 \\ \tilde{\beta}_{21}^c & \tilde{\beta}_{22}^c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\beta}_{33}^c & \tilde{\beta}_{34}^c \\ 0 & 0 & \tilde{\beta}_{43}^c & \tilde{\beta}_{44}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \tilde{\beta}_{12}^c \\ \tilde{\beta}_{21}^c + \tilde{\beta}_{22}^c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13.24)$$

Подставим теперь (13.23) и (13.24) в (13.19) и напомним выражение для μ_k/μ с учетом (13.20) при $k = 1$:

$$\frac{\mu_1}{\mu} = \frac{(1 + \tilde{\beta}_{12}) + (\tilde{\beta}_{21} + \tilde{\beta}_{22}) \cos 2\delta}{(1 + \tilde{\beta}_{12}^c) + (\tilde{\beta}_{21}^c + \tilde{\beta}_{22}^c) \cos 2\delta}. \quad (13.25)$$

Так как объект отражает диффузно, то и

$$\frac{\mu_1}{\mu} = \frac{1}{(1 + \tilde{\beta}_{12}^c) + (\tilde{\beta}_{21}^c + \tilde{\beta}_{22}^c) \cos 2\delta}. \quad (13.26)$$

Найдем экстремум отношения μ_1/μ , взяв производную по δ :

$$\frac{\partial \left(\frac{\mu_1}{\mu} \right)}{\partial \delta} = \frac{+2(\tilde{\beta}_{21}^c + \tilde{\beta}_{22}^c) \sin 2\delta}{\left[(1 + \tilde{\beta}_{12}^c) + (\tilde{\beta}_{21}^c + \tilde{\beta}_{22}^c) \cos 2\delta \right]^2}. \quad (13.27)$$

$$\frac{\partial \left(\frac{\mu_1}{\mu} \right)}{\partial \delta} = 0;$$

$$2(\tilde{\beta}_{21}^c + \tilde{\beta}_{22}^c) \sin 2\delta = 0;$$

$$\sin 2\delta = 0; \quad 2\delta = 0 \pm k\pi,$$

$$2\delta = 0 - \min; \quad \delta_{\min} = 0;$$

При $k = 1, 2\delta = \pi$

$$\delta_{\max} = \frac{\pi}{2}, \quad (13.28)$$

$$\left(\frac{\mu_1}{\mu} \right)_{\max} = \frac{1}{(1 + \tilde{\beta}_{12}^c) - (\tilde{\beta}_{21}^c + \tilde{\beta}_{22}^c)}. \quad (13.29)$$

Теперь подставив (13.28) в (13.20), получим, что матрица оптического фильтра имеет вид:

$$\tau_{ij} = \tau_0 \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (13.30)$$

Таким образом, на основании (13.28) мы показали что матрица (13.30) подобрана оптимально с точки зрения максимизации отношения «сигнал/помеха».

14. Поляризационная фильтрация в ПОЭП

Рассмотрим поляризационную фильтрацию в пассивных ОЭП, схема которой приведена на рис. 14.1.

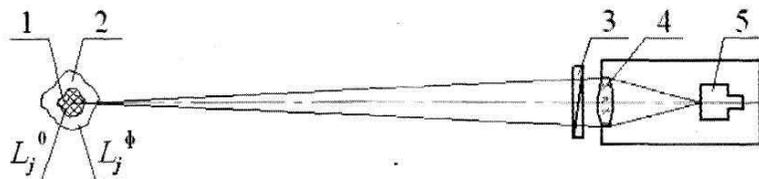


Рис. 14.1. Схема поляризационной фильтрации в пассивных ОЭП

$$L_j^0 = L_0 \begin{bmatrix} 1 \\ P_0 \cdot \cos 2t \\ P_0 \cdot \sin 2t \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (14.1)$$

$$L_j^\phi = L_0 \begin{bmatrix} 1 \\ P_\phi \cdot \cos 2t_\phi \\ P_\phi \cdot \sin 2t_\phi \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (14.2)$$

$$\tau_{ij} = \tau_0 \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\delta & \sin 2\delta & 0 \\ \cos 2\delta & \cos^2 2\delta & \cos 2\delta \sin 2\delta & 0 \\ \sin 2\delta & \cos 2\delta \sin 2\delta & \sin^2 2\delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (14.3)$$

$$L_i = \sum_{j=1}^4 \tau_{ij} L_j; \quad (i, = 1, 2, 3, 4) \quad (14.4)$$

$$L_1^0 = L_0 \tau_0 [1 + P_0 \cos 2(\delta - t_0)]; \quad (14.5)$$

$$L_1^\phi = L_\phi \tau_\phi [1 + P_\phi \cos 2(\delta - t_\phi)]; \quad (14.6)$$

$$\mu_i = L_i^0 / L_i^\phi; \quad (14.7)$$

$$\mu_1 = \frac{L_1^0}{L_1^\phi} = \frac{L_0 [1 + P_0 \cos 2(\delta - t_0)]}{L_\phi [1 + P_\phi \cos 2(\delta - t_\phi)]}; \quad (14.8)$$

$$\mu_1 = \mu \frac{[1 + P_0 \cos 2(\delta - t_0)]}{[1 + P_\phi \cos 2(\delta - t_\phi)]}. \quad (14.9)$$

Формула (14.9) показывает, что $\mu_1 \geq \mu$.

Рассмотрим контраст в поляризованном свете.

$$k = \frac{L_0 - L_\phi}{L_0 + L_\phi} = \frac{\mu - 1}{\mu + 1}. \quad (14.10)$$

Если $L_0 = L_\phi$, то $k = 0$ и $\mu = 1$. Необходимо в результате поляризационной фильтрации получить $k \neq 0$.

Введем понятие поляризационного контраста K_n :

$$k_{IT} = \frac{L_1^0 - L_1^\phi}{L_1^0 + L_1^\phi}. \quad (14.11)$$

На основании (14.5) и (14.6) имеем:

$$k_n = \frac{L_0[1 + P_0 \cos 2(\delta - t_0)] - L_\phi[1 + P_\phi \cos 2(\delta - t_\phi)]}{L_0[1 + P_0 \cos 2(\delta - t_0)] + L_\phi[1 + P_\phi \cos 2(\delta - t_\phi)]}. \quad (14.12)$$

Упрощая (14.12) и учитывая, что согласно (14.10) $k(\mu + 1) = \mu - 1$; $\mu(1 - k) = k + 1$;

$$\mu = \frac{k + 1}{1 - k}, \quad (A)$$

для k_n получим:

$$\begin{aligned} k_n &= \frac{\mu[1 + P_0 \cos 2(\delta - t_0)] - [1 + P_\phi \cos 2(\delta - t_\phi)]}{\mu[1 + P_0 \cos 2(\delta - t_0)] + [1 + P_\phi \cos 2(\delta - t_\phi)]} = \\ &= \frac{\left(\frac{1+k}{1-k}\right)[1 + P_0 \cos 2(\delta - t_0)] - [1 + P_\phi \cos 2(\delta - t_\phi)]}{\left(\frac{1+k}{1-k}\right)[1 + P_0 \cos 2(\delta - t_0)] + [1 + P_\phi \cos 2(\delta - t_\phi)]}. \end{aligned}$$

15. Пространственно-частотная фильтрация оптического излучения ОЭП и С

15.1. Структура и спектр модулированного потока излучения. Отношение «сигнал/помеха»

Рассмотрим следующую схему для реализации пространственно-частотной фильтрации (рис. 15.1):

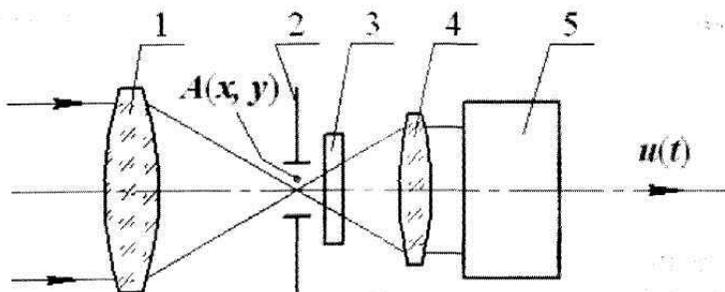


Рис. 15.1. Структурная схема для реализации пространственно-частотной фильтрации:

1 – объектив; 2 – диафрагма; 3 – растр; 4 – конденсор; 5 – ПОИ

Обозначим координаты некоторой точки A через x, y .

Освещенность изображения в этой точке – $E(x, y, t)$ при сканировании;
 $\tau_p(x, y, z)$ – коэффициент пропускания при вращении растра.

Поток излучения, прошедший через растр, будет:

$$\Phi(t) = \int_{(\sigma)} \tau_p(x, y, t) \cdot E(x, y, t) d\sigma. \quad (15.1)$$

Преобразуем (15.1) к виду:

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= \int_{(\sigma)} \tau_p(x, y, t) \cdot \tau_\phi(x, y) \cdot E(t) d\sigma = \\ &= E(t) \int_{(\sigma)} \sigma_p(x, y, t) \cdot \tau_\phi(x, y) \cdot d\sigma. \end{aligned} \quad (15.2)$$

где $\tau_\phi(x, y)$ – коэффициент пропускания фильтра, устанавливаемого в плоскости диафрагмы.

Обозначим

$$\tau(t) = \frac{1}{\sigma} \int_{(\sigma)} \tau_p(x, y, t) \cdot \tau_\phi(x, y) d\sigma. \quad (15.3)$$

Тогда

$$\Phi(t) = E(t) \cdot \sigma \cdot \tau(t) = \Phi'(t) \cdot \tau(t), \quad (15.4)$$

где $\tau(t)$ – интегральный коэффициент пропускания диафрагмы и растра.

Представим $\tau(t)$ в виде ряда Фурье:

$$\tau(t) = 0,5A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos k\omega_0 t + B_k \sin k\omega_0 t). \quad (15.5)$$

Здесь

$$A_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \tau(t) \cos k\omega_0 t \, dt;$$

$$B_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \tau(t) \sin k\omega_0 t \, dt; \quad (15.6)$$

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \tau(t) \, dt;$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T},$$

где f_0 – основная частота модулированного растром потока;

T – период модулированного потока, определяемый пространственным периодом повторения рисунка раstra. Для получения спектра модулированного потока, воспользуемся прямым преобразованием Фурье от функции $\Phi(t)$:

$$\tilde{\Phi}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi'(t) \cdot \tau(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt. \quad (15.7)$$

В случае, когда рассматривается отдельно излучение объекта и фона (по-мехи), имеем:

$$\tilde{\Phi}_0(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0'(t) \cdot \tau(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt. \quad (15.8)$$

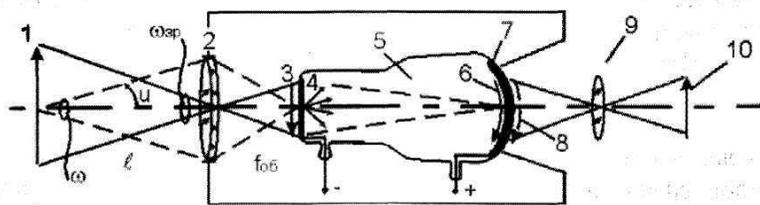
$$\tilde{\Phi}_n(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_n(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_n'(t) \cdot \tau(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt, \quad (15.9)$$

$$\mu(f) = \frac{\tilde{\Phi}_0(f)}{\tilde{\Phi}_n(f)}. \quad (15.10)$$

16. Приборы ночного видения (ПНВ). Процесс формирования изображения в ПНВ

16.1. Принципиальная схема ПНВ

Рассмотрим следующую схему ПНВ (рис. 16.1).



$$u_{п} \sim 10 - 15 \text{ КВ}$$

Рис. 16.1. Процесс формирования изображения в ПНВ:

1 – объект; 2 – объектив; 3 – оптическое изображение объекта на фотокатоде; 4 – фотокатод ЭОПа; 5 – стеклянный баллон; 6 – электронное изображение; 7 – экран; 8 – оптическое изображение на экране ЭОПа; 9 – окуляр; 10 – изображение объекта, формируемое ПНВ

Спектральная характеристика чувствительности фотокатодов ЭОП приведена на рис. 16.2, где приняты следующие обозначения:

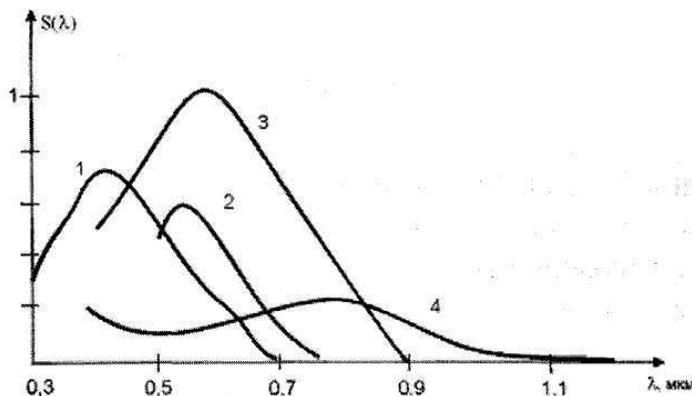


Рис. 16.2. Спектральные характеристики чувствительности фотокатодов ЭОП:

1 – сурьмяно-цезиевый фотокатод; 2 – висмуто-цезиевый; 3 – мультищелочной; 4 – кислородно-цезиевый

Процесс формирования изображения в ПНВ активного типа рассмотрим на основании рис. 16.3.

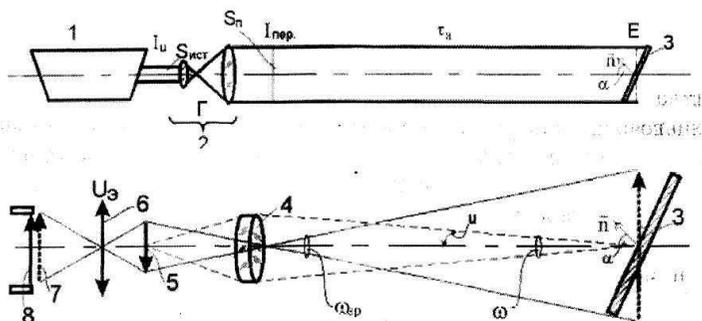


Рис. 16.3. К выводу выражения для яркости изображения объектов и фона в ПНВ активного типа

Выражение для освещенности объекта в пространстве предметов:

$$E = \frac{I_{пер}}{l^2} \tau_a. \quad (16.1)$$

Коэффициент передачи излучения имеет вид:

$$K_{пер} = \frac{I_{пер}}{I_{вх}} = \frac{\tau_o \cdot S_{пер}}{S_{вх}}, \quad (16.2)$$

где

$$\frac{S_{пер}}{S_{ист}} = \frac{1}{\Gamma^2}, \quad (16.3)$$

$\Gamma^2 = S_{ист} / S_{пер}$ – коэффициент увеличения передающей системы.

На основании (16.2) и (16.3) имеем:

$$K_{пер} = \frac{\tau_o}{\Gamma^2}, \quad (16.4)$$

$$I_{пер} = I_{ист} \cdot K_{пер} = \frac{I_{ист} \cdot \tau_o}{\Gamma^2}. \quad (16.5)$$

На основании закона обратных квадратов имеем:

$$E = \frac{I_{ист} \cdot \tau_o \tau_\alpha}{\Gamma^2 \cdot l^2}. \quad (16.6)$$

Из теории отражения объектов можно записать следующие соотношения для потока Фоб, отраженного от объекта 3:

$$\Phi_{об} = \frac{E}{\pi} \cdot \rho \cdot \beta \cdot \cos \alpha \cdot S \quad (16.7)$$

и для потока $\Phi_{фк}$, который сформировался в плоскости фотокатода приемной части ПНВ:

$$\begin{aligned} \Phi_{фк} &= \tau_a \Phi_{об} \cdot \tau_{np} \cdot \sin^2 u = \\ &= \frac{I_{уст} \cdot \tau_o \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{np} \cdot \rho \cdot S}{\pi \cdot l^2 \cdot \Gamma^2} \sin^2 u \cdot \cos \alpha. \end{aligned} \quad (16.8)$$

В свою очередь, яркость изображения объекта на экране ПНВ имеет вид:

$$\begin{aligned} L_g &= \frac{\Phi_{фк} \cdot \eta \cdot K_n}{S_g} = \\ &= \frac{I_{уст} \cdot \tau_o \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{np} \cdot \rho \cdot S \cdot \eta \cdot K_n}{\pi \cdot l^2 \cdot \Gamma^2 \cdot S_g} \sin^2 u \cdot \cos \alpha. \end{aligned} \quad (16.9)$$

где K_n – коэффициент использования ПНВ излучения объекта:

$$K_n = K_g \cdot K_{zn} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) L_o(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_o(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} U(\lambda) L_g(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} L_g(\lambda) \cdot d \cdot d\lambda}, \quad (16.A)$$

$U(\lambda)$ – спектральная чувствительность глаза.

На основании геометрии рис. 16.1 имеем:

$$\frac{S}{S_{\text{э}}} = \frac{l^2}{v_{\text{э}}^2 \cdot f_{\text{об}}^2}, \quad (16.Б)$$

$$\sin u = \frac{d}{2l}, \quad (16.В)$$

где $v_{\text{э}}$ – линейное увеличение ЭОПа; $S_{\text{э}}$ – площадь изображения объекта на экране ЭОПа.

В окончательном виде выражения для яркости изображения объекта и фона на экране ЭОПа ПНВ принимают следующий вид:

$$L_{\text{э}} = \frac{I_{\text{ист}} \cdot \tau_{\text{э}} \cdot \tau_{\text{а}}^2 \cdot \tau_{\text{пр}} \cdot \rho \cdot \beta \cdot \eta \cdot K \cdot d^2}{4\pi \cdot U_{\text{э}}^2 \cdot f_{\text{об}}^2 \cdot l^2 \cdot \Gamma^2} \cdot \cos \alpha; \quad (16.10)$$

17. Теория яркости изображения объекта и фона на экране ПНВ

Общая теория функционирования ПНВ в приближении геометрической оптики разработана в работах. В этой связи воспользуемся результатами этих работ для определения основного функционального параметра – дальности видения и разрешения ПНВ активного и пассивного типов.

17.1. Яркость изображения объекта и фона на экране ПНВ активного типа

Яркость изображения объекта и фона на экране ЭОП ПНВ активного типа выражаются уравнением:

$$\begin{aligned}
 L_s = & \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_{np} \cdot \tau_o \cdot D_{np}^2 \cdot \Phi_u \cdot d^2 \cdot \rho}{16 \cdot \pi \cdot S_u \cdot l^2 \cdot f_{об}^2 \cdot U^2} e^{-2\beta_\alpha l} \cos \alpha + \\
 & + \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_{np} \cdot D_{np}^2 \cdot \Phi_u \cdot d^2 \cdot \beta_\alpha \cdot f(\gamma) \cdot \rho}{64 \cdot \pi \cdot S_u \cdot l^2 \cdot f_{об}^2 \cdot U^2} e^{-2\beta_\alpha l} \cos \alpha + \\
 & + \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_{np} \cdot \tau_o \cdot D_{np}^2 \cdot d^2 \cdot \beta_\alpha^2 \cdot f(\pi - \varepsilon) \cdot c}{32 \cdot \pi \cdot S_u \cdot f_{об}^2 \cdot U^2} [f(2\beta_1 l) - f(2\beta l)] \cdot 10^6 + \\
 & + \frac{K_{эп} \cdot \eta \cdot j}{\pi \cdot \Phi \cdot U^2},
 \end{aligned} \tag{17.1}$$

где K – коэффициент использования излучения системой прибор-глаз;
 η – коэффициент преобразования ЭОП;
 τ_{np} – коэффициент пропускания оптической передающей системы;
 τ_o – коэффициент пропускания оптической приемной системы;
 D_{np} – диаметр оптической передающей системы;
 Φ_u – световой поток источника излучения передающей системы;
 d – диаметр объектива приемной системы;
 S_u – площадь излучателя передающей системы;
 l – расстояние до объекта;
 $f_{об}$ – фокусное расстояние объектива приемной системы ПНВ;
 v – электронно-оптическое увеличение ЭОПа;
 ρ – коэффициент пропускания атмосферы;
 β_α – объемный показатель ослабления атмосферы;
 α – угол между нормалью к локальной поверхности объекта и осью пучка;
 $f(\gamma)$ – индикатриса рассеяния среды;
 γ – угол между осью прожекторного луча и направления на объект;
 ρ – коэффициент диффузного отражения объекта;
 ε – угол между осью прожекторного пучка и визирной осью приемной части ПНВ;
 c – коэффициент усреднения силы излучения прожектора;
 $f(2\beta_\alpha l)$ – табулированная функция;

l_1 – расстояние от вершины прожекторного пучка лучей до точки входа в него визирной оси;

$K_{эл}$ – коэффициент использования глазом излучения экрана;

j – плотность тока термоэлектрической эмиссии фотокатода;

φ – интегральная чувствительность фотокатода ЭОПа.

$$\begin{aligned}
 L_{\varphi\Sigma} = & \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_{np} \cdot \tau_0 \cdot D_{np}^2 \cdot \Phi_u \cdot d^2 \cdot \rho_{\varphi}}{16 \cdot \pi \cdot S_u \cdot I_{\varphi}^2 \cdot f_{\sigma\beta}^2 \cdot U^2} e^{-2\beta_u l_{\varphi}} \cos \alpha_{\varphi} + \\
 & + \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_{np} \cdot \tau_0 \cdot D_{np}^2 \cdot \Phi_u \cdot d^2 \cdot f(\gamma)}{64 \cdot \pi \cdot S_u \cdot I \cdot f_{\sigma\beta}^2 \cdot U^2} e^{-2\beta_u l_{\varphi}} \cos \alpha_{\varphi} + \\
 & + \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_{np} \cdot \tau_0 \cdot D_{np}^2 \cdot \Phi_u \cdot c \cdot d^2 \cdot \beta_{\alpha}^2 \cdot f(\pi - \varepsilon)}{32 \cdot \pi \cdot S_u \cdot f_{\sigma\beta}^2 \cdot U^2} [f(2\beta_{\alpha} l_1) - f(2\beta_{\alpha} l_{\varphi})] \cdot 10^6 + \\
 & + \frac{K_{эл} \cdot \eta \cdot j}{\pi \cdot \varphi \cdot U^2},
 \end{aligned} \tag{17.2}$$

где ρ_{φ} – коэффициент диффузного отражения поверхности фона;

l_{φ} – расстояние до поверхности фона;

α_{φ} – угол между нормалью к локальной поверхности фона и осью прожекторного пучка.

Выражения (17.1) и (17.2), по сравнению с формулами (16.10) и (16.11), носят более общий характер.

Вычитая из выражения (17.1) выражение (17.2), для пороговой разности яркостей запишем следующее соотношение:

$$\begin{aligned}
 \Delta L = & \frac{K_{\lambda} \cdot \eta \cdot \tau_{np} \cdot \tau_0 \cdot D_{np}^2 \cdot \Phi_u \cdot d^2}{16 \cdot \pi \cdot S_u \cdot f_{\sigma\beta}^2 \cdot U^2} \left\{ \frac{\rho e^{-2\beta_u l_{\varphi}} \cos \alpha}{I^2} \times \right. \\
 & \times \left[1 + \frac{\beta_{\alpha} \cdot f(\gamma) \cdot l}{4} \right] - \frac{\rho_{\varphi} e^{-2\beta_u l_{\varphi}} \cos \alpha_{\varphi}}{I_{\varphi}^2} \times \\
 & \left. \times \left[1 + \frac{\beta_{\alpha} \cdot f(\gamma) \cdot l_{\varphi}}{4} \right] + \frac{\beta_{\alpha}^2 \cdot f(\pi - \varepsilon)}{2} [f(2\beta_{\alpha} l_{\varphi}) - f(2\beta_{\alpha} l_1)] \times 10^6 \right\}.
 \end{aligned} \tag{17.3}$$

Следует отметить, что выражение (17.3) рассматривается как основа для расчета дальности видения ПНВ.

Уравнение (17.3) записано для случая максимальной дальности видимости ($l \neq l_\phi$). При определении максимальной дальности разрешения ($l = l_\phi$) это уравнение принимает вид:

$$\Delta L = \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_{np} \cdot \tau_0 \cdot D_{np}^2 \cdot \Phi_u \cdot d^2 \cdot e^{-2\beta_\alpha l}}{16 \cdot \pi \cdot S_u \cdot f_{об}^2 \cdot U^2} \cdot \frac{1}{l^2} \times \left[1 + \frac{\beta_\alpha \cdot f(\gamma) \cdot l}{4} \right] - (\rho_\phi \cos \alpha - \rho \cos \alpha_\phi). \quad (17.4)$$

Методика определения максимальной дальности видения и разрешения ПНВ сводится к вычислению значения l соответственно из формул (17.3) и (17.4) при выполнении следующего условия: $\Delta L \geq \Delta L_{пор}$, где $\Delta L_{пор}$ – пороговое значение абсолютного контраста.

17.2. Яркость изображения объекта и фона на экране ПНВ пассивного типа

Яркость изображения объекта на экране ЭОПа выражается в виде:

$$L_{ЭЭ} = \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_0 \cdot L_H \cdot d^2 \cdot \rho}{4 \cdot f_{об}^2 \cdot U^2} e^{-\beta_\alpha l} + \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_0 \cdot L_H \cdot d^2}{4 \cdot f_{об}^2 \cdot U^2} (1 - e^{-\beta_\alpha l}) + \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_0 \cdot E_n \cdot d^2 \cdot \rho}{4 \cdot \pi \cdot f_{об}^2 \cdot U^2} e^{-\beta_\alpha l} \cos \alpha_n + \frac{K \cdot \eta \cdot j}{K_0 \cdot \pi \cdot \Phi \cdot U^2} \quad (17.5)$$

где α_n – угол между нормалью к элементу поверхности объекта и направлением на Луну;

E_n – освещенность от Луны;

K_0 – коэффициент использования излучения фотокатодом ЭОПа;

L_H – энергетическая яркость излучения ночного неба.

Для яркости изображения фона на экране ЭОПа можно записать выражение:

$$L_{\phi\Sigma} = \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_0 \cdot L_H \cdot d^2 \cdot \rho_{\phi}}{4 \cdot f_{\phi 0}^2 \cdot U^2} e^{-\beta_{\alpha} l_{\phi}} + \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_0 \cdot L_H \cdot d^2}{4 \cdot f_{\phi 0}^2 \cdot U^2} (1 - e^{-\beta_{\alpha} l_{\phi}}) + \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_0 \cdot E_n \cdot d^2 \cdot \rho_{\phi}}{4 \cdot \pi \cdot f_{\phi 0}^2 \cdot U^2} e^{-\beta_{\alpha} l_{\phi}} \cos \alpha_{\phi n} + \frac{K \cdot \eta \cdot j}{K_0 \cdot \pi \cdot \Phi \cdot U^2}, \quad (17.6)$$

где $\alpha_{\phi n}$ – угол между нормалью к элементу поверхности фона и направлением на Луну.

В случае определения максимальной дальности видения ($l \neq l_{\phi}$), пороговая разность яркостей запишется в виде:

$$\Delta L = \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_0 \cdot d^2 \cdot L_H}{4 \cdot f_{\phi 0}^2 \cdot U^2} \left\{ e^{-\beta_{\alpha} l} \left[\rho \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_n \right) - 1 \right] - e^{-\beta_{\alpha} l} \phi \left[\rho_{\phi} \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_{\phi n} \right) - 1 \right] \right\}. \quad (17.7)$$

Для случая расчета максимальной дальности разрешения ($l = l_{\phi}$) пороговая разность яркости запишется в виде:

$$\Delta L = \frac{K \cdot \eta \cdot \tau_0 \cdot d^2 \cdot L_H}{4 \cdot f_{\phi 0}^2 \cdot U^2} \left\{ e^{-\beta_{\alpha} l} \left[\rho \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_n \right) - 1 \right] - e^{-\beta_{\alpha} l} \phi \left[\rho_{\phi} \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_{\phi n} \right) - 1 \right] \right\}. \quad (17.8)$$

Выведем теперь уравнение для аналитического расчета максимальной дальности видения и максимальной дальности разрешения ПНВ пассивного типа. Для этого решим уравнение (17.7) относительно

$$e^{-\beta_{\alpha} l} = \tau_a$$

$$e^{-\beta_{\alpha} l} = \frac{\Delta L \frac{4 \cdot f_{\sigma 6}^2 \cdot U^2}{K \cdot \eta \cdot \tau_0 \cdot d^2 \cdot L_H} + e^{-\beta_{\alpha} l_{\psi}} \left[\rho_{\hat{\psi}} \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_{\hat{\psi}n} \right) - 1 \right]}{\rho \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_n \right) - 1}, \quad (17.9)$$

Прологарифмировав данное выражение и произведя соответствующее преобразование, получим выражение для расчета максимальной дальности видения ПНВ:

$$l_M = \frac{1}{\beta_{\alpha}} \left\langle l_n \left[\rho \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_n \right) - 1 \right] - \right. \\ \left. - l_n \left\{ \Delta L \frac{4 \cdot f_{\sigma 6}^2 \cdot U^2}{K \cdot \eta \cdot \tau_0 \cdot d^2 \cdot L_H} + e^{-\beta_{\alpha} l_{\psi}} \left[\rho_{\hat{\psi}} \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_{\hat{\psi}n} \right) - 1 \right] \right\} \right\rangle \\ e^{-\beta_{\alpha} l} = \frac{\Delta L \cdot 4 \cdot f_{\sigma 6}^2 \cdot U^2}{K \cdot \eta \cdot \tau_0 \cdot d^2 \cdot L_H \cdot \left[\rho \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_n \right) - \rho_{\hat{\psi}} \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_{\hat{\psi}n} \right) \right]} \quad (17.10)$$

$$e^{-\beta_{\alpha} l} = \tau_{\alpha} :$$

Решим теперь уравнение (17.8) относительно

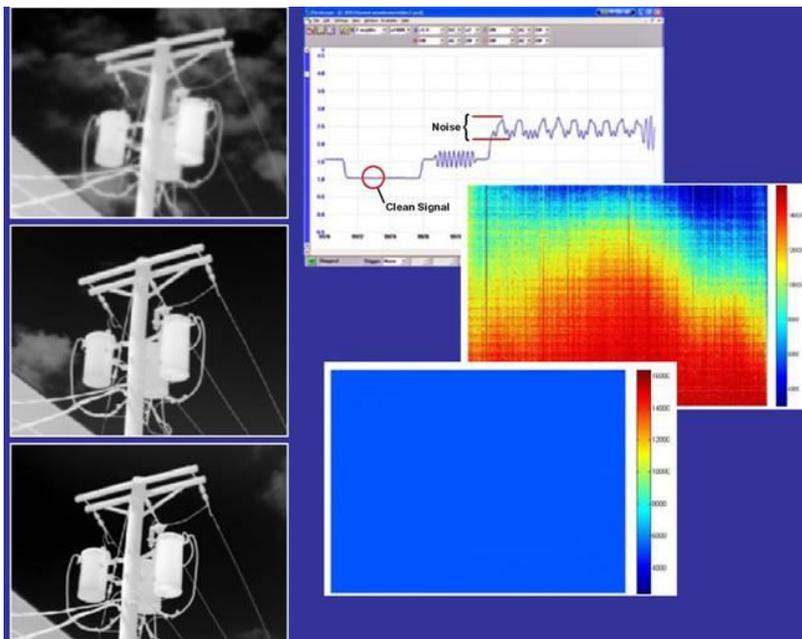
$$e^{-\beta_{\alpha} l} = \frac{\Delta L \cdot 4 \cdot f_{\sigma 6}^2 \cdot U^2}{K \cdot \eta \cdot \tau_0 \cdot d^2 \cdot L_H \cdot \left[\rho \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_n \right) - \rho_{\hat{\psi}} \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_{\hat{\psi}n} \right) \right]} \quad (17.11)$$

Прологарифмировав данное выражение и произведя соответствующие преобразования, получим формулу для расчета максимальной дальности разрешения ПНВ:

$$I_M = \frac{1}{\beta_\alpha} \left\langle I_n \left[\rho \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_n \right) - 1 \right] - \right. \\ \left. - I_n \left\{ \Delta L \frac{4 \cdot f_{об}^2 \cdot U^2}{K \cdot \eta \cdot \tau_0 \cdot d^2 \cdot L_H} + e^{-\beta_\alpha / \phi} \left[\rho_{\dot{\phi}} \left(1 + \frac{E_n}{\pi \cdot L_H} \cos \alpha_{\dot{\phi}} \right) - 1 \right] \right\} \right\rangle.$$

18. Факторы, влияющие на изображения тепловизора

18.1. Факторы, влияющие на качество изображения тепловизора



Так как принцип действия инфракрасной камеры основан на преобразовании температурной картины в визуальную, то для оценки качества получаемого изображения достаточно знания следующих параметров: **разрешение получаемого изображения, температурная чувствительность матрицы и уровень шума.**

Ниже мы постараемся объяснить, исходя из каких параметров определяется качество изображения, а также зависимость качества картинки от значений параметров. Мы подробно разберем все три параметра, напрямую влияющих на качество теплового изображения и обсудим возникающие вопросы.

18.1.1. Разрешение ИК-камеры.

Первый параметр – разрешение получаемого термочувствительного изображения. На сегодняшний день существует три принятых стандарта разрешения изображений (могут различаться у разных производителей):

1. Низкое разрешение – до 19600 пикселей (160x120 точек).
2. Среднее разрешение – до 76800 пикселей (320x240 точек).
3. Высокое разрешение – до 307200 пикселей (640x480 точек).

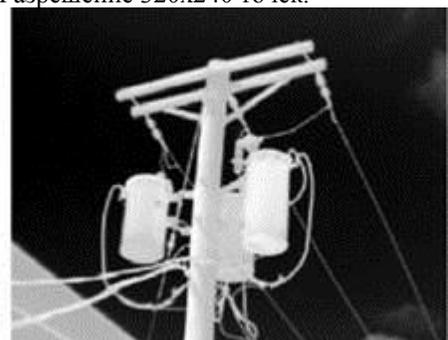
Нужное вам разрешение, определяется, в первую очередь, используемым приложением для обработки изображения и уровнем качества, устанавливаемым вами вручную в установках. При оценке качества изображения камер с матрицами размером 5 мегапикселей и 10 мегапикселей, большинство пользователей не заметят никакой разницы, так как отпечатать изображение с таким разрешением довольно проблематично. В том случае, если вы собираетесь всегда распечатывать и демонстрировать полное разрешение, получаемое тепловизором, то вам достаточно использовать прибор с более скромными параметрами. Даже при разрешении 640x480 пикселей, получаемое тепловое изображение будет занимать лишь часть дисплея современного компьютера и при выводе на печать требуемое качество будет реализовано в полной мере. Поэтому при оценке качества изображений, получаемых с помощью инфракрасных камер – число пикселей матрицы является важным параметром, но наиболее значимым параметром является уровень разрешения изображения.



Разрешение 160x120 точек.



Разрешение 320x240 точек.



Разрешение 640x480 точек.

Еще одним преимуществом высокого разрешения является возможность масштабирования съемки без потери качества изображения. Основная часть тепловизоров оснащена стандартной оптической системой с горизонтальным углом обзора около 25° .

Независимо от числа пикселей, качество изображения прибора с разрешением 640x480 точек, установленного на двукратное

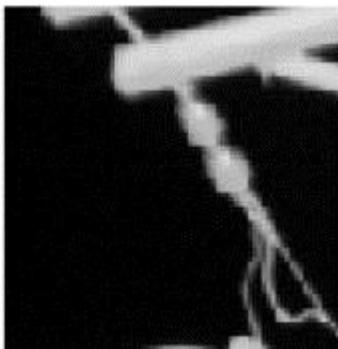
увеличение, эквивалентно качеству, получаемому ИК-камерой с разрешением 320x240 точек, с дорогостоящей дополнительной линзой с углом обзора 12°. Если у вас возникнет необходимость в тестировании объектов на расстоянии более 20 футов, то необходимо сделать ценовой выбор между покупкой ИК-камеры с разрешением 320x240 точек с дополнительной оптикой и камеры с разрешением 640x480 точек, для получения изображений одинакового качества.



Разрешение 160x120 точек, 4-кратное увеличение.



Разрешение 320x240 точек, 4-кратное увеличение.



Разрешение 640x480 точек, 4-кратное увеличение.

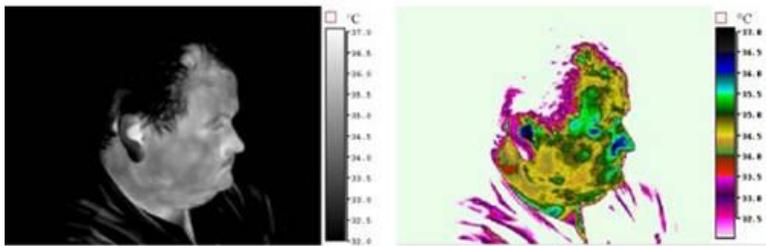
18.1.2. Тепловая чувствительность.

Тепловая чувствительность пикселя является вторым по значимости параметром, влияющим на качество картинки. Из множества тестов, определяющих количественную характеристику этого параметра, наиболее значимый тест – оценка качества изображения при увеличении контрастности. Диапазон термочувствительности тепловизора изменяется, в зависимости от температуры объекта, так как при увеличении температуры растет уровень сигнала на выходе детектора. Это означает, что улучшается соотношение сигнал/шум при тестировании горячих объектов. Но это не всегда положительное качество, так как встречаются ситуации, в которых температура объекта невысокая и разность температур различных участков объекта небольшая. Типичным примером низкого дифференциала температур объекта служит обследование стен внутри здания. Небольшие различия в температуре фиксируются только за счет увеличения контрастности между исследуемой (в которой определяется температура) и контрольной (в которой температура известна) точками. Термочувствительность датчиков инфракрасных камер лежит в диапазоне 0,05-0,25 К. Хотя чувствительность в четверть градуса довольно высокая, на низкоконтрастном изображении (температурная разность точек объекта невысокая) становятся заметными шумы. Тепловизоры отображают тепловую картину объекта, используя 256-цветовую палитру либо 256 градаций серого. Представьте, что разность температуры объекта 0-256°C, и каждый оттенок отображает разницу в 1°C. Теперь применим этот же метод к объектам с температурным диапазоном 25-35°C. Теперь каждый оттенок отображает разность 0,03°C, что меньше реальной чувствительности

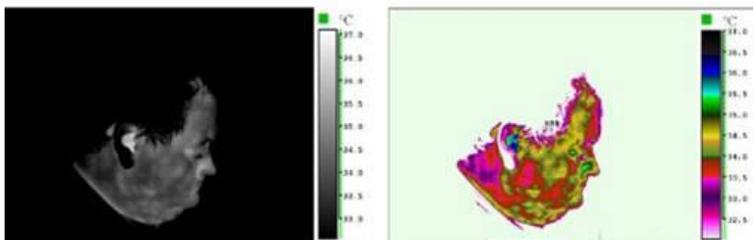
неохлаждаемых камер. В результате на изображении возникают шумы и погрешности. В некоторых ситуациях необходимо установить как можно более узкий диапазон чувствительности, чтобы увидеть малейшую разницу температуры. Если вы используете прибор чувствительностью $0,25^{\circ}\text{C}$ и требуется поддерживать такой же уровень шума, то устанавливается температурный диапазон не уже 65°C , при котором получается низкоконтрастная картинка. Вы должны усвоить, что различие между ИК-камерами с чувствительностью 50mK и 100mK составляет 100%, а не $0,05^{\circ}\text{C}$.



Разрешение 160×120 , чувствительность 100 мК . Чувствительность 100 мК подходит для случаев температурного диапазона более 10°C . При сужении диапазона качество изображения существенно падает.

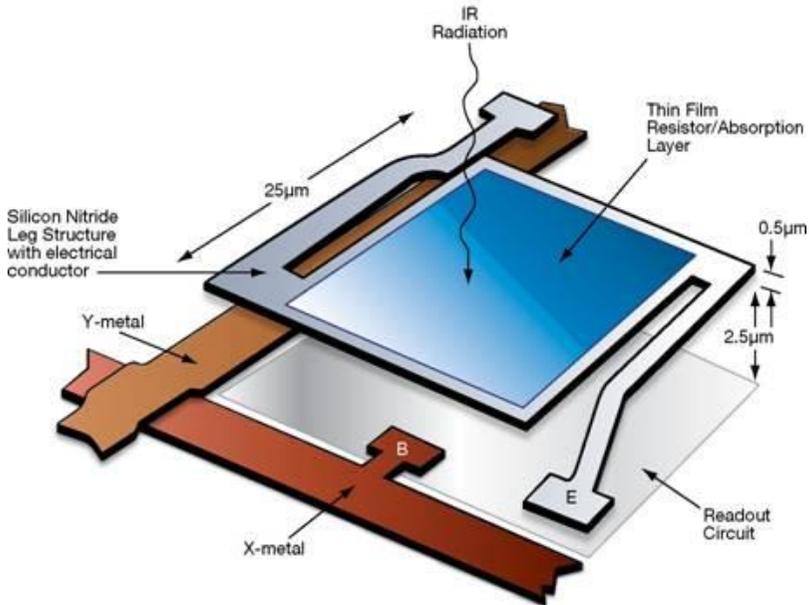


Разрешение 320x240, чувствительность 70 мК. Чувствительность 70 мК сужает диапазон по 5°C, при сохранении качества картинки.

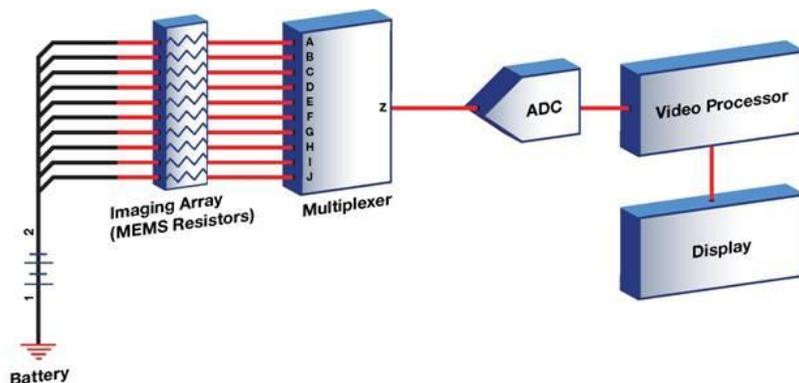


Разрешение 640x480, чувствительность 50 мК. При чувствительности 50 мК получается самое качественное изображение, соперничающее с качеством изображений, получаемых на охлаждаемых камерах.

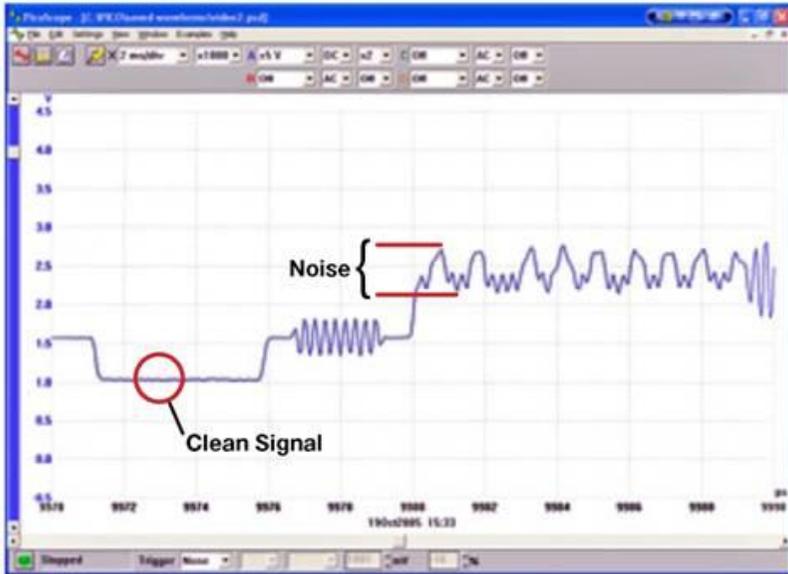
18.1.3. Уровень шума (отношение сигнал/шум).



Основу строения пикселя неохлаждаемой инфракрасной камеры составляет микроскопический переход между тонкой пленкой резистивного материала и регистрирующим инфракрасное излучение слоем, расположенными на подложке. Выводы, выходящие с поверхностей перехода, подключены к кремниевой интегральной схеме и передают на нее электрические сигналы считывания. Считывание происходит последовательно с каждого пикселя по методу мультиплексирования и использует протокол ИС. Инфракрасное излучение, с длиной волн 8-14 микрон, попадающее на каждый пиксель, преобразуется в тепло, которое изменяет сопротивление тонкой резистивной пленки. Схема считывания последовательно снимает напряжение, пропорциональное количеству теплоты, с каждого «микро-болометра» и создает видеоизображение в режиме реального времени.



Электрическая схема инфракрасного датчика довольно простая. На каждый пиксель подается напряжение смещения, а изменение сопротивления резистивной пленки, основанное на температуре пикселя, переводится в цифровое значение. Каждый аналоговый сигнал содержит некоторый уровень шума в смеси с сигналом, детектируемым датчиком. Отношение сигнал-шум оказывает сильное влияние на качество изображения, так как схема усиления увеличивает и полезный сигнал, и шумовую компоненту. В результате на изображении появляется «снег».



Отношение уровня сигнала к уровню шума обычно определяется как эквивалентная разность температур. Как и в любой электрической схеме, шумы возникают практически во всех компонентах. Наибольшее значение, определяющее значение сигнал/шум, имеет уровень шума, поступающий с термочувствительных датчиков, так как в дальнейшем он усиливается пропорционально усилению полезного сигнала. Поэтому температурная чувствительность в большой степени влияет на качество получаемого термоизображения.

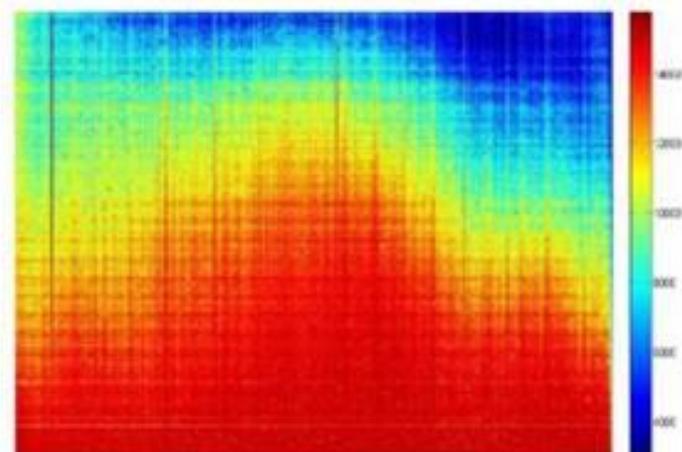
Также немаловажное значение имеет фокусное расстояние объектива камеры. Объективы с фокусным расстоянием 1,0 (равным диаметру объектива) считаются «быстрыми». Увеличение фокусного расстояния сказывается на качестве работы прибор. Например, оптическая система с $F=1,4$ уменьшает тепловую чувствительность в 2 раза, система с $F=2,0$ уменьшает термочувствительность и 4 раза. Поэтому чувствительность системы 50 мК будет равна 100 мК при использовании оптики с $F=1,4$, что приемлемо. Однако, при использовании «медленной» оптики ($F>1$), термочувствительность систем 100 мК падает до неприемлемых 200 мК.

Как вы поняли из вышесказанного, температурная чувствительность имеет очень сложную зависимость о многих факторов. Однако вы можете судить о качестве изображения, используя самый совершенный

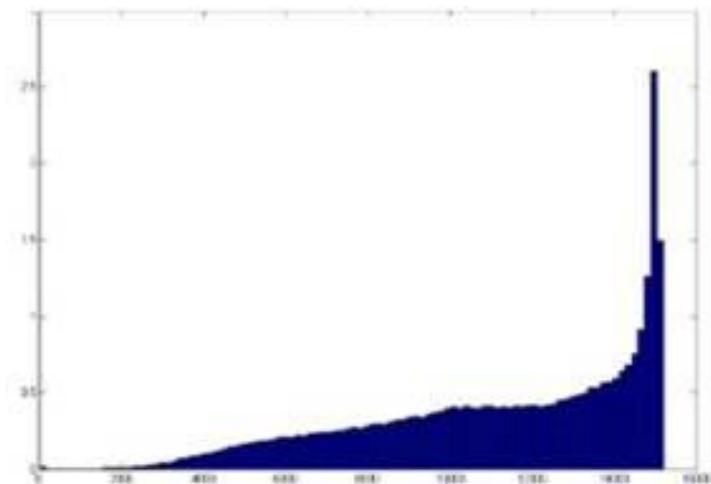
прибор в мире – ваши глаза, которые различают малейшие нюансы в визуальной картине.

Как было показано выше, термочувствительная матрица состоит из множества микроболометров, представляющих собой крошечные резисторы с множеством связей между ними. Каждый терморезистор реагирует на инфракрасное излучение с определенной погрешностью. Увеличение диапазона погрешностей связано с увеличением плотности пикселей и их термочувствительности. Для исправления этой погрешности используется процесс, носящий название «неравномерная калибровка» (NUC).

Во время изготовления, датчик тепловизора должен быть нормализован. Другими словами, при отсутствии сигнала уровень напряжения с каждого датчика матрицы должен иметь нулевое значение.



Неисправленное изображение.



Гистограмма неисправленного изображения.



Исправленное изображение.



Гистограмма скорректированного изображения.

Выше приведены примеры нескорректированного и исправленного изображений, а также их гистограммы. Для корректировки используется специальный экран, который устанавливается перед термочувствительным датчиком. Этот экран периодически затемняет датчик и происходит программная коррекция показаний пикселя к нулю.

Рассмотрим 2 теста, на основании которых делается заключение о значении отношения полезный сигнал/шум.

Первый тест определяет наименьшую разность температуры объекта, эквивалентную внутренней шумовой характеристике детектора или общему уровню шума прибора. Как потенциальному покупателю тепловизора, вам необходимо знать результаты этого теста. Тестовая установка состоит из черного тела, обладающего контрольной температурой, и нескольких объектов, расположенных рядом с контрольным телом, для одновременного наблюдения их на экране инфракрасной камеры. Температура черного тела устанавливается как можно ближе к температуре объектов. К выходу детектора или видеовыходу тепловизора подключают осциллограф, на экране которого хорошо видно отношение зарегистрированной разницы температур к уровню шума. Оно определяется как отношение высоты полезного сигнала к высоте шума на экране осциллографа.

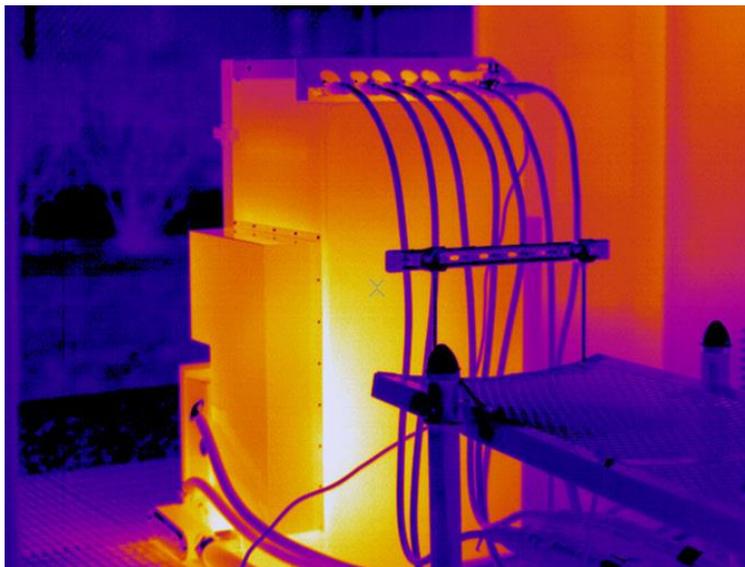
Следующий тест определяет минимальную регистрируемую разность температур. Это тест системы, а не датчика. Проверку проводят последовательным наблюдением картины каждого из трех эталонных объектов на экране ИК-камеры. Эталонный объект представляет собой

белую пластину, с нанесенными на нее четыремя полосками. Объекты различаются только цветом полосок. На первом объекте полоски черные (разность температур $0,25^{\circ}\text{C}$), на втором – серые (разность температур $0,05^{\circ}\text{C}$), на третьем нет полос (разность температур 0°C). В обоих тестах значение контрольной температуры равно 30°C .

Преимущества повышенного качества теплового изображения:

1. Появляется возможность проводить проверку объектов, находящихся на более длинных расстояниях от оператора.
2. Становится возможной более контрастная визуализация низкотемпературных объектов.
3. Более понятная на интуитивном уровне диагностика проблем, связанных с тепловым излучением.
4. Улучшение качества изображения, за счет согласования разрешения камеры в инфракрасной и видимой областях.
5. Удобное подключение дополнительных (более легких и дешевых) оптических систем.
6. Более понятное на интуитивном уровне выявление неисправностей, связанных с несоответствием температуры.

18.2. Факторы, влияющие на точность измерения температуры



Факторы, влияющие на точность измерения температуры, учет их влияния при выполнении диагностирования

18.2.1. Правильность калибровки измерительной аппаратуры

Все применяемые при тепловизионной диагностике приборы должны быть поверены в установленном порядке и иметь соответствующие аттестаты. Тем не менее, регулярная проверка калибровки необходима для всякого измерительного прибора, в том числе и для приборов инфракрасной техники. Рекомендуется делать это перед началом каждой конкретной работы с инфракрасной системой.

Имеются несколько простых способов оценки калибровки тепловизионного оборудования:

1. проверка по внутренним уголкам глаз человека
2. проверка по сосуду с тающим льдом и по кипящей воде, с поправкой

3. использование эталона абсолютно черного тела для того же диапазона

Внимание! Проверять калибровку пирометров, снабженных лазерным указателем линии визирования данным способом недопустимо, поскольку это может привести к травмированию глаз!

При экспресс-калибровке следует убедиться в том, что используются правильные поправочные параметры, в том числе относительная влажность, расстояние до объекта, температура фона, относительная излучательная способность и коэффициент пропускания (в коротковолновых системах).

Если калибровка находится вне допустимых пределов, инфракрасную систему необходимо калибровать на предприятии-изготовителе.

18.2.2. Излучательная способность поверхности обследуемого

Излучательная способность (коэффициент излучения) является самым значительным источником ошибки при измерении температуры инфракрасными приборами, особенно в длинноволновом диапазоне и при больших температурах.

Следует очень осторожно относиться к значениям коэффициента излучения (КИ), приведенным в различной справочной литературе, особенно для материалов и изделий с низкими КИ, т. к. он зависит от многих факторов (состояния поверхности, ее температуры, угла наблюдения и т. д.). Эти значения можно использовать только для приблизительной оценки измеряемых температур. В ответственных случаях лучше определить его экспериментально.

18.2.3. Настройки измерительной аппаратуры.

Важно получать ИК изображения как можно более высокого качества. Наиболее важные свойства хорошего изображения таковы:

1. сфокусированность изображения;
2. ракурс, при котором ясно видно те детали термоизображения, которые необходимо увидеть;

3. правильно выбранный температурный диапазон и интервал измерения температуры;
4. правильно установленные: атмосферная температура, расстояние до объекта, влажность воздуха, температура окружающих объект предметов и т. п.;
5. цветовая палитра, при которой все детали термограммы видны четко и контрастно.

18.2.4. Особенности структуры и геометрии обследуемой поверхности.

Зазоры, щели, полости, внутренние поверхности двухгранных и трехгранных углов, образующихся в местах стыков плоских поверхностей, излучают тепловую энергию с большей интенсивностью, чем плоские поверхности.

Из-за многократных отражений потока излучения внутри них, зазоры, щели и полости почти всегда кажутся более теплыми, чем поверхность вокруг них вследствие того, что их КИ более высокий, чем КИ окружающей их поверхности, т.е. практически вся энергия падающего инфракрасного излучения поглощается ими и отраженная энергия практически отсутствует (см. рис. 1).

Поэтому, если обследуется поверхность с низким коэффициентом излучения (высокой отражающей способностью), то полостные излучатели могут оказаться очень полезными, т.к. они позволят получить представление о действительной температуре объекта. Отверстия под болты, резьба, уголки, даже царапины, могут сказать многое об истинной температуре.

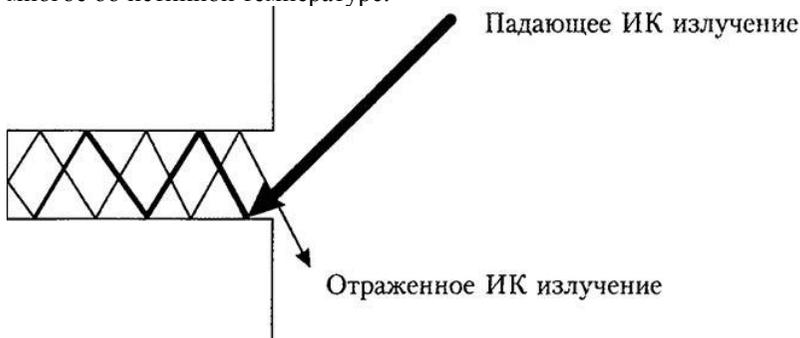


Рис. 18.1. Поток ИК излучения в полостном излучателе

Когда глубина полости в несколько раз больше ее ширины, относительная излучательная способность (коэффициент излучения) полостного излучателя может достигать величины 0,98. Это справедливо даже для материала с низким коэффициентом излучения (высокой отражающей способностью)!

18.3. Цветные тепловые изображения с тепловизора.

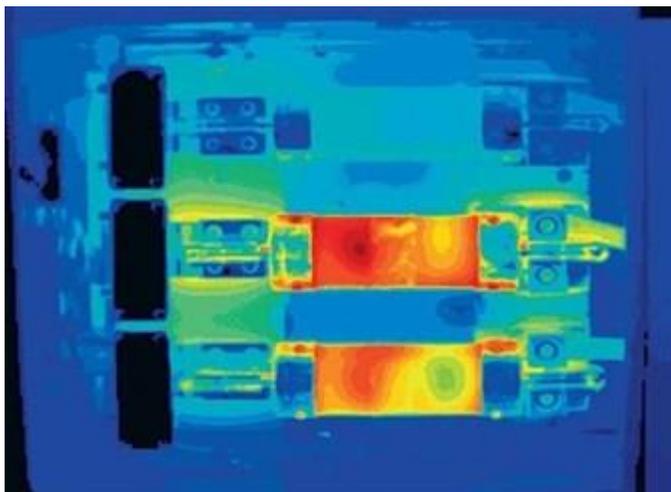


Рис.18.2.

«Горячее пятно» на тепловом изображении не всегда указывает на основную проблему. может быть вышедшим из строя верхний предохранитель, а так же могут быть проблемы с центральным предохранителем.

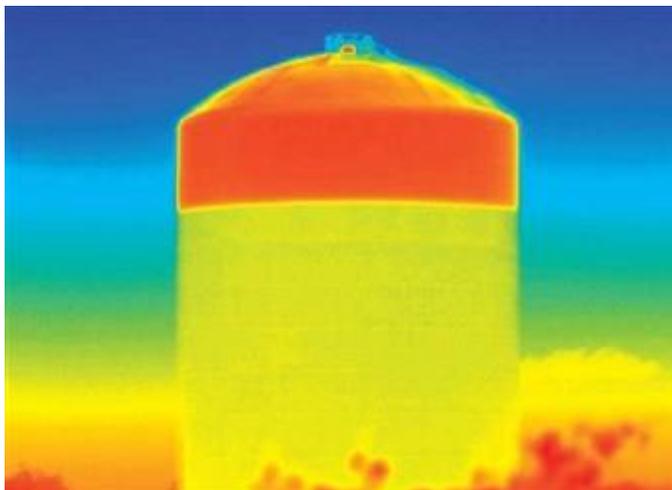


Рис.18.3.

При определенных условиях, уровень жидкости в емкости легко обнаружить.

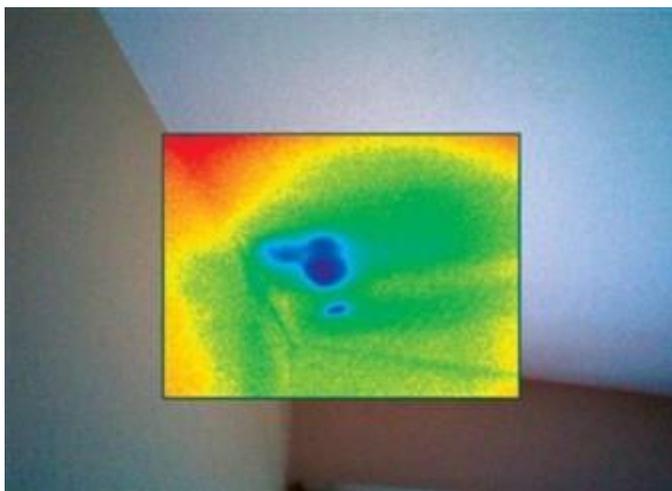


Рис.18.4.

Голубое (или темное) пятно на тепловом изображении показывает область с наличием влаги на потолке.

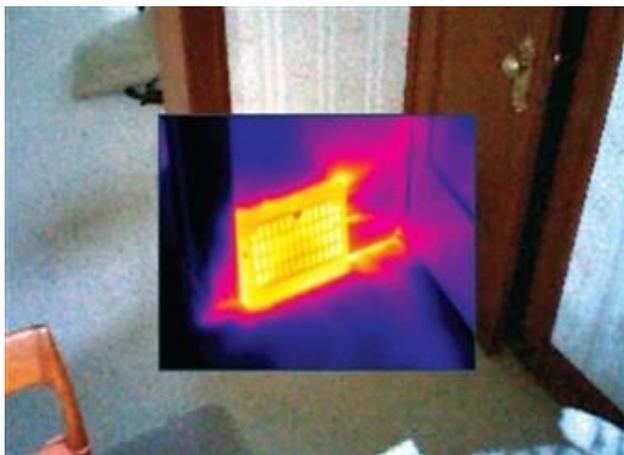


Рис.18.5.

Более светлые расплывчатые следы на тепловом изображении «картинки в картинке» выпускной заслонки указывают на воздушные течи в месте выхода воздушного канала.

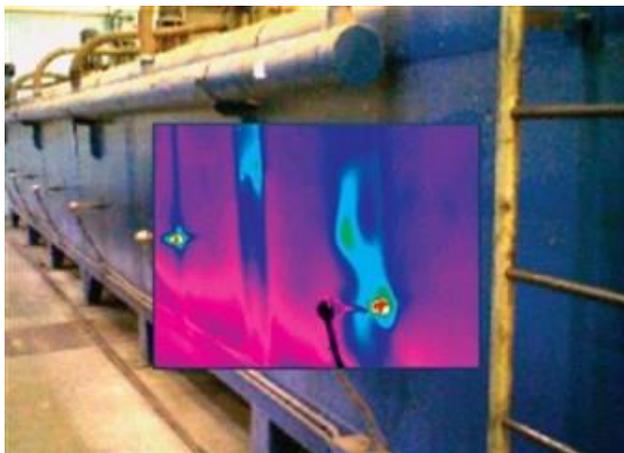


Рис.18.6.

Тепловые следы на печи отжига могут указывать на возможный износ огнеупорной футеровки.

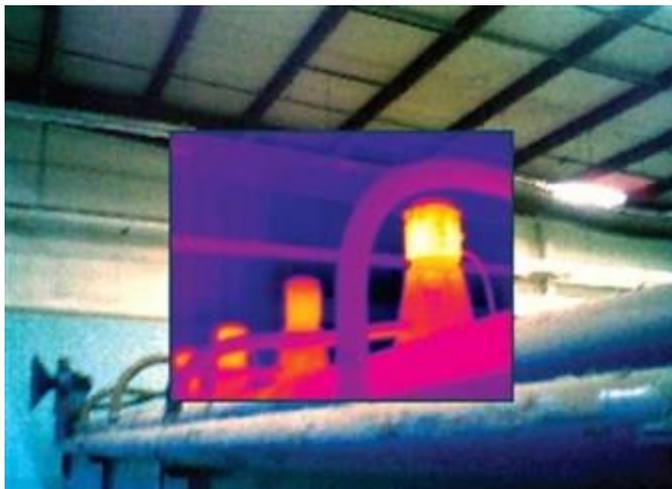


Рис.18.7.

Двигатель вентилятора циркуляции на правой части данной печи отжига может быть неисправен, поскольку его рабочая температура выше, чем у других.

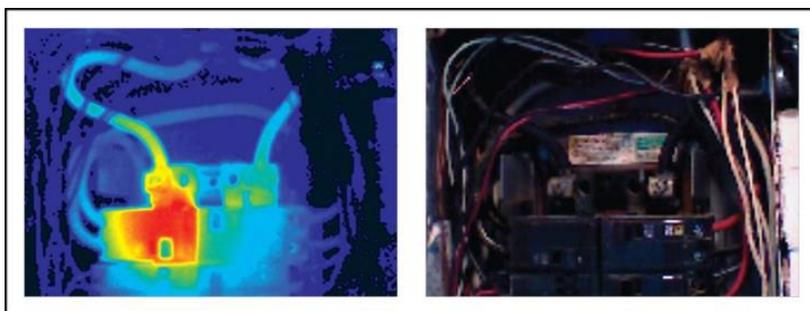


Рис.18.8.

Соединение с высоким сопротивлением или неисправный элемент автоматического разъединителя в жилых зданиях просто увидеть с помощью тепловизора, но не видно на обычном изображении.

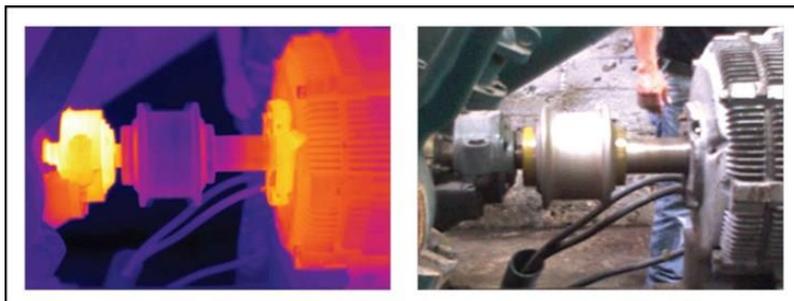


Рис.18.9

Хотя на тепловом изображении двигателя и сцепления видны тепловые следы с обеих сторон, что может свидетельствовать о проблеме соосности сцепления, на изображении в видимом свете признаков неисправности нет.

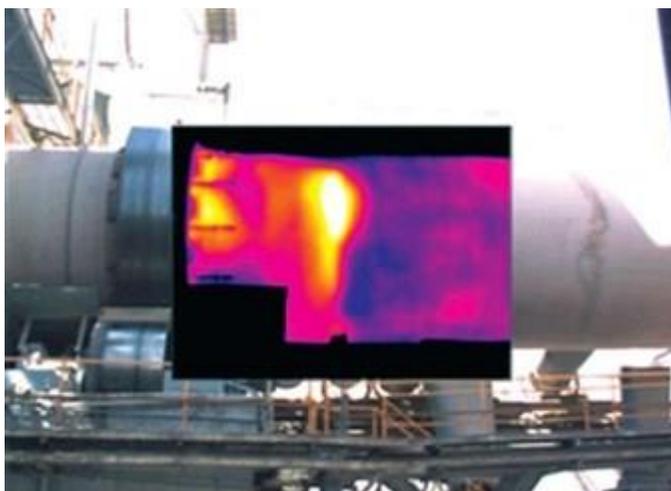


Рис.18.10.

Тепловидение можно использовать для контроля состояния футеровки во времени и выявлять проблемные зоны в цементных печах и другом промышленном оборудовании.

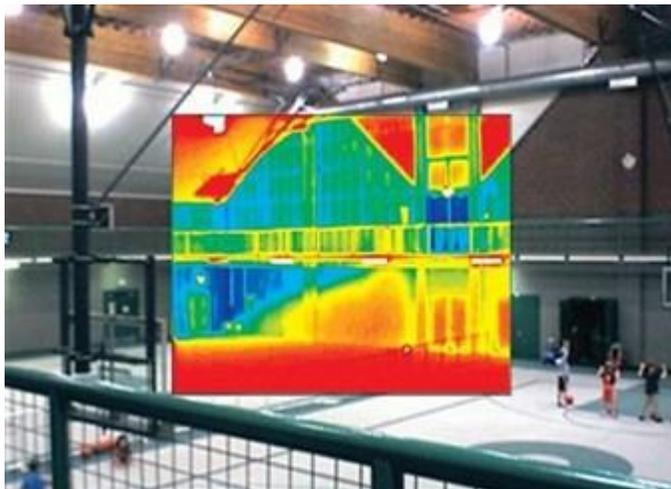


Рис.18.11.

Тепловидение можно использовать для того, чтобы увидеть скрытые строительные и другие элементы, например, земляной уступ снаружи данного гимнастического зала.



Рис.18.12.

Цилиндр дизельной электростанции, в котором происходит пропуск зажигания имеет более низкую температуру, чем нормально работающие цилиндры.

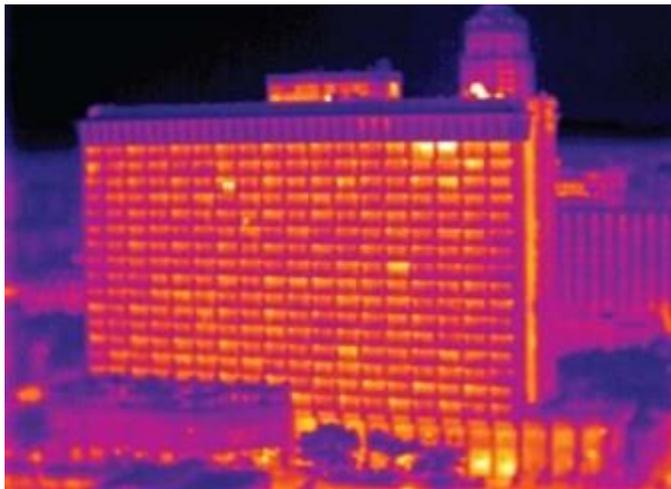


Рис.18.13.

Тепловизоры можно использовать для осмотра больших зданий и цехов для выявления неожиданных изменений температуры, которые могут указывать на возможные проблем.

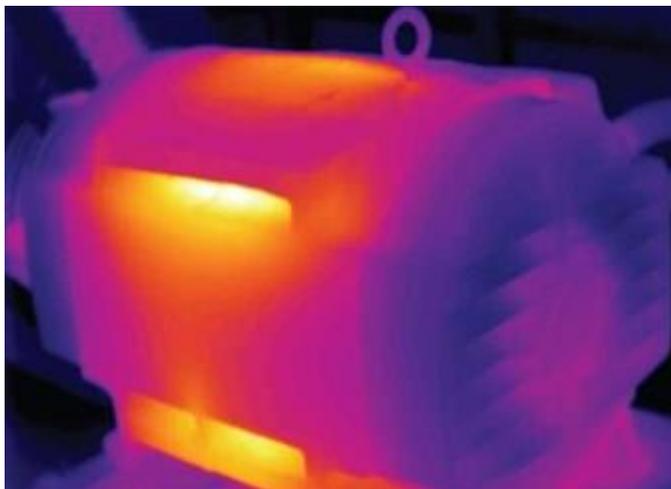


Рис.18.14.

Тепловое изображение нормально работающего двигателя в системе кондиционирования воздуха показывает рассеивание тепла через вентиляционные отверстия.

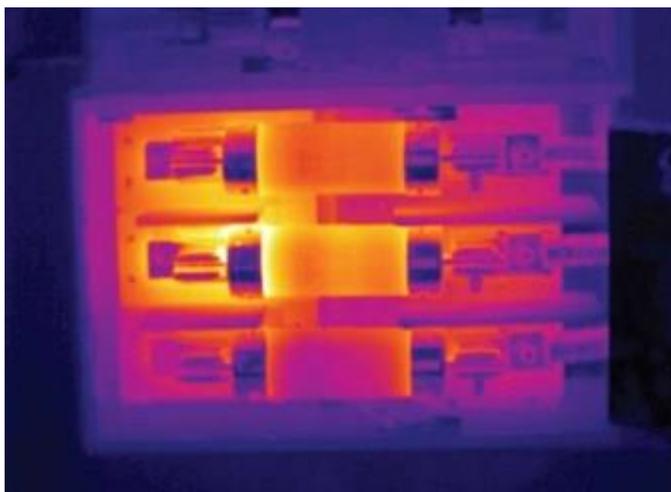


Рис.18.15

Область светлого цвета на изображении блока предохранителей указывает на возможные проблемы связанные с высоким сопротивлением или на внутренние проблемы на центральной фазе.

19. Тепловизоры с электронным сканированием

19.1. Структурные и функциональные схемы тепловизоров с электронным сканированием

19.1.1. Тепловизоры с видиконом.

В передающей камере тепловизора с электронным сканированием изображение наблюдаемого объекта проецируется с помощью оптической системы на мишень телевизионной передающей трубки типа видикон, чувствительной к коротковолновому инфракрасному излучению, которая преобразует электронное изображение в видеосигнал (рис.19.1).

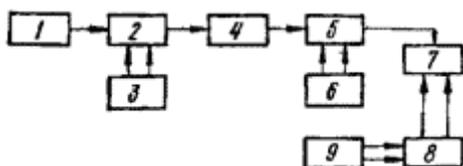


Рис. 19.1. Структурная схема тепловизора с электронным сканированием: 1 — оптическая система; 2 — блок передающей телевизионной трубки; 3 — блок кадровой и строчной разверток передающей трубки; 4 — предварительный усилитель видеосигнала; 5 — видеотракт; 6 — генератор гасящих и синхронизирующих импульсов; 7 — блок приемной телевизионной трубки; 8 — блок кадровой и строчной разверток приемной трубки; 9 — блок синхронизации

Для развертки изображения на отклоняющую систему трубки подаются напряжения пилообразной формы строчной и кадровой частот, вырабатываемые блоком развертки. Согласование во времени движения электронного луча по экрану приемной трубки с движением луча по мишени передающей трубки осуществляется с помощью синхронизирующих импульсов, подаваемых вовремя обратного хода луча. При этом системы развертки передающей и приемной трубок должны работать синхронно и синфазно.

Синхронизирующие импульсы формируются на передающей части телевизионной системы и замешиваются в видеосигнал. Видеосигнал, состоящий из сигнала изображения, гасящих и синхронизирующих импульсов, называется полным телевизионным сигналом. Он поступает на приемную телевизионную трубку, изменяя яркость свечения экрана. Для получения изображения электронный луч приемной трубки перемещается по плоскости экрана под воздействием напряжений пилообразной формы строчной и кадровой частот, вырабатываемых блоком разверток. Одновременно с подачей на приемную трубку телевизионный сигнал поступает на блок синхронизации, где синхронизирующие импульсы выделяются из него, разделяются на строчные и кадровые и поступают на соответствующие генераторы блока разверток приемной трубки. Тепловизор с электронным сканированием содержит следующие основные блоки:

оптическую систему, представляющую собой объектив, изготовленный из оптического материала, который пропускает инфракрасное излучение в спектральном диапазоне чувствительности видикона;

блок передающей телевизионной трубки, состоящий из самой передающей трубки, чувствительной к инфракрасному излучению, а также из фокусирующей и отклоняющей системы (ФОС). Последняя состоит из двух пар катушек для отклонения электронного луча по горизонтали и вертикали. Поверх этих катушек помещается фокусирующая катушка.

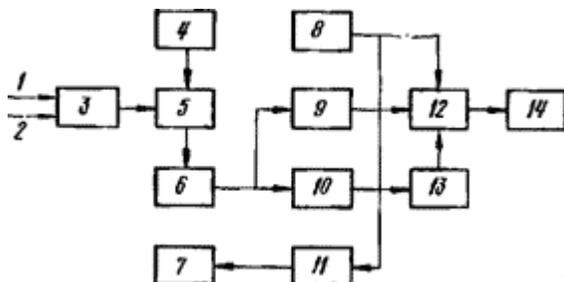


Рис. 19.2. Структурная схема тепловизора АТП-103:

1 — излучение испытуемого объекта; 2 — излучение эталона; 3 — объектив, 4 — ФОС; 5 — электронно-лучевая трубка; 6 — усилитель; 7 — индикатор; 8 — формирователь строка; 9 — формирователь теплопортрета; 10 — привязка к уровню; 11 — устройство сравнения; 12 — сумматор; 13 — формирователь изотерма; 14 — ВКУ

Иногда для повышения качества изображения в ФОС вводят корректирующие катушки, исправляющие траекторию луча на краях раstra. Габариты ФОС отечественного производства: диаметр 60 мм, длина 115...142 мм;

блок кадровой и строчкой развертки, вырабатывающий периодически изменяющиеся напряжения, подаваемые в ФОС для отклонения электронного луча передающей трубки в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Генератор строчной развертки генерирует пилообразные напряжения с частотой 15625 Гц (при стандарте разложения 625 строк и 25 кадров/с), а генератор кадровой развертки — пилообразные напряжения с частотой 50 Гц; предварительный усилитель видеосигналов;

видеотракт, состоящий из видеоусилителя и ряда каскадов, необходимых для замешивания в видеосигнал различных служебных сигналов. На выходе видеотракта получается полный телевизионный сигнал положительной полярности с размахом порядка 1 В. на нагрузке 75 Ом и отношением сигнал/шум, равным 30 в полосе частот от 50 Гц до 7,5 МГц.

синхрогенератор, вырабатывающий кадровые синхронизирующие импульсы, кадровые и строчные гасящие импульсы приемной и передающей трубок;

блок синхронизации, выделяющий из полного телевизионного сигнала синхронизирующие импульсы, которые поступают на блок развертки приемной телевизионной трубки;

блок приемной телевизионной трубки, состоящий из самой приемной трубки (кинескопа) и ФОС;

блок кадровой и строчной разверток, вырабатывающий периодически изменяющиеся напряжения, подаваемые в ФОС для отклонения электронного луча в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

К тепловизорам с электронным сканированием относится прибор АТП-103 (рис. 19.2), предназначенный для анализа тепловых полей и разработанный в Московском институте радиотехники, электроники и автоматики. АТП-103 позволяет исследовать в реальном масштабе времени стационарные тепловые поля сравнением теплового излучения эталонного и исследуемого объектов в диапазоне температур 250—1200 °С с погрешностью $\pm 1\%$.

Качественный анализ исследуемого объекта проводят по черно-белому полутоновому изображению теплового поля на экране видеоконтрольного устройства (ВКУ) с пропорциональной зависимостью яркости от температуры. Количественные измерения проводятся сравнением мощности излучения от объекта и эталонного

излучателя, либо методом изотерм, который позволяет выявить на экране ВКУ области, температура которых превышает установленный уровень. Координатная привязка изотерм производится наложением их на изображение теплового поля. Кроме того, прибор позволяет измерять температуру по выделенной строке, для чего профилограмму выводят на экран осциллографа.

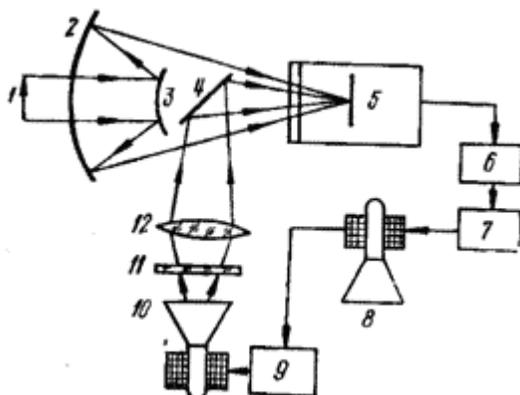


Рис.19.3. Схема тепловизора с термиком:

1 — объект наблюдения; 2 — зеркальный объектив; 3 — констрзеркало; 4 — плоское зеркало; 5 — термикон; 6 — предусилитель; 7 — усилитель; 8 — приемная телевизионная трубка; 9 — генераторы развертки; 10 — телевизионная трубка, создающая бегущий световой луч; 11 — фильтр, поглощающий тепловое излучение; 12 — объектив

Излучение от исследуемого объекта поступает через объектив и фильтр на мишень видикона, чувствительного в инфракрасной области спектра. Полученный на мишени потенциальный рельеф считывается электронным пучком, отклонение которого по строкам и кадру выполняется ФОС. Выходной сигнал видикона после усиления поступает в блок обработки сигнала (БОС), где формируется стробирующий импульс по строкам и кадру. Он определяет геометрические размеры зоны, в которой измеряется температура методом замещения. В БОС амплитуда сигнала видикона, пропорционального температуре в контролируемой зоне объекта, сравнивается с амплитудой сигнала, получаемого от эталонного излучателя. Изотермы формируются на компараторе; на его вход поступают сигналы от эталонного источника напряжения и выходной видеосигнал, привязанный к заданному уровню. Сигналы,

формирующие теплопортрет, изотермы и стробирующие импульсы, суммируются и поступают на ВКУ, на экране которого воспроизводится изображение исследуемого объекта. Технические характеристики тепловизора: температурное разрешение $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при температуре объекта $310\text{ }^{\circ}\text{C}$); поле зрения $4 \times 6^{\circ}$; геометрическое разрешение не хуже 5 мрад ; число кадров в секунду 25; число строк в кадре 625. Тепловизор АТП-103 конструктивно выполнен в виде четырех блоков: приемной камеры, БОС, ВКУ и пульта управления. Связь между ними осуществляется кабелями со штепсельными разъемами.

19.2. Электронная система развертки и траектории сканирования

Электронная развертка заключается в периодическом движении электронного луча электронно-лучевой трубки по ее теплочувствительной мишени, потенциальный рельеф которой соответствует яркости оптического изображения наблюдаемого объекта. При этом потенциал элементарной площадки мишени, на которой в данный момент находится луч, преобразуется в электрический импульс. Совокупность импульсов, пропорциональных энергетической яркости элементов изображения наблюдаемого объекта, образует сигнал изображения или видеосигнал.

В телевизионной автоматике применяются различные типы разверток: строчная, радиальная, спиральная, синусоидальная, розеточная и др. Для правильного воспроизведения оптического изображения движение электронного луча должно происходить с постоянной скоростью, что диктуется необходимостью получения одинаковой четкости по всему полю, обегаемому лучом

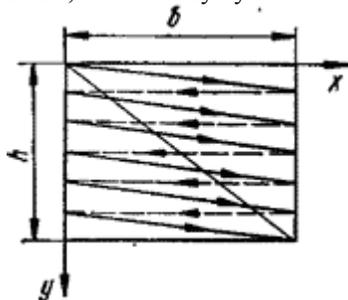


Рис. 19.4. Схема образования телевизионного раstra

При использовании строчной развертки с прямоугольным кадром развертка всей площади мишени передающей телевизионной трубки образуется в результате движения луча по двум взаимно перпендикулярным направлениям: по горизонтали — вдоль оси x и по вертикали — вдоль оси y (рис.19.4). Прочерчиваемые лучом параллельные линии (при движении вдоль оси x) называются строками; при движении электронного луча вдоль оси y все строки располагаются одна под другой, образуя так называемый телевизионный растр.

Движение луча от начала к концу строки образует прямой ход луча для подготовки к развертке следующей строки необходим обратный ход луча, т. е. его возвращение от конца предыдущей строки к началу следующей.

Аналогично строчной развертке производится кадровая развертка — перемещение электронного луча по вертикали (вдоль оси y .) Кадровая развертка также имеет прямой и обратный ходы. Во время обратного хода луча передача изображения не производится и это время желательно иметь малым. Практически время обратного хода луча при строчной и кадровой развертках составляет 10...12 % от периода строки и 7...8 % от периода кадра соответственно.

Параметрами электронной развертки являются: время прямого t_1x и обратного t_2x ходов луча при строчной развертке; период строчной развертки $t_x = t_1x + t_2x$; время прямого t_1y и обратного t_2y ходов луча при кадровой развертке; период кадровой развертки $t_y = t_1y + t_2y$; число строк в кадре g ; частота кадровой f_y и строчной $f_x = g f_y$ разверток; коэффициент формата кадра $\phi = b/h$ (отношение длины строки к высоте раstra) (см. рис.7.4). Эти параметра выбирают в соответствии с особенностями зрительного восприятия и требуемым качеством изображения.

Для определения требуемой полосы пропускания A / усилителей необходимо знать верхнюю f_B и нижнюю f_b граничные частоты видеосигнала: очевидно, $A_f = f_B - f_b$. Нижняя граничная частота видеосигнала соответствует неподвижному объекту, состоящему из двух деталей с различной интенсивностью теплового излучения и горизонтальной границей раздела. В этом случае период повторения видеосигнала равен периоду кадровой развертки, $f_b = f_y$.

Верхняя граничная частота определяется максимально разрешаемым числом элементов в кадре: $N = \phi g^2$.

При развертке изображения объекта в виде шахматной доски видеосигнал представляет серию прямоугольных импульсов.

Поскольку $f_B > f_N$, принимают $A_f \sim f_B$. Так, например, при мгновенном угле зрения оптической системы $\text{ТМГН} = 5'$, угла зрения по вертикали

и горизонталью $\alpha = 6^\circ$ и $\beta = 12^\circ$, частоте кадров $f_y = 15$, $\gamma = \alpha \beta \gamma \text{МГИ} = 72$, $\phi = \gamma / \alpha \beta = 2$

$$f_{\text{в}} = \frac{1}{2} \psi z^2 f_y = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 72^2 \cdot 15 \approx 78 \text{ кГц.}$$

Уровень видеосигнала, соответствующий минимальному значению яркости передаваемого изображения, называется уровнем черного, уровень, соответствующий максимальному значению яркости — уровнем белого. Все остальные значения видеосигнала располагаются между этими уровнями. Для того чтобы обратные ходы разверток не были заметны на изображении, в видеосигнал во время обратных ходов вводят строчные и кадровые гасящие прямоугольные импульсы, длительность которых соответствует длительности обратных ходов строчной и кадровой разверток.

Синхронность и синфазность разверток изображения в передающей и приемной камерах осуществляется с помощью строчных и кадровых синхронизирующих импульсов, подмешиваемых к видеосигналу. Чтобы не мешать передаче изображения, синхронизирующие импульсы располагаются на вершинах гасящих импульсов.

20. Видиконы и пириконы

20.1. Устройство и принцип действия видикона.

Видикон (англ. *Vidicon*, от лат. *video* — вижу и др.-греч. εἰκών — изображение) — передающая телевизионная трубка с накоплением заряда, действие которой основано на внутреннем фотоэффекте. Наиболее распространенный тип передающей трубки в телевизионных передающих камерах до появления полупроводниковых матриц. Изображение в видиконе проецируется на плоскую мишень из полупроводникового материала, на котором накапливается потенциальный рельеф. Мишень сканируется электронным лучом, подключающим считываемый участок к нагрузке. Рельеф при этом разрушается и восстанавливается к моменту следующего прохода луча. Видиконы создают видеосигнал при минимальной освещенности мишени от десятых долей до десятков люкс, обеспечивая разрешающую способность от 400 до 10 000 линий.

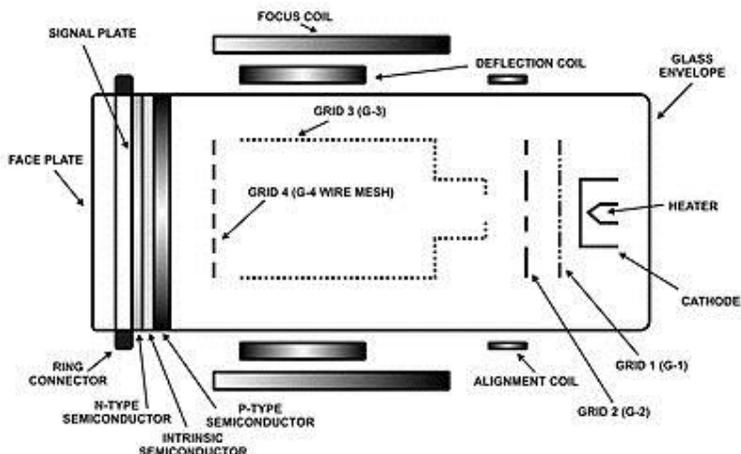
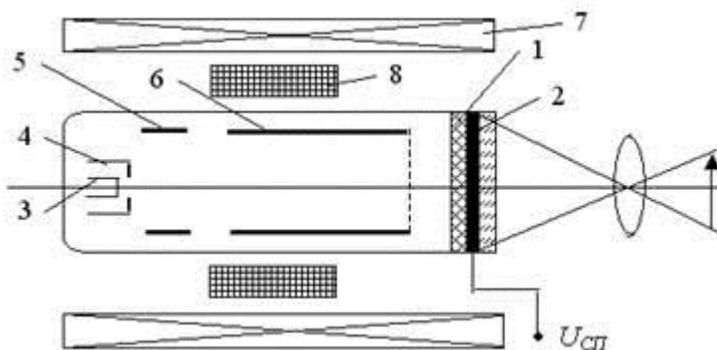


Схема наиболее популярной разновидности видикона — плумбикона

Светочувствительность передающих камер на видиконе ограничена только шумами видеоусилителя и растёт при их уменьшении. Если потери из-за такого ограничения велики (например, при сверхвысоком разрешении), то используются видиконы, в которых отражённый от мишени луч усиливается вторично-электронным умножителем. Видикон является передающей трубкой с полупроводниковой фотопроводящей мишенью, накоплением заряда и перезарядным считыванием. Устройство видикона схематически показано на рисунке.



Основным элементом видикона является фотопроводящая мишень 1, которая представляет собой тонкий слой фотосопротивления.

Материалом для мишени служит трехсернистая сурьма.

Фотопроводящий слой наносится на полупрозрачную сигнальную пластину 2, сквозь которую на фотослой проектируется изображение.

В цилиндрической части прибора расположен электронный прожектор, состоящий из катода 3, модулятора 4, ускоряющего электрода 5 и анода 6.

Формирование электронного луча осуществляется магнитной линзой 7, создающей однородное продольное магнитное поле. Растровая развертка луча производится магнитной отклоняющей системой 8.

Видикон может работать в режиме как медленных, так и быстрых электронов. В первом случае потенциал сигнальной пластины выше потенциала катода прожектора.

При проектировании сквозь сигнальную пластину оптического изображения сопротивление мишени будет изменяться согласно распределению освещенности, причем, чем ярче освещен элемент мишени, тем меньше будет поперечное сопротивление фотослоя в этом месте. Поэтому в промежутке между коммутациями потенциал светлых элементов мишени повысится больше, чем потенциал темных элементов. Таким образом, на коммутирующей поверхности мишени создается положительный потенциальный рельеф. При развертке поверхности мишени электронным лучом в цепи сигнальной пластины создается видеосигнал.

В колбе видикона находится фотомишень и электронно-оптическая система развертывающего луча. Фотомишень 1 состоит из фотослоя, при проецировании на фотомишень оптического изображения происходит разрядка элементарных конденсаторов фотослоя мишени. Поэтому при развертке лучом происходит выравнивание потенциала фотомишени, и разность протекающих токов образует сигнал изображения.



На пластину фотомишени нанесен фотослой толщиной 1-3 мкм из материала, обладающего фотопроводимостью. Таким материалом часто служит трехсернистая сурьма — стибнит. От толщины и свойств

материала фотопроводника зависят чувствительность, спектральная характеристика и инерционные свойства видикона.

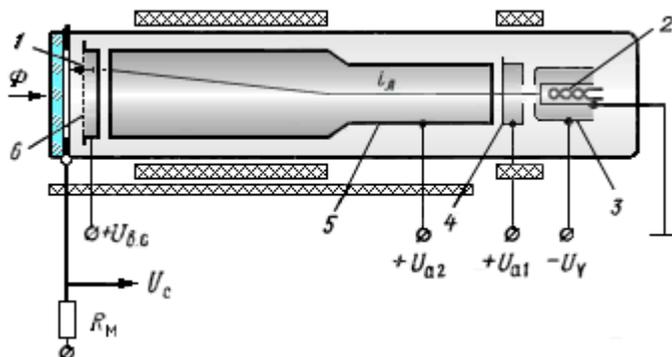
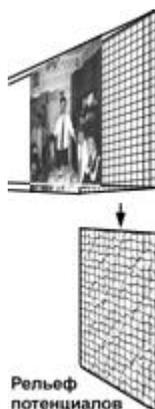


Рис.20.1

Электронно-оптическая система видикона (рис. 20.1) содержит электронный прожектор и мелкоструктурную сетку, помещенную перед фотомишенью. Прожектор состоит из оксидного подогревного катода 2, управляющего электрода 3, первого 4 и второго анода 5. Второй анод создает эквипотенциальную область, в которой осуществляются фокусировка и отклонение развертывающегося луча по всей поверхности фотомишени и препятствует попаданию на фотомишень отрицательных ионов. Мелкоструктурная сетка 6, находящаяся под напряжением, в 1,5-1,7 раза превышающем напряжение катода, обеспечивает перпендикулярный подход электронов луча по всей поверхности фотомишени и препятствует попаданию на фотомишень отрицательных ионов. Фокусировка, отклонение и коррекция траектории развертывающегося луча осуществляется внешней магнитной системой, состоящей из длинной фокусирующей катушки ФК, отклоняющих катушек ОК и корректирующих катушек КК.

Процесс образование сигнала изображения в видиконах связан с накоплением зарядов на поверхности фотослоя. Накопительные конденсаторы образованы участками поверхности фотослоя и сигнальной пластиной, являющейся общей обкладкой для всех элементарных конденсаторов. Каждый конденсатор шунтирован фоторезистором. Когда на фотомишень проецируется оптическое

изображение, то величины сопротивлений шунтирующих резисторов становятся различными. Так наиболее освещенные элементы имеют наименьшее сопротивление, а темные — наибольшее.



В процессе развертки потенциального рельефа электронным лучом происходит его выравнивание. Разность между токами, протекающими резистор нагрузки, когда луч находится на неосвещенном и освещенном участках, образует сигнал изображения. Когда на первый и второй аноды подается напряжение порядка 300 В, то видикон работает в режиме развертки медленными электронами. В этом режиме он имеет большую чувствительность и разрешающую способность, но зато обладает большей инерционностью. Поэтому, при необходимости, используют режим развертки быстрыми электронами (но при этом теряются четкость, чувствительность и равномерность сигнала по всему полю).

Современные видиконы позволяют получать удовлетворительное изображение при освещенности мишени всего в несколько люкс, т.е. по чувствительности они приближаются к **суперортиконам**. Недостатком видиконов является инерционность. Широкое применение видиконы находят в системах промышленного телевидения.

20.2. Телевизионные передающие трубки, чувствительные в инфракрасной области спектра.

Дальнейшим развитием классического видикона стали его разновидности с изменённой конструкцией мишени. Практически каждый бренд видикона является собственной разработкой той или иной компании. Так, права на трубку типа «Сатикон» принадлежат фирме «Хитачи» (англ. *Hitachi*), «Ньювикон» разработан корпорацией «Мацусита» (англ. *Matsushita*, **Panasonic Corporation**), а наиболее известный «Плюмбикон» является торговой маркой концерна «Филипс» (англ. *Philips*), который на протяжении длительного периода был монопольным производителем этого типа передающих трубок, наилучшим образом подходящего для цветных трёхтрубчатых телекамер.

В 1972 году Всесоюзный научно-исследовательский институт электронно-лучевых приборов (ВНИИЭЛП) создал первые приборы нового поколения, получивший название «Глетикон». Большинство телекамер впоследствии оснащалось этой разновидностью видикона. Для цветного телевидения созданы видиконы с внутренним цветоделением, самостоятельно формирующие цветоразностные сигналы. Самый известный видикон такой конструкции называется «Триникон», разработанный корпорацией «Сони» (англ. *Sony*).

По способу формирования развертки видиконы могут быть разделены на две основные группы:

- с магнитным отклонением считывающего луча;
- с электрическим отклонением считывающего луча.

В телевизионных камерах, как правило, используются видиконы с магнитным отклонением. Видиконы с электростатической системой развертки разрабатывались для систем технического зрения искусственного интеллекта как позволяют увеличить скорость развёртки и реализовать нестандартные её виды, в том числе радиальную, спиральную. Кроме того, при использовании видикона более простыми средствами достигается высокая линейность отклонения луча, размер раstra не зависит от частоты отклоняющих сигналов и отсутствует поворот изображения при изменении напряжения на фокусирующем электроде.

Для получения видеосигнала вместо устаревших вакуумных передающих трубок используются полупроводниковые светочувствительные матрицы. Характеристики полупроводниковых преобразователей свет/сигнал не зависят от внешних магнитных полей, они не требуют прогрева и значительно устойчивее к механическим нагрузкам.

Разработано много типов телевизионных передающих трубок, чувствительных к излучению в инфракрасной области спектра. Большая часть из них имеет однотипную схему устройства, аналогичную видикону, и отличается только конструкцией и материалом мишени. Особую группу образуют трубки с пироэлектрической мишенью (пирикены), чувствительные к инфракрасному излучению в диапазоне длин волн 8... 14 мкм. Их применяют в тепловизорах, предназначенных для наблюдения слабо нагретых объектов.

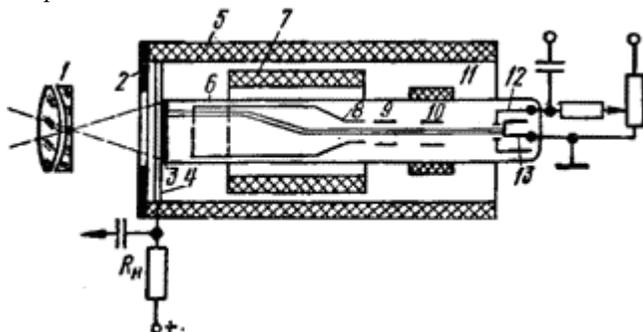


Рис. 20.2. Устройство видикона с монокристаллической полупроводящей мишенью

Область спектральной чувствительности обычных видиконов зависит от свойств применяемого материала мишени, который выбирают в зависимости от назначения прибора. Для хорошего накопительного действия слоя его удельная проводимость должна быть порядка $10 \sim 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Это условие является тяжелым для слоя, чувствительного к инфракрасным лучам, так как его проводимость и длинноволновая граница чувствительности связаны между собой и определяются через энергию перехода АЕ: чем меньше АЕ, тем больше проводимость и длинноволновая граница. Расширение спектральной области чувствительности видикона можно получить с помощью слоя зернистой структуры, запорного слоя, или введением низкоомного

материала, чувствительного к инфракрасному излучению. Основными элементами видикона являются монокристаллическая полупроводящая мишень 3 (рис. 20.2) и электронный прожектор. Мишень преобразует оптическое изображение, сфокусированное объективом 1, в электрические сигналы, прожектор создает коммутирующий луч.

Мишень видикона представляет собой тонкий слой (1...20 мкм) высокоомного фотопроводника, нанесенного на проводящую подложку. Удельное сопротивление фотопроводника подобрано таким образом, чтобы на мишени потенциальный рельеф эффективно накапливался в течение всего кадра. Основным материалом для мишени в течение длительного времени служит сульфид сурьмы. Применяются также селен и сложные соединения, содержащие сурьму, серу, селен, мышьяк. Излучение наблюдаемого объекта попадает на мишень через входное окно 2.

Во время работы видикона мишень заряжается электронным лучом, поперечное сечение которого примерно в 106 раз меньше его площади. Зарядка отдельных участков мишени производится последовательно, по мере того, как луч строку за строкой прочерчивает мишень. Время, за которое заряжается вся рабочая поверхность мишени (растр), называется временем кадра. Зарядка участка, сравнимого по площади с поперечным сечением луча, длится около 10^{-1} с.

Поступление электронов из луча на мишень вызывает появление такого же по значению тока во внешней цепи сигнальной пластины. Разность между токами, протекающими в цепи сигнальной пластины, в те моменты, когда луч находится на темном и светлом участках, образует сигнал. Процесс последовательной зарядки отдельных участков мишени движущимся электронным лучом носит, название считывания или коммутации.

Формирование электронного луча и управление его движением осуществляется прожектором и одеваемой на баллон 6 видикона фокусирующе-отклоняющей системой (ФОС). Прожектор видикона состоит из термокатода 13 (см. рис. 20.2), эмитирующего электроны; расположенного около него модулятора 12, который имеет отрицательный потенциал и за счет этого управляет значением тока, отбираемого от катода; первого анода 10, находящегося под положительным потенциалом и создающего необходимое ускоряющее поле для ухода электронов с катода. В первом аноде имеется вырезающая (апертурная) диафрагма, диаметр отверстия которой соизмерим с диаметром луча у мишени. Потенциал второго анода 9 (t/a_2) обычно близок к потенциалу первого анода (t/a_1), поэтому линза,

образующаяся между анодами, существенной роли в фокусировке электронного пучка не играет. Второй анод создает эквипотенциальную область, в которой производится отклонение луча, и является коллектором вторичных электронов с мишени. Потенциалы первого и второго анодов составляют обычно 280...350 В. Третий анод заканчивается мелкозернистой сеткой. Значения потенциалов сигнальной пластины $4 U_c$ находятся в интервалах $U_c = 0...100$ В и $C_c = 100$ В... t/a^2 . В первом случае при коммутации потенциал поверхности мишени понижается, стремясь приблизиться к потенциалу катода. Такой режим работы видикона называется режимом с разверткой медленными электронами (или режим отрицательной зарядки). При втором режиме потенциал поверхности мишени повышается, стремясь приблизиться к потенциалу второго анода. Такой режим работы называется режимом с разверткой быстрыми электронами (или режим положительной зарядки). Для работы в режиме медленных электронов второй анод на стороне, обращенной к мишени, обычно имеет мелкоструктурную сетку, создающую перед мишенью однородное электрическое поле.

Фокусирующе-отклоняющая система включает в себя несколько катушек: фокусирующую 5, группу отклоняющих 7 — одна пара создает отклонение по горизонтали (по строкам), вторая — по вертикали (по кадру). Кроме того, ФОС содержит корректирующие катушки 11 — для направления луча параллельно оси трубки (для исправления возможных недостатков сборки прибора).

Видиконы с электростатическими фокусировкой и отклонением луча не имеют внешних ФОС. Наличие ФОС резко увеличивает массу, габаритные размеры и мощность, потребляемую телевизионной камерой. В видиконе с электростатической фокусировкой этот недостаток передающих камер устранен. Фокусировка электронного луча в таких видиконах осуществляется электростатической линзой. Она представляет собой три (или четыре) соосных цилиндрических электрода, один из которых имеет переменный потенциал, варьируя этот потенциал, можно добиться хорошей фокусировки. Недостаток видиконов с электростатической фокусировкой — необходимость уменьшения отверстия апертурной диафрагмы для получения требуемой разрешающей способности прибора.

Существует два типа комбинированных видиконов. Первый тип — видикон (ЕН) с электростатической фокусировкой и магнитным отклонением луча имеет все преимущества видикона с электростатической фокусировкой. По сравнению с обычными видиконами в этой конструкции имеется выигрыш по габаритам, массе и потребляемой мощности.

Второй тип комбинированных видиконов (HE) имеет электростатическое отклонение луча в магнитном фокусирующем поле. Трубки этого класса также имеют все преимущества видиконов с электростатическим отклонением, хотя (ввиду того, что отклонение производится в области, где действует фокусирующее поле) напряжение отклонения велико, т. е. примерно такое, как у магнитного видикона. Однако в таких видиконах разрешающая способность выше, чем в видиконах с магнитным отклонением луча, а равномерность фокусировки по полю изображения значительно лучше.

Ортогональность траекторий движения отклоненных электронов к мишени обеспечивает хорошую равномерность сигнала по полю изображения. Из-за наличия внешней фокусирующей катушки габариты, масса и потребляемая мощность почти такие же, как у магнитного видикона.

На рис. 20.3 изображены спектральные характеристики двух современных отечественных видиконов с мишенями из трехсернистой сурьмы и с диодно-мозаичной кремниевой. Последняя выполнена на основе пластины кремния с проводимостью п-типа, в которой легированием в парах бора созданы островки с проводимостью р-типа. Запорная зона, возникающая между ними, создает высокое сопротивление разрядке мишени. Сам кремний низкоомен ($\rho \approx 10^{-1} \dots 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$), поэтому во избежание проводимости вдоль, мишени, р-участок имеет мозаичную структуру. В мишени на площади 1 см^2 образовано более $5 \cdot 10^5$ отдельных р-участков. Чтобы электронный луч не заряжал поверхность мишени между р-участками, они имеют выступы в виде грибков, либо полупроводящее покрытие на этих участках.

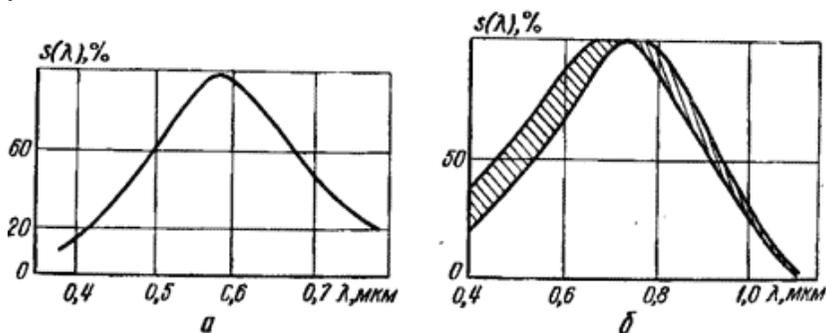


Рис. 20.3. Спектральные характеристики видиконов с мишенью из трехсернистой сурьмы (а) и с диодно-мозаичной кремниевой (б)

Благодаря использованию эффективного низкоомного фотопроводника трубка имеет высокую чувствительность и малую инерционность, что достигается малой инерционностью фотоэффекта и небольшой емкостью самой мишени. Запорный контакт обеспечивает малые темновые токи.

Одна из конструкций видикона иностранного производства (с длинноволновой границей чувствительности около 2,5 мкм) изображена на рис. 20.4. Мишень изготовлена из монокристалла германия. Для того чтобы слой не разрушался электронным лучом, сканирование осуществляется медленными электронами. Равномерное тормозящее поле перед мишенью обеспечивается с помощью сетки. Мишень охлаждается продуктами испарения жидкого азота, непрерывно поступающего в трубопровод из сосуда Дьюара. Температура мишени 78 К поддерживается при расходе жидкого азота 30 см³/ч.

Для устранения термических напряжений все детали системы охлаждения, детали, соединенные сваркой, изготовлены из одного металла.

Эффективное считывание теплового изображения объекта на мишени (при скорости развертки 50 кадров/с) оказалось возможным при высоком значении электронного тока луча (2,5 мкА). Последнее обусловило конструкцию электронного прожектора со сравнительно большими отверстиями в модуляторе и электроде, благодаря чему используется значительная часть эмитирующей поверхности катода. Излучение, создаваемое накалившимся катодом, может привести к засветке мишени. Для устранения этого явления ось электронно-оптической системы наклонена относительно геометрической оси трубки на угол 4°, так что световые лучи катода не попадают на мишень; «выпрямление» электронного луча производят поперечным магнитным полем, а его фокусировку перед мишенью — аксиальным магнитным полем.

Крутизна характеристики трубки 1,9 мкА/В при токе луча 6,7 мкА и напряжении на мишени 5 В. При относительном отверстии объектива 1 : 4,5 с помощью трубки различаются объекты с температурой поверхности 180 °С; для объектива с относительным отверстием 1 : 1,5 пороговая температура снижается до 150 °С. При меньшей температуре трубка может различать только подсвечиваемые объекты.

В нашей стране разработан видикон с монокристаллической полупроводниковой мишенью для работы в спектральной области до 4 мкм. При испытании трубки получены телевизионные изображения объектов, нагретых до температуры 125 °С и выше.

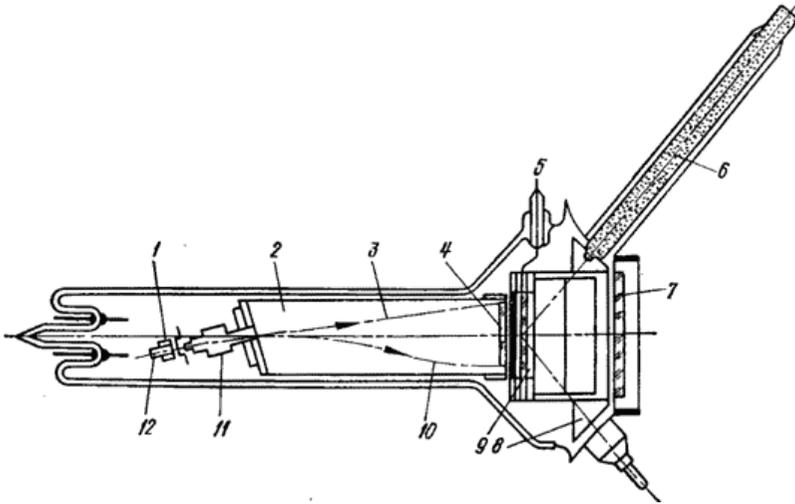


Рис. 20.4. Видикон с мишенью из монокристалла германия: 1 — модулятор; 2 — коллимирующая камера; 3 — световой луч накаливаемого катода; 4 — замедляющая сетка; 5 — вывод видеосигнала; 6 — трубопроводы с расширенными соплами для подачи жидкого азота; 7 — входное окно; 8 — контур охлаждения; 9 — мишень; 10 — электронный луч; 11 — электронно-оптическая система; 12 — катод

Пороговая облученность при этой температуре $1 \cdot 10^{-6}$ Вт/см², получаемое изображение практически безынерционно.

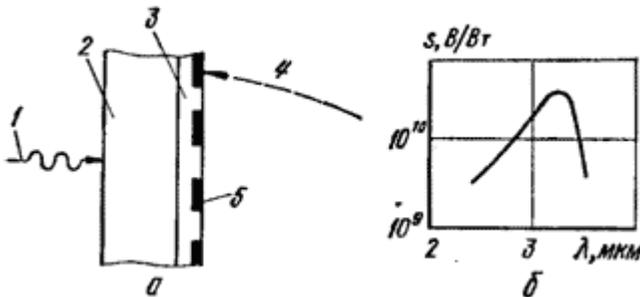


Рис. 20.5. Схема мишени на основе InAs (а) и спектральная характеристика видикона (б):

1 — падающее тепловое излучение, 2 — p+-область, 3 — p-область, 4 — сканирующий электронный луч, 5 — p-область

Для увеличения длинноволновой границы чувствительности видикона применяют мишени на основе InAs (рис. 20.5,а). Здесь n-область обращена к наблюдаемому теплоизлучающему объекту; р-область обегает развертывающий электронный луч. Максимум спектральной характеристики видикона (рис. 20.5, б) приходится на длину волны $\lambda_K = 3,25 \text{ мкм}$.

В видиконах обычных конструкций мишень выполняют из тонких полупроводниковых пленок, чувствительных к механическим нагрузкам, вследствие чего долговечность этих трубок невелика. Новейшие разработки видиконов связаны с применением мишени в виде диодной матрицы, отличающейся высокой прочностью и большой чувствительностью. Созданию таких видиконов способствовали достигнутые успехи в технологии производства пленарных кремниевых полупроводниковых структур. Мозаика кремниевых фотодиодов имеет толщину порядка 0,05...0,1 мм.

Параметры видиконов с мишенью в виде мозаики кремниевых диодов: число фотодиодов на площади 15,7 X 12,2 мм² 468 тыс., диаметр каждого, диода 7,5...8,0 мкм, расстояние между центрами двух соседних диодов 20 мкм; максимальная чувствительность соответствует длине волны 0,9 мкм и примерно в 20 раз больше, чем у обычного видикона. Последнее объясняется тем, что квантовый выход монокристаллического кремния значительно больше чем у полупроводниковых пленок с множеством центров рекомбинации.

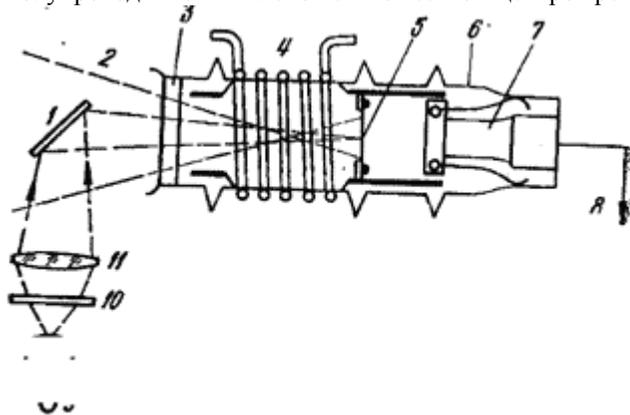


Рис. 20.6. Схема конструкции термикона.

1 — отражающее зеркало; 2 — падающее излучение; 3 — входное окно; 4 — холодильник; 5 — чувствительный элемент; 6 — корпус (диаметр 85, длина 285 мм); 7 — фотоумножитель; 8 — выходной

сигнал; 9 — кинескоп, создающий бегущий световой луч; 10 — фильтр, поглощающий тепловое излучение; 11 — объектив

Голландской фирмой «Филипс» разработан видикон с мишенью, сформированной из 480 тысяч кремниевых диодов. Диаметр каждого из них 8 мкм, расстояние между двумя соседними диодами 20 мкм. Видикон отличается высокой чувствительностью в красной и инфракрасной областях спектра. По данным фирмы новая трубка пока не пригодна для применения в телевизионных камерах из-за чрезмерной зависимости темного тока от температуры, однако ее можно использовать в приборах ночного видения и в диагностической аппаратуре.

При использовании видиконов в тепловизорах возникает две основные проблемы. Первая проблема связана с высоким уровнем потоков излучения от наземного фона в далекой инфракрасной области спектра, что приводит к насыщению мишеней, генерирующих заряды и к обеднению электронами считывающих пучков. Это означает, что передающие камеры с полупроводниковыми мишенями могут успешно работать только на холодном фоне, например на фоне космоса. Вторая проблема состоит в том, что во избежание паразитной модуляции необходимо иметь очень высокую однородность чувствительности мишени видикона. На основе видиконов созданы тепловизионные системы для наблюдения сильно нагретых объектов.

20.3. Термикон и фильтрскан.

Основной деталью телевизионной передающей трубки термикон является чувствительный элемент в виде тонкопрозрачной пленки, покрытой с одной стороны веществом, поглощающим тепловое излучение, а с другой — фотоэммитером, чувствительным к изменению температуры (рис. 20.6).

Малая инерционность ЧЭ достигнута уменьшением его теплоемкости и толщины составляющих компонентов. В качестве основы выбрана пленка из SiO толщиной 5 нм или из Al₂O₃ толщиной 20 нм.

Поглощающий слой наносит напылением в вакууме золота или серебра на толщину (10...20) нм. Коэффициент поглощения такого слоя примерно одинаков в диапазоне длин волн 3...15 мкм. Толщина фотослоя, нанесенного на пленку с противоположной стороны, составляет 40 нм, диаметр ЧЭ 30 мм, суммарная толщина — 50...70 нм, что обеспечивает постоянную времени около 30 мс. Висмута-цезиевые

и висмута-рубидиевые слои наносят на подслои из окиси олова. В диапазоне температур 150...170 К температурный коэффициент фототока этих слоев достигает 0,05...0,07 А • К⁻¹.

Для тепловой изоляции ЧЭ в корпусе создан глубокий вакуум, необходимый также для нормальной работы фотоумножителя. Поле зрения ограничивается диафрагмой, охлаждаемой жидким азотом, которая задерживает излучение от стенок трубки и одновременно охлаждает ЧЭ.

Входное окно, через которое проходит излучение от рассматриваемого объекта, изготовлено из кристалла ВаF₂, прозрачного для инфракрасных лучей с длиной волны до 15... 16 мкм. Во избежание растрескивания кристалла при охлаждении корпуса прибора кристалл приваривают к корпусу через переходное кольцо из хлористого серебра — эластичного и прочного материала.

Объективом проецируются на ЧЭ изображения наблюдаемого объекта светящегося пятна, движущегося по экрану электронно-лучевой трубки по заданному закону. В отклоняющие катушки трубки ток поступает от генератора развертки. В зависимости от положения светящегося пятна на ЧЭ и распределения температуры по его поверхности количество эмитируемых электронов и выходной сигнал изменяются на 2...3 % на каждый градус изменения температуры. Выходной сигнал подается на модулирующий электрод индикатора, на экране которого получается изображение теплоизлучающего объекта. Максимальная разрешающая способность термикона 50 линий на всю картину при регулируемом температурном перепаде $\Delta T = 1^\circ$ [63].

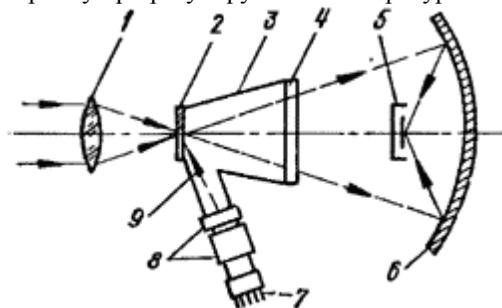


Рис. 20.7. Схема конструкции фильтерскана

Трубка фильтерскан, изобретенная в 1959 г., состоит из конической и цилиндрической частей, оси которых расположены под углом (рис. 20.7). Инфракрасное изображение наблюдаемого объекта фокусируется объективом 1 на силиконовое входное окно 2 конической части трубки

3. Прошедшее через окно излучение выходит через выходное окно 4, прозрачное для инфракрасных лучей, и фокусируется с помощью зеркально-линзового объектива 6 на ЧЭ внешнего приемника излучения 5.

В цилиндрической части трубки размещен электронный прожектор 7, фокусирующие и отклоняющие катушки 8. Электронный луч 9 направлен на внутреннюю поверхность полупроводникового (силиконового) окна. В точке, где сфокусированный электронный луч.

Отклоняющая система прожектора заставляет электронный луч и создаваемое им пятно перемещаться по полупроводниковому окну, образуя растр. Так как энергия, поглощаемая бегущим пятном, определяется яркостью закрываемого им участка инфракрасного изображения наблюдаемого объекта, выходной сигнал ПИ зависит от изменения яркости по площади изображения. Подавая этот сигнал на приемный кинескоп, развертка которого синхронизирована с движением электронного луча, воспроизводят визуальное (негативное) изображение объекта.

Трубка фильтерскан имеет следующие параметры: площадь бланкирующего пятна $3,1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$, площадь входного окна $2,24 \text{ см}^2$, площадь ЧЭ $0,1 \text{ см}^2$.

20.4. Пириконы

Передающую телевизионную трубку с пироэлектрической мишенью в качестве чувствительного слоя называют пировидиконом или пириконом. Принцип действия и конструкция пировидикона аналогичны принципу действия и конструкции видикона. Здесь фоточувствительный катод заменен пироэлектрической мишенью в виде тонкой пластины пироэлектрического кристалла, не требующей охлаждения. Входное окно, к которому прикрепляется мишень, обычно выполняется из германия. На сторону мишени, прилегающую к входному окну, наносится тонкослойный электрод, прозрачный для ИК - излучения. На другую сторону ее наносится пленка, защищающая пироэлектрический кристалл от разрушения ионами, генерируемыми электронным пучком, считывающим зарядный рельеф мишени. В качестве материала мишени целесообразно выбирать пироэлектрики с наименьшей диэлектрической проницаемостью и малой тепловой диффузией, например триглицинсульфат (ТГС) и дейтерированный

триглицинфторбериллат (ДТГФБ). Пироэлектрические материалы чувствительны лишь к изменению температуры. Поэтому ИК-излучение, которое строит изображение на пироэлектрической мишени, должно быть переменным, для чего в систему с пировидиконом устанавливается специальный модулятор (обтюратор) либо в отдельных случаях такая система работает в панорамирующем режиме, при котором она медленно перемещается относительно просматриваемого пространства. Для сохранения чувствительности пировидикона постоянной при изменениях окружающей температуры в конструкцию прибора в непосредственной близости от диафрагмы, ограничивающей сечение считывающего пучка электронов, вводится нагревательный элемент, который обеспечивает постоянство температуры мишени.

Для снижения тепловой диффузии пироэлектрическую мишень разбивают на отдельные малоразмерные элементы, помещая их на подложку с низкой теплопроводностью (сетчатая мишень). Пировидикон отличается от обычного видикона тем, что высокочувствительные ферроэлектрики (сегнетоэлектрики), используемые в качестве пироэлектрических мишеней и являющиеся хорошими изоляторами, не пропускают постоянного тока. Постоянная составляющая электронного луча, считывающего мишень, заряжает ее. Если луч не заземлять, мишень, которая представляет собой емкость, может полностью зарядиться, и работа пировидикона прекратится. Во избежание этого постоянный ток не должен протекать по цепи видеосигнала, а положительный заряд, равный отрицательному, перенесенному считывающим электронным лучом, должен периодически возобновляться. Для этого используют различные методы создания положительного (базового) заряда, или пьедестала. Наибольшими преимуществами обладает метод, основанный на вторичной электронной эмиссии свободной поверхности пироэлектрической мишени, сканируемой пучком медленных электронов, при котором положительный заряд образуется во время обратного хода электронного луча, т. е. вне времени считывания ИК-изображения.

В пировидиконах преобладают шумы Джонсона на мишени, базового тока и предусилителя видеосигнала. Последние заметно превышают внутренний шум пироэлектрического материала, обусловленный в основном шумом Джонсона, возникающим из-за диэлектрических потерь.

В ИКС с пировидиконами в соответствии с отмеченными особенностями используются устройства синхронизации прерывания входного сигнала и сканирования мишени и схемы вычитания базового тока из полного видеосигнала. Сигнал, появляющийся при каждом открывании обтюлятора, инвертируется, а затем считывается непосредственно с экрана системы отображения или же видеосигнал сначала подается в сумматор изображений (отдельных кадров), а потом воспроизводится в системе отображения.

Специальный процессор в составе электронного модуля пирикона, работающий в реальном масштабе времени, позволяет путем попарного сравнения разнополярных сигналов в полукадрах (положительных при нагреваемой открытой мишени и отрицательных при остывающей закрытой) повысить геометрическое разрешение мишени с

120... 130 до 160... 180 телевизионных линий (ТВЛ) и улучшить АТР системы, которая в режиме модуляции (обтюрации) может при этом составить 350 мК (при 50 ТВЛ на мишень), а в режиме панорамирования - 150 мК (по крупным деталям изображения).

Из-за переменной полярности сигнала, снимаемого с выхода пироэлектрического приемника при открывании и закрывании модулятором его чувствительной площадки, может возникнуть мерцание изображения. Это мерцание устраняют, используя в электронном тракте пирикона схемы (накопители), в которых видеосигнал суммируется по нескольким кадрам, а затем передается на систему отображения. При этом отношение сигнал-шум улучшается на 25...30%. После выключения питания или перегрева пироэлектрической мишени чувствительная мишень поляризуется с помощью схемы, обеспечивающей требуемую последовательность подачи питающих напряжений.

Области применения пириконов весьма разнообразны: в системах охранной и пожарной сигнализации, при дистанционных измерениях температуры, космических исследованиях, в лазерной измерительной аппаратуре, военной технике, в медицине и др. Эти сравнительно недорогие приемники, работающие в широком диапазоне частот и температур, имеют низкое энергопотребление и удельную обнаружительную способность около 10^9 Вт₁-смГц^{1/2}. Низкая теплопроводность пироэлектрических кристаллов позволяет создавать

многоэлементные структуры с низкими перекрестными тепловыми помехами между отдельными элементами чувствительного слоя.

Наибольшую перспективу использования в тепловизорах с электронным сканированием имеют телевизионные трубки с пироэлектрической мишенью (пириконы). Интенсивное развитие этих новых электроннолучевых приборов объясняется многолетним стремлением создать сканирующий преобразователь изображения для наблюдения объектов в инфракрасной области спектра по их собственному излучению.

Принцип действия пирикона аналогичен принципу действия обычного видикона. Изменение температуры, вызванное инфракрасным изображением «а пироэлектрической мишени, создает соответствующее распределение потенциала, которое считывается сканирующим электронным лучом. Выходной сигнал представляет собой переменное по времени напряжение на нагрузке пирикона, которое после усиления подается на управляющий электрод электронно-лучевой трубки. Так как мишень более чувствительна к температурным эффектам, чем к квантовым, она восприимчива к излучению любой длины волны, которое пропускается входной оптической системой и проецируется на мишень. При этом охлаждения мишени не требуется, что является главным преимуществом пирикона по сравнению с другими телевизионными передающими трубками, предназначенными для работы в инфракрасной области спектра.

Схема пирикона (рис. 20.8) аналогична схеме видикона с тем различием, что входное окно выполнено из материала, прозрачного для инфракрасного излучения, а мишень обладает пироэлектрическим эффектом. Тепловое излучение наблюдаемого объекта фокусируется объективом передающей камеры на пироэлектрическую мишень и формирует на ее лицевой поверхности температурный рельеф, который в свою очередь наводит на этой поверхности электрические заряды. Потенциальный рельеф, возникающий на задней поверхности мишени, отображает тепловое изображение объекта.

Отдельные участки мишени во время работы пирикона заряжаются электронным лучом (пучком), площадь поперечного сечения которого в 10-5...10-6 раз меньше площади мишени. Движущийся электронный луч производит считывание мишени и сглаживание потенциального рельефа.

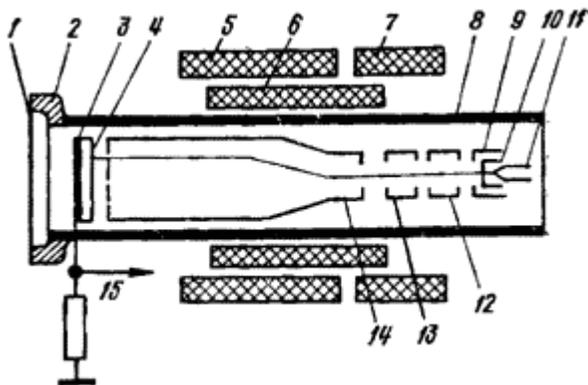


Рис. 20.8. Схема пирикона:

1 — входное окно; 2 — коваровое кольцо; 3 — сигнальный электрод; 4 — пирозлектрическая мишень; 5, 6, 7 — катушки фокусировки, развертки и корректировки; 8 — стеклянный баллон; 9 — управляющий электрод (модулятор); 10 — катод; 11 — вольфрамовая нить; 12, 13, 14 — первый, второй и третий аноды; 15 — выходной сигнал

Ток, поступающий на мишень, зависит от ее потенциала. Поступление электронов из луча на мишень вызывает соответствующее изменение тока во внешней цепи сигнальной пластины. Разность токов, протекающих по этой, цепи в те моменты, когда луч находится на нагретом и на ненагретом участках пирозлектрической мишени, образует видеосигнал.

Формирование считывающего электронного луча и его предварительная фокусировка- осуществляются электронным прожектором, состоящим из точечного термоэмиссионного катода, анода с малым отверстием и фокусирующего электрода с большими отверстиями в диафрагме.

Модулятор (управляющий электрод) имеет отрицательный относительно катода потенциал, за счет чего управляет током, отбираемым от катода! и первого анода, имеющего, положительный относительно катода потенциал и создающего ускоряющее поле для ухода электронов с катода.

В первом аноде находится апертурная диафрагма, диаметр отверстия; которой соизмерим с диаметром луча у мишени. Потенциалы первого

и второго анодов 300 В. Фокусировка и отклонение электронного луча производится магнитным полем, создаваемым фокусирующе-отклоняющей системой.

Для работы в режиме медленных электронов (характерном для современных пириконов) перед мишенью располагают мелкоструктурную сетку создающую однородное электрическое поле. Сетка электрически изолирована от второго анода, имеет потенциал, в 1,5...2 раза превышающий потенциал этого анода, и является коллектором вторичных электронов мишени. При коммутации быстрыми электронами роль коллектора выполняет второй анод. Пириконы собирают в стеклянном баллоне диаметром около 25 мм и длиной 150...170 мм. В передней части баллона находится входное окно, которое выполняют обычно из просветленного германия толщиной 2 мм. Окно имеет максимальное пропускание излучения в спектральном диапазоне длин волн 8...14 мкм, соответствующем «окну прозрачности» атмосферы. Коэффициент отражения в указанном диапазоне не превышает 5 %.

Для уменьшения температуропроводности, присущей любой кристаллической мишени и ограничивающей эксплуатационные показатели пириконов, изготавливают структурированные ТГС-мишени (рис. 20.9). На основе таких мишеней созданы пириконы с высоким качеством изображения. Однако чувствительность их составляет примерно 65 % чувствительности пириконов с монокристаллической ТГС-мишенью толщиной 30 мкм. Различия в чувствительности объясняются эффектами отражения от подложки и прохождения излучения через протравленные участки, окружающие элементы мозаики ТГС.

Для защиты сканируемой поверхности мишени от эрозии ионами, генерируемыми электронным лучом, ее покрывают слоем диэлектрического материала, стойкого к электронному облучению (BaF_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , MgF_2 , или KCl). Переднюю поверхность мишени покрывают тонким слоем золотой черни, электрически соединенным с предварительным усилителем.

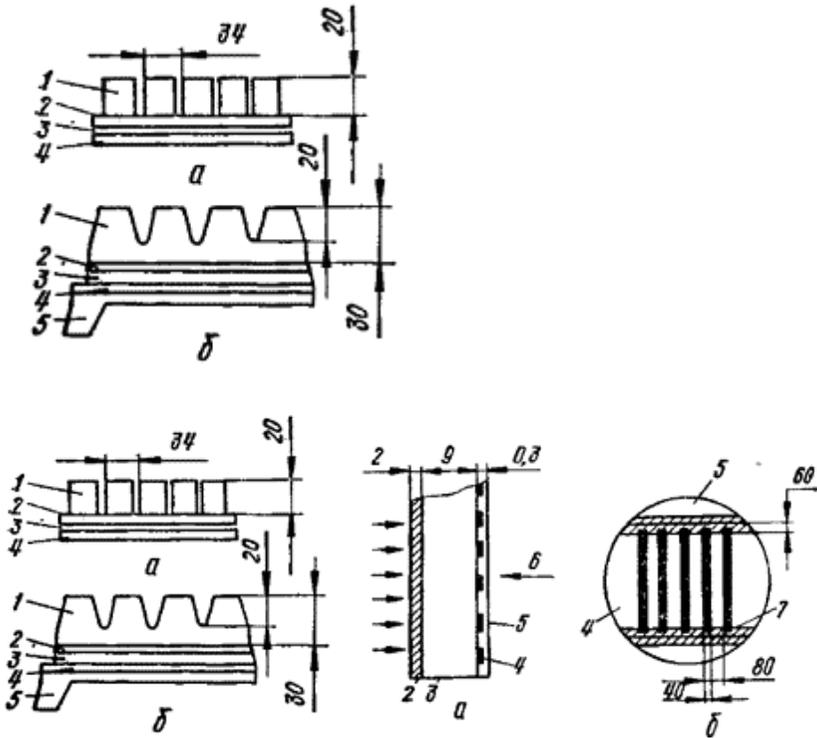


Рис. 20.9. Структурированные (мозаичные) мишени с прямоугольными (а) и треугольными (б) канавками:
 1 — триглицинсульфат; 2 — слой оксида; 3 — сигнальный электрод; 4 — поддерживающая пленка; 5 — подложка из сернистого мышьяка
 (все размеры даны в микрометрах)

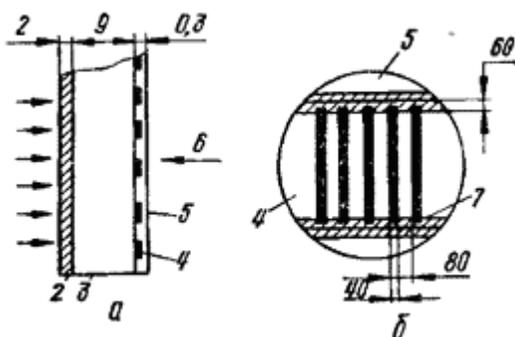


Рис. 20.10. Структура (а) и тыльная часть (б) мишени из полимерной пленки PVFа:

1 — падающее тепловое излучение; 2 — теплопоглощающий слой; 3 — пленка; 4 — металлическая полоска толщиной 0,1 мкм; 5 — высокоомное покрытие; 6 — сканирующий электронный луч; 7 — соединительная шина (все размеры даны в микрометрах)

У всех перечисленных выше сегнетоэлектриков максимальное значение пьезоэлектрического коэффициента имеет место только в таком состоянии, когда домены всей площади мишени имеют одинаковую направленность. Монодоменное состояние сегнетоэлектрика (монодоменизация) достигается воздействием постоянного электрического поля.

В приконах применяют также керамические мишени, изготовленные на основе титаната бария и твердых растворов цирконата-титаната свинца. Распространение пьезоэлектрической керамики обусловлено ее низкой стоимостью, возможностью получения рабочих тел большой площади, малой толщины и разнообразной формы при воспроизводимости электрических свойств. К разряду перспективных поликристаллических материалов относится керамика на основе твердых растворов метаниобата свинца $PbNb_2O_6$. Приближаясь по своим параметрам к керамике системы $Pb(Zr, Ti)O_3$, эти материалы выгодно отличаются стабильностью свойств и менее критичны и отклонениям технологических режимов.

Кроме того, мишени изготавливают из органических полимерных пьезоэлектриков на основе фторированного поливинила PVF₂. На лицевую поверхность пленки из этого материала наносят теплопоглощающий слой (чернь висмута) толщиной 2 мкм (рис. 20.10).

Термодиффузионная постоянная времени такого слоя 0,5 мс на воздухе и 0,9 мс в вакууме, что существенно меньше длительности одного кадра и обеспечивает формирование теплового рельефа на мишени при стандартном режиме разложения. Сканируемую (тыльную), часть мишени покрывают высокоомным материалом — смесью AsaSes и Te. Мишень пирикона монтируют в поддерживающем металлическом кольце на расстоянии 1...1.5 мм от входного окна или механически прикрепляют к окну.

В отличие от других типов мишеней видеиконов изменения температуры пироэлектрической мишени вызывают как положительные (нагревание), так и отрицательные (остывание) заряды на ее поверхности. При сканировании электронный пучок встречает накопленный рельеф из связанных электронов, и из пучка на мишень оседают свободные заряды, которые не суммируются со связанными, а лишь доводят общий заряд каждого элемента мишени до единого уровня.

Так как материалы, используемые в качестве мишеней, являются хорошими изоляторами (удельное сопротивление достигает 10-15 Ом • см), свободные заряды суммируются от кадра к кадру, что в конце концов приводит к запираанию пирикона. Единственным средством борьбы с таким явлением оказалось формирование пьедестала — положительного потенциала смещения мишени, которое осуществляет в каждом кадре принудительную разрядку поверхности мишени, т. е. нейтрализацию свободных зарядов. В обычных видеиконах образования пьедестала не требуется, так как на фотопроводящих мишенях рельеф создается в форме свободных зарядов, с которыми суммируются заряды из электронного пучка. Это приводит к нивелированию всякого зарядного рельефа.

Известно несколько способов создания на мишени требуемого потенциала. Европейские фирмы практикуют образование пьедестала из ионного тока, для чего при изготовлении пирикона в колбу вводят под давлением около 10^{-7} Па инертный газ или выделяют определенное количество водорода накаливанием специального источника во время работы трубки.

В США используется метод создания пьедестала, основанный на вторичной электронной эмиссии сканируемой поверхности пироэлектрической мишени. Возбуждаемый на мишени вторичный ток (ток пьедестала) нейтрализует отрицательный заряд на ее поверхности. Формирование пьедестала осуществляется переводом пирикона на время каждого обратного хода строчной развертки в режим быстрых электронов повышением разности потенциалов между катодом прожектора и мишенью с одновременным увеличением тока луча, в

результате чего поверхность мишени доводится до равновесного потенциала. Недостатком этого метода является значительная неравномерность фона, обусловленная перераспределением вторичных электронов, и коэффициента вторичной эмиссии электронов по полю мишени.

При наличии теплового изображения ток, несущий информацию о сигнале, равен сумме токов пьедестала и тока, вызванного изменением температуры пироэлектрической мишени. В отсутствие теплового изображения пучок электронов, облучающий мишень, снижает ее потенциал до значения потенциала пьедестала.

Пироэлектрический материал чувствителен лишь к изменению температуры, поэтому инфракрасное изображение теплоизлучающего объекта, вызывающее изменение температуры мишени, должно меняться во времени. Если объект движется или излучение, падающее на мишень, каким-либо образом модулируется, преобразование теплового изображения объекта в видимое не вызывает затруднений.

При наблюдении неподвижных теплоизлучающих объектов со стационарным тепловым режимом необходима искусственная модуляция падающего на мишень излучения, которая может осуществляться двумя способами: 1) движением изображения относительно мишени путем панорамирования камерой или перемещения объектива; 2) прерыванием падающего излучения секторным диском или подобным ему устройством (модулятором). Первый из этих способов применялся в ранних образцах систем тепловидения с пириконами. Он обладал тем недостатком, что изображение объекта на ТВ-мониторе двигалось и требовалось специальное устройство электронной компенсации для стабилизации этого изображения. Но даже при наличии такого устройства изображение смазывалось и, кроме того, собственные шумы пирикона возрастали за счет неоднородностей материала мишени.

В большинстве выпускаемых в настоящее время тепловизионных камер используется второй способ модуляции — прерывание падающего на мишень излучения. Трудность реализации этого способа состоит в том, что необработанный выходной сигнал пирикона имеет переменную полярность. Когда -модулятор «открыт», темные участки объекта нагревают соответствующие участки мишени и вырабатывается сигнал определенной полярности; при «закрытом» модуляторе эти участки охлаждаются, так как излучение объекта не попадает на мишень, в результате чего вырабатывается сигнал той же формы, но противоположной полярности.

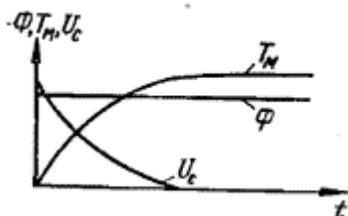


Рис. 20.11. Реакция пирикона на ступенчатый тепловой импульс

При наблюдении объекта на экране позитивные и негативные изображения объекта будут попеременно воспроизводиться синхронно с вращением модулятора. Наблюдение такого изображения чрезвычайно затруднено. Для устранения этого явления можно было бы «отсекать» негативное изображение и воспроизводить только позитивное изображение. Однако при наблюдении такого прерывистого изображения замечается его мерцание. Поэтому негативное изображение инвертируют синхронно с работой модулятора и последующим согласованием черных уровней позитивного и негативного изображений.

Так как пирозлектрический эффект возникает в результате ориентации электрических диполей внутри материала вдоль оси поляризации, максимальный эффект мишени обеспечивается при ориентации всех диполей в одном и том же направлении. Такая ориентация достигается монодоменизацией — процессом, происходящим при создании мощного постоянного электрического поля $10 \dots 10^6$ В/см поперек кристалла. Если непредвиденного перегрева мишени нет или перерыв в работе передающей камеры составлял лишь несколько минут, монодоменизация не требуется.

Образование выходного сигнала при считывании потенциального рельефа в пириконе ничем не отличается от механизма считывания в обычных передающих телевизионных трубках. При считывании потенциального рельефа мишени электронным лучом и модуляции падающего излучения возникают сигналы разной полярности. Пирикон дифференцирует величину падающего потока излучения. Реакция трубки на ступенчатый тепловой импульс в малокадровом режиме работы иллюстрируется рис. 20.11, где Φ — поток излучения; T_w — температура мишени; U_c — выходной сигнал.

Отдельные процессы формирования видеосигнала при наблюдении стационарных теплоизлучающих объектов состоят в следующем: исходная равномерная поляризация мишени (монодоменизация), осуществляемая автоматически — оператору достаточно нажать на

кнопку;

подогрев мишени до определенной температуры (несколько ниже температуры Кюри) и поддержание ее в пределах $\pm 5^\circ\text{C}$. Это необходимо для того, чтобы избежать «плавления» емкости, значение которой зависит от температуры мишени и уровня видеосигнала; проецирование теплового изображения наблюдаемого объекта и образование на мишени потенциального рельефа; создание опорного потенциала для осуществления возможности считывания биполярного рельефа; считывание пучком медленных электронов и формирование из биполярного видеосигнала униполярного; принудительная разрядка поверхности пироэлектрической мишени. Все перечисленные процессы не протекают раздельно. Например, стирание зарядного рельефа с поверхности мишени и формирование опорного потенциала происходит в ходе единого процесса внесения на мишень положительного заряда.

Одним из основных параметров пирикона, определяющих качество изображения, является разрешающая способность. Для ее определения используется понятие тепловизионной миры — набор чередующихся «теплых» ($T = T^*$) и «холодных» ($T = 0$) полос равной ширины. При воспроизведении теплой полосы миры график изменения приращения температуры пироэлектрической мишени имеет вид колоколообразной кривой. Это объясняется тем, что мишень пирикона обладает определенной теплопроводностью, являющейся причиной «расплывания» теплового рельефа, которое ведет к ограничению разрешающей способности трубки.

Разрешающая способность пирикона, лин/мм, $N = 1 / 2L_0$, где $L_0 = = Vkh / (nE_e)$ — характеристическая длина, на которой температура мишени уменьшается в e раз; $E_e = 4a^7 \cdot \sigma / \gamma (e_1 + e_2)$ — удельные радиационные тепловые потери; a — постоянная в законе Стефана-Больцмана; T_m — температура мишени; σ_1, σ_2 — коэффициенты теплового излучения лицевой и тыльной сторон мишени; k — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ft — толщина мишени, мкм.

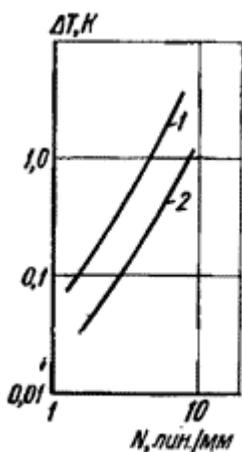


Рис. 20.12. Графики зависимости минимально разрешаемой температуры от разрешающей способности пириконов, выпускаемых фирмами «Амперекс» (1) и «Филипс» (2)

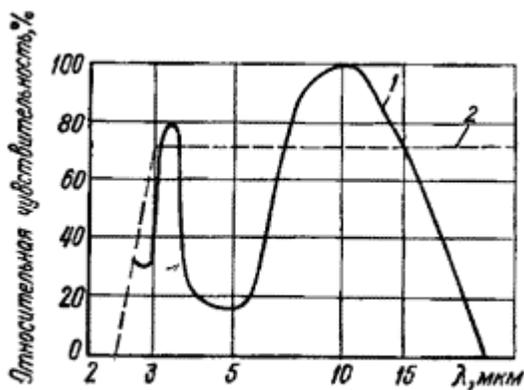


Рис. 20.13. Спектральные характеристики пирикона с окном из германия (1) и из кристалла КРС-5 (2)

Основное ограничение на разрешающую способность пирикона накладывает пироэлектрическая мишень. Для относительно толстых

слоев пироэлектрика (порядка 40 мкм) влиянием сигнального электрода из золота и нихрома на разрешающую способность можно пренебречь. Для повышения этого параметра искусственно снижают теплопроводность вдоль пироэлектрического слоя, создавая структурированную мишень.

К основным параметрам пирикона относят также температурную чувствительность, оцениваемую минимальным значением температурного контраста ΔT_{71} последовательно визируемых элементов картинной плоскости, проецируемой на мишень, при котором обеспечивается заданное отношение сигнал/шум. На рис. 20.12 показаны графики зависимости минимально разрешаемой температуры от разрешающей способности пириконов, выпускаемых фирмами «Амперекс» и «Филипс». Мишени пириконов изготовлены из ТГС толщиной 30 мкм; входное окно — из германия. Минимально разрешаемая температура на крупных деталях достигает 0,1 °С; с уменьшением деталей эта величина находится в пределах 0,5...0,8 °С. Основные параметры и характеристики наиболее распространенного за рубежом пирикона ТН 9851 фирмы «Томсон ЦСФ», предназначенного для работы в спектральном диапазоне 8... 14 мкм:

катод — с косвенным подогревом, напряжение накала 6,3 В, ток накала 0,15 А, время разогрева 1 мин;

мишень — формат кадра 18 X 24 мм, минимальный полезный диаметр 17 мм, спектральная характеристика изображена на рис. 20.13, входное окно из германия или из кристалла КРС-5 толщиной $2,1 \pm 0,1$ мм, расстояние между мишенью и внутренней поверхностью входного окна 1,2...1,5 мм, оптимальная рабочая температура 30...35 °С;

габаритные и весовые данные — максимальная длина 165 мм, максимальный диаметр 29 мм, диаметр баллона 26,7 мм, масса 60 г; рабочие напряжения (токи) — мишень 125 В, электроды gs (рис. 20.14) 250 В (3...5 мкА), gs 200 В, gz 180 В, ток пьедестала 100...125 нА;

другие параметры — порог чувствительности (в диапазоне длин волн 8... 14 мкм) 4,5 мкА/Вт, разрешающая способность 8 лин/мм, температурная чувствительность 0,2 °С, количество строк развертки 625, частота кадров 25 кадр/с, полоса частот предусилителя 4 МГц, коэффициент усиления 3 дБ, максимально допустимая облученность мишени при длительной работе 40 Вт/ма, чувствительность мишени увеличивается на 30...50 % при повышении температуры от 25 до оптимального значения приблизительно 35 °С.

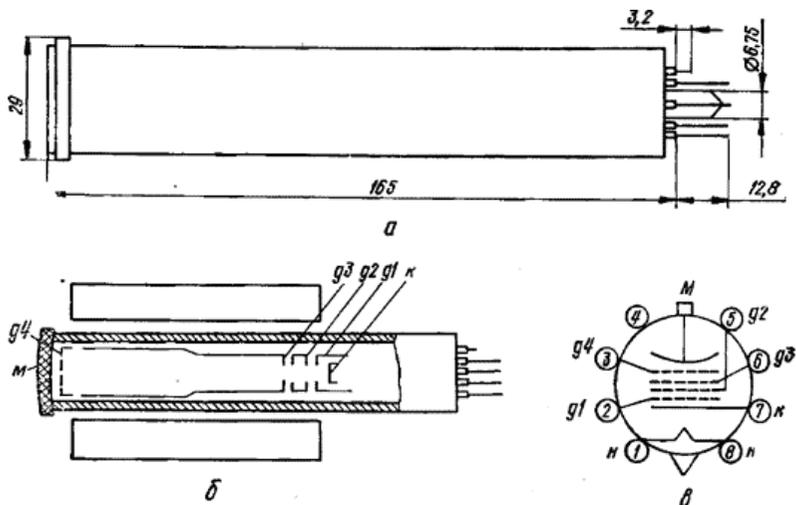


Рис. 20.14. Внешний вид (а), конструктивная схема (б) и цоколевка (в) пирикона ТН 9851

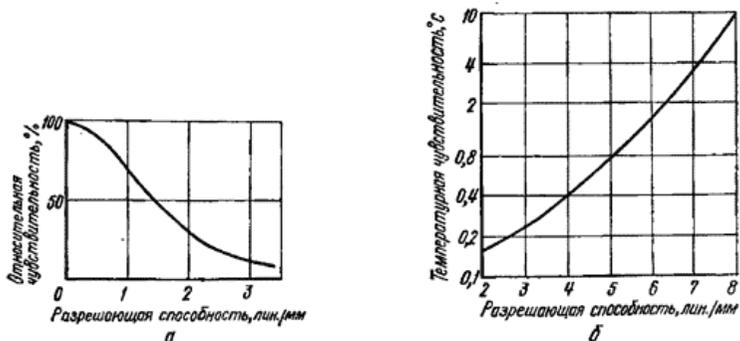


Рис. 20.15. Графики зависимости относительной (а) и температурной чувствительности (б) от разрешающей способности пирикона ТН 9851

Графики зависимостей относительной и температурной чувствительности от разрешающей способности пирикона изображены соответственно на рис 20.15.

В табл. 20.1 приведены основные характеристики пириконов, изготавливаемых иностранными фирмами.

Таблица 20.1.

Характеристики пириконов иностранного производства

Тип пирикона (страна)	Материал		Чувствительность, мкА/Вт	Разрешающая способность.	Минимально разрешаемая температура, °С
	мишени	окна			
P8090 (Англия)	ТГС (структурированная)	Ge	72	5...150 100	0,2 0,2
P8092 (Англия)		KRS			
E2130 (ФРГ)) ДТГС (сплошная и структурированная)	-5, Ge	-	300...350	0,2 0,2
202/A (США)		PbTiOs			
ER-2007 (Япония)				525	0,25
GM-IRC-11 (Япония)	PVFa	-	2,5	100 200	1...2 0,4...0,6
GM-IDPT (Япония)					
ТН9840 (Франция)	ТГС	Ge	3,5 4,5	100... 150 250	0,3...0,4 0,2
) ТН9846 (Франция)		KRS			
) ТН9851 (Франция)		-5 Ge			
) ТР9855 (Франция)		KRS			
)		-5			
S58XQ (США)	ТГФБ, ДТГФБ	Ge	—	250	0,5

20.5. Суперортикон

Суперортикон (от супер- и ортикон), в англоязычной терминологии *image orthicon* — передающая телевизионная трубка с накоплением заряда, использующая перенос изображения с фотокатода на двустороннюю мишень, считывание изображения с мишени медленными электронами и содержащая блок усиления сигнала вторичным электронным умножителем.

Самая совершенная из передающих вакуумных телевизионных трубок, основанных на внешнем фотоэффекте и вытеснившая иконоскоп из передающих ТВ-камер. Является развитием конструкции ортикона.

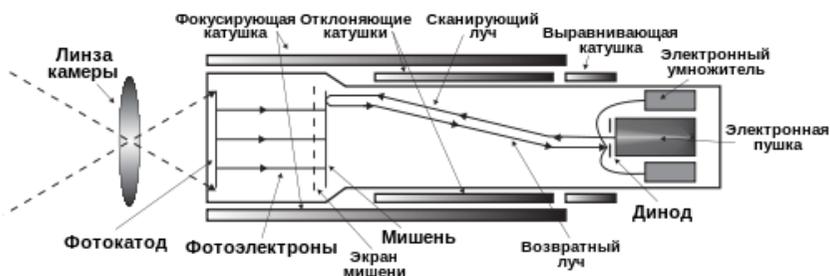


Схема суперортикона

Устройство

Суперортикон, в его классическом виде, состоял из трёх, конструктивно объединённых в одной вакуумной колбе, частей:

Секция переноса

Фактически представляла собой электронно-оптический преобразователь, позволявший увеличить чувствительность. На полупрозрачный тонкий фотокатод проецировалось изображение, вследствие этого фотоэлектроны выбивались из фотокатода и, под

действием магнитного фокусирующего и электрического ускоряющего полей летели к двусторонней мишени, откуда выбивали вторичные электроны, создавая на мишени потенциальный рельеф. Перед мишенью была мелкоструктурная сетка, на которой оседали выбитые вторичные электроны.

Секция накопления

Границей между секциями была двусторонняя мишень со слабой проводимостью. С противоположной от фотокатода стороны находилась электронная пушка, сканировавшая мишень под воздействием скрещенных полей катушек развёртки. Но напряжённость электрического поля была подобрана так, что вначале электроны ускорялись и фокусировались, а затем тормозились, и не долетая до мишени долей миллиметра, поворачивали назад, где и попадали в секцию умножения. При неосвещённом фотокатоде все электроны до мишени не долетали, а, если на мишени был потенциальный рельеф, часть электронов луча долетала до мишени и оседала на ней, уменьшая ток луча, попадавшего в секцию умножения.

Секция умножения

Представляла собой вторично-электронный (ВЭУ) умножитель, состоявший из нескольких пластин (динодов), на которые подавался возрастающий от пластины к пластине положительный потенциал. За счёт выбитых из динодов вторичных электронов сигнал мог усиливаться в тысячи раз. Преимущество ВЭУ перед обычным ламповым усилителем состояло в меньшем уровне шумов.

Впервые принцип построения суперорбитрона был описан американскими учёными А. Розе, П. Веймером и Х. Лоу в 1946 году. Конструкция фотокатода с сеткой и переносом изображения была предложена в 1939 году Г. В. Брауде.

Характеристики

Типичные студийные суперорбитроны дают отношение «сигнал/шум» 100 и выше при освещённости фотокатода 0,1—1,0 лк.

Самые чувствительные из суперортиконов позволяли вести съёмку при свете полной Луны (при использовании достаточно светосильных объективов) и даже почти в полной темноте (при освещённости фотокатода 10^{-7} — 10^{-8} лк).

Недостатки

Суперортикон не имел очевидных недостатков иконоскопа, но имел свои собственные — например, «кометные хвосты» за яркими объектами в кадре. Недостатками суперортикона были большие габариты, сложность эксплуатации и настройки, большая потребляемая электрическая мощность и т. д. Тем не менее, суперортиконы широко применялись в профессиональных телевизионных камерах, даже после появления более удобных видиконов, так как имели на порядок или даже два большую чувствительность.

21. Тепловизионные системы

21.1. Физические основы работы тепловизионных систем

Рассмотрим следующую схему работы тепловизоров (рис.21.1).

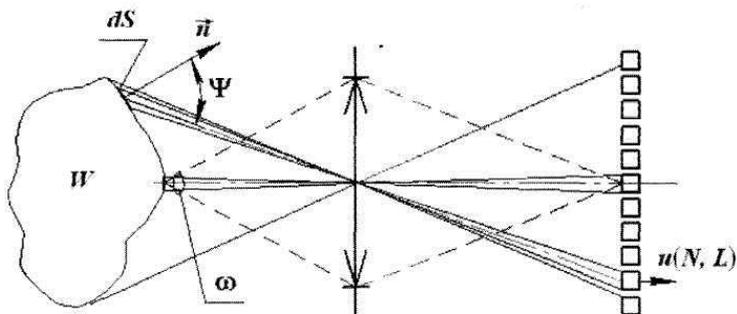


Рис. 21.1. Схема работы тепловизоров

На данной схеме приняты следующие обозначения:

W – светимость теплового излучения наблюдаемого объекта;
 ω – передний апертурный угол оптической системы тепловизора;

dS – элемент поверхности наблюдаемого объекта, нормаль \vec{n} к которому составляет угол Ψ с направлением наблюдения;

$U(N, L)$ – величина видеосигнала приемника излучения;

N – номер строки элемента изображения;

L – номер элемента в строке тепловизионного кадра.

Величина видеосигнала $U(N, L)$ определяется по следующей формуле:

$$u(N, L) = \frac{1}{\pi} \omega ds \cos \Psi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) W(\lambda, T, x', y') d\lambda, \quad (21.1)$$

$$W(\lambda, T, x', y') = \frac{1}{S} \iint_{(x,y)} W(\lambda, T, x, y) \cdot H(x' - x, y' - y) dx dy, \quad (21.2)$$

где

$$W(\lambda, T, x, y) = \varepsilon(\lambda, T, x, y) \cdot W^0(\lambda, T) \varepsilon(\Psi), \quad (21.2)$$

$$W^0(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}. \quad (21.3)$$

В формулах (21.2) – (21.5) приняты следующие обозначения:

$H(x'-x, y'-y)$ – функция рассеяния точки (ФРТ) оптической системы тепловизора; S – наблюдаемая поверхность объекта; ε – коэффициент излучения объекта; W^0 – светимость АЧТ.

На основании соотношений (21.1) – (21.3) можно выразить зависимость величины видеосигнала u_{λ} в тепловизорах от абсолютной температуры T и коэффициента излучения:

$$u_{\lambda} = K_{\lambda} \varepsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \quad (21.4)$$

где K_{λ} – коэффициент пропорциональности.

На основании соотношения (21.4) можно записать систему уравнений для выходных сигналов, которые имеют место в яркостных пирометрах и спектральных тепловизорах. Эта система уравнений формирует одну из проблем оптической пирометрии, заключающейся в том, что невозможно измерить истинную температуру поверхности реальных объектов без априорной информации о коэффициенте излучения ε_{λ} их поверхности:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{\lambda_1} = K_{\lambda} \varepsilon_{\lambda_1} C_1 \lambda_1^{-5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda_1 T} - 1}; \\ u_{\lambda_2} = K_{\lambda} \varepsilon_{\lambda_2} C_1 \lambda_2^{-5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda_2 T} - 1}; \\ u_{\lambda_n} = K_{\lambda} \varepsilon_{\lambda_n} C_1 \lambda_n^{-5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda_n T} - 1}. \end{array} \right. \quad (21.5 - 21.7)$$

Применительно к радиационным пирометрам проблема дистанционного измерения температуры записывается в виде:

$$u = \varepsilon \sigma T^4 \frac{K}{\pi}. \quad (21.8)$$

Если (21.1) записать в виде (21.9) или (21.10):

$$u(N, L) = \frac{1}{\pi} \omega ds \cos \Psi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) \times \\ \times \frac{1}{S} \iint_{(x,y)} \varepsilon(\lambda, T, x, y) \cdot W^0(\lambda, T) \cdot H(x' - x, y' - y) dx dy. \quad (21.9)$$

$$u(N, L) = K(\varepsilon, T) ds \cos \Psi, \quad (21.10)$$

то, так как справедливо равенство,

$$ds \cos \Psi = \text{const},$$

имеем формулировку второй проблемы тепловидения:

$$U(N, L) = K'(\varepsilon, T), \quad (21.11)$$

которая заключается в невозможности определения формы поверхности внутри их контура методами классического тепловидения.

21.2. Тепловизоры фирмы «AGEMA», модели 661 и модели 680

Данные модели тепловизоров предназначены для получения изображения слабонагретых объектов и имеют следующие характеристики:

- поле обзора – $5 \times 5^\circ$ для модели 661 или $10 \times 10^\circ$ для модели 680;
- оптическое разрешение – 100 элементов в строке (3') и 4,4' – для модели 680;
- число строк в кадре – 100;
- частота кадров – 16 Гц;
- пороговая температурная чувствительность обеспечивает возможность различать два абсолютно черных тела, находящихся при комнатной температуре, если разность их температур составляет значение $0,2^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{\text{пор}} = 0,2^\circ\text{C}$ на уровне 20°C);
- динамический диапазон изменяется от $T = 1^\circ\text{C}$ до 200°C ;
- диапазон регистрируемых температур объектов от -30°C до $+20^\circ\text{C}$.

Тепловизоры «АГЕМА» были разработаны по заданию военного ведомства, но нашли применение в медицине и промышленности: для проверки теплового режима электросетей, оборудования и т.д.

Рассмотрим структурную схему тепловизора «АГЕМА 661», которая приведена на рис.21.2.

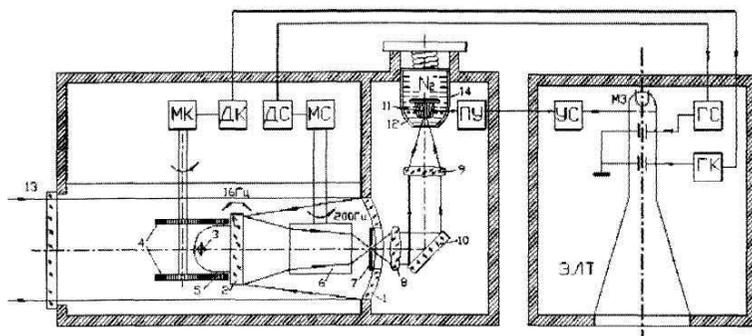


Рис.21.2. Структурная схема тепловизора фирмы «АГЕМА», модель 661

На рисунке приняты следующие обозначения:

- 1 – большое сферическое зеркало – \varnothing 195 мм; $f = 350$ мм
- 2 – малое плоское зеркало \varnothing 71,4 мм;
- 3 – горизонтальная ось колебания зеркала 2;
- 4 – соосные кулачки;
- 5 – круглые роликовые подшипники;
- 6 – многогранная (4-х гр.) призма сканирования (по строкам);
- 7 – диафрагма;
- 8, 9 – линзы;
- 10 – плоское зеркало;
- 11 – приемник излучения (InSb), $R \approx 50$ кОм.
- 12 – охлаждаемая диафрагма;
- 13 – защитное окно;
- 14 – сосуд Дюара;
- МК – мотор кадровой развертки;
- МС – мотор строчной развертки;
- ПУ – преусилитель;
- УС – усилитель;
- МЭ – модулирующий электрод ЭЛТ;
- ГС – генератор строчной развертки;
- ГК – генератор кадровой развертки;
- ДС – ДК – датчики сигналов синхронизации строк и кадров.

Данная схема работает следующим образом.

Оптическое излучение объекта попадает через защитное стекло 13 в объектив, состоящий из сферического зеркала 1 и плоского зеркала 2. Плоское зеркало 2 колеблется относительно горизонтальной оси 3 (перпендикулярной плоскости чертежа) с частотой 16 Гц, обеспечивая обзор пространства со скоростью 16 кадров в секунду, при времени обратного хода, составляющего 12%. Колебательное (пилообразное) перемещение зеркала осуществляется при помощи двух противоположно действующих соосных кулачков 4, воздействующих на круглые роликовые подшипники 5, смонтированные на верхнем и нижнем концах колеблющегося плоского зеркала. Кулачки вращаются мотором кадровой развертки МК. Угол поворота плоского зеркала равен 5° .

Сканирование в плоскости, перпендикулярной направлению сканирования зеркала (т. е. по строкам), осуществляется вращением четырехгранной призмы 6. Обычно используется германиевая или кремниевая призма, вращающаяся со скоростью 200 об/с мотором

строчной развертки МС. За каждый оборот призмы сканируется 4 строки, что обеспечивает скорость обзора 1600 строк в секунду. Поэтому, так как в кадре 100 строк, скорость обзора равна 16 кадров в секунду.

Рабочие поверхности призмы просветляются окисью кремния для обеспечения максимального пропускания в области спектра от 2 до 5,4 мкм.

Изображение элемента обзора формируется оптической системой в плоскости диафрагмы 7, передается линзами 8 и 9 и плоским зеркалом 10 на приемник 11, закрытый охлаждаемой диафрагмой 12, имеющей отверстие диаметром 0,5 мм.

Сосуд Дюара 14 заливается жидким азотом до уровня, находящегося на расстоянии 5 мм от верхней кромки.

Сигнал, вырабатываемый приемником излучения, усиливается предусилителем ПУ и усилителем УС и воздействует на модулирующий электрод МЭ электронно-лучевой трубки ЭЛТ индикатора.

Развертка луча индикатора по строкам и кадрам осуществляется генераторами строчной ГС и кадровой разверток, которые синхронизируются датчиками сигналов синхронизации строк ДС и кадров ДК. Последние формируют сигналы синхронизации с помощью фотодиодов, освещаемых светом, прерываемые модулирующими дисками синхронно с вращением призмы и колебанием плоского зеркала.

21.3. Оптическая схема тепловизора «Радуга-2»

Тепловизор «Радуга-2» предназначен для медико-биологических исследований и медицинской диагностики, а также для термографических исследований различных промышленных объектов.

Оптическая схема тепловизора «Радуга-2» приведена на рис.21.3.

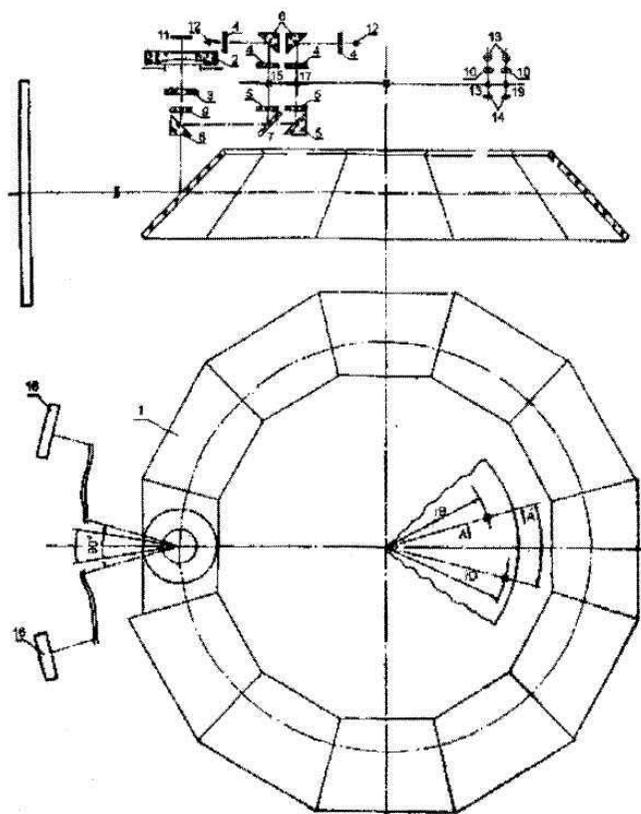


Рис.21.3. Оптическая схема тепловизора «Радуга-2»

На рисунке приняты следующие обозначения:

- 1 – зеркальный барабан Вейлера с 12 гранями, имеющими различный наклон к оси вращения барабана;
- 2, 3 – зеркала объектива оптической системы ($f' = 64$ мм, $D_{\text{вх.зр.}} = 40$ мм);
- 4, 5, 3, 10 – линзы;
- 6, 8 – призмы;
- 7 – светоделитель;

- 11 – линейчатый ИК приемник излучения с 11 чувствительными элементами;
- 12 – 2 опорных источника ИК излучения, представляющие собой калиброванные лампы типа ТРШ 1500-2300 с различными радиационными температурами;
- 13 – источники излучения (лампа СМН-30-60-2) схемы синхронизации строк и кадров (подкадров);
- 14 – приемники излучения (фотодиоды типа КФДМ для упомянутой схемы синхронизации);
- 4, 15, 17 – щели на диске синхронизации для ввода в приемную часть системы излучения соответственно 1-го и 2-го опорных источников;
- 16 – эталонный излучатель;
- 18, 19 – отверстия на диске синхронизации для формирования синхроимпульсов строчной и кадровой разверток.

Данная оптическая схема тепловизора «Радуга» содержит три отдельных канала:

- 1 – рабочий канал, состоящий из элементов 1, 2, 3 и 11;
- 2 – канал ввода двух опорных источников уровня черного и белого в рабочий канал. Этот канал содержит элементы 12, 4, 6, 15, 17, 5, 7, 8 и 9;
- 3 – канал синхронизации кадров и подкадров, состоит из элементов 13, 10 и приемника лучистой энергии (ПЛЭ) 14, а 18, 19 – отверстия в диске синхронизации.

Работа схемы.

Тепловое излучение от объекта и фона, отразившись от зеркальной грани барабана Вейлера 1, воспринимается зеркальным объективом Кассегрена 2, 3 и направляется на линейчатый ПЛЭ 11. Он содержит 11 чувствительных элементов, поэтому поворотом одной грани барабана 1 реализуется первый подкадр, состоящий из 11 строк. Для построения второго подкадра, находящегося ниже первого, вторая грань барабана имеет несколько иной наклон по отношению к основанию. Аналогично формирование третьего подкадра получается поворотом третьей грани с соответствующим наклоном и т. д. Последняя двенадцатая грань формирует 12-й подкадр также с 11-ю строками. В итоге, получаемый кадр содержит 12 подкадров, в каждом 11 строк. Таким образом, полученный кадр содержит $N_c = 132$ строки. Число элементов N_{sc} в каждой из строк получается из следующего соотношения:

$$N_{zc} = T_k / N_c \tau_0$$

где T_k – период кадра = 1/25 с;

N_c – число строк;

τ_0 – время формирования информации одного элемента разложения кадра.

Во всех типах тепловизоров «Радуга» $\tau_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ с; что дает $N_{zc} = 140$.

Для разделения во времени процесса формирования двух опорных сигналов формирующих уровни черного с температурой 20°C и уровня белого с 50°C, в оптической схеме на диске синхронизации нанесены отверстия 15 и 17. Для получения импульсов синхронизации кадров и подкадров имеются отверстия 18 и 19. Для понимания работы этих двух каналов рассмотрим топологию отверстий на диске синхронизации (рис.21.4).

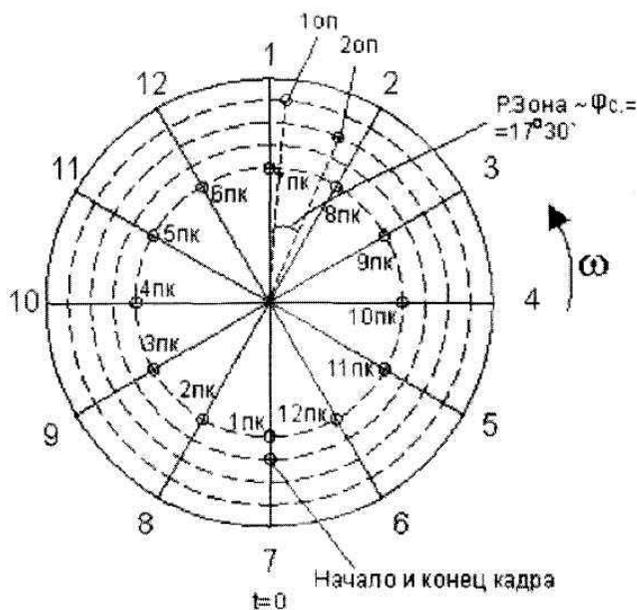


Рис.21.4. Топология диска синхронизации тепловизора «Радуга-2»

На диске нанесены четыре семейства отверстий, находящихся на окружностях разного диаметра. На первой и второй от края окружностях нанесены по одному отверстию для ввода первого и второго опорных источников в рабочий канал тепловизора. На следующей окружности имеется внизу одно отверстие для синхронизации начала и конца кадра. На внутренней окружности нанесены 12 отверстий через 30°. Эти отверстия синхронизируют каждый из 12 подкадров при вращении барабана Вейлера.

Технические характеристики и параметры тепловизора «Радуга-2» следующие:

пороговая чувствительность к перепаду температур на уровне 30°С	– $\Delta T_{пор} = 0,2^{\circ}\text{C}$;
поле обзора	– $20^{\circ} \times 17^{\circ}30'$;
скорость сканирования	– 25 кадр/с;
число строк в кадре	– 132;
число элементов в строке	– 140;
диапазон исследуемых температур	– 0 – 200°С;
диапазон измеряемых температур	– 0 – 80°С;
диапазон расстояний до объекта	– 0,4 м . . . ∞;
объем цифровой памяти	– 384 к. бит;
количество серых или цветных градаций	– 10;
вид обработки видеосигнала	– интерактивный.

21.4. Тепловизионный модульный комплекс «Радуга-ЭВМ»

Тепловизионный комплекс изготовлен на базе схемы тепловизора «Радуга-2» и предназначен для автоматизированной обработки тепловых изображений применительно к задачам неразрушающего контроля с целью выявления дефектов в контролируемых изделиях и медицины для диагностики различных заболеваний при массовых обследованиях населения. Комплекс позволяет устранить искажение видеотракта и производить абсолютные измерения радиационных

температур, входит в модульный ряд тепловизоров «Радуга» и работает в комплекте с ЭВМ.

Технические характеристики и параметры тепловизионного комплекса следующие:

пороговая чувствительность к перепаду температур	$-\Delta T_{\text{пор}} = 0,2^{\circ}\text{C};$
угловые размеры поля обзора, угл. градуса	$- 20^{\circ} \times 17^{\circ}5';$
частота сканирования, Гц	$- 25;$
диапазон исследуемых температур	$- 0 - 200^{\circ}\text{C};$
относительная погрешность измерения радиационных температур	$- 1,5\%;$
время ввода термограммы в ЭВМ, сек	$- 1,76;$
напряжение питающей сети	$- 220\text{В}/50$ Гц.

Визуализация изображения осуществляется на экране цветного или черно-белого телевизора. Приемник излучения – одиннадцатизлементный охлаждаемый жидким азотом фотодиод на основе InSb.

Напряжение питающей сети	$- 220 \text{ В}/50 \text{ Гц.}$
Потребляемая мощность	$- 520 \text{ Вт.}$
Масса прибора	$- 230 \text{ кг.}$
Год разработки	$- 1983.$

21.5. Оптическая схема тепловизора ТВ-03

Оптическая схема тепловизора ТВ-03 приведена на рис.21.5 .

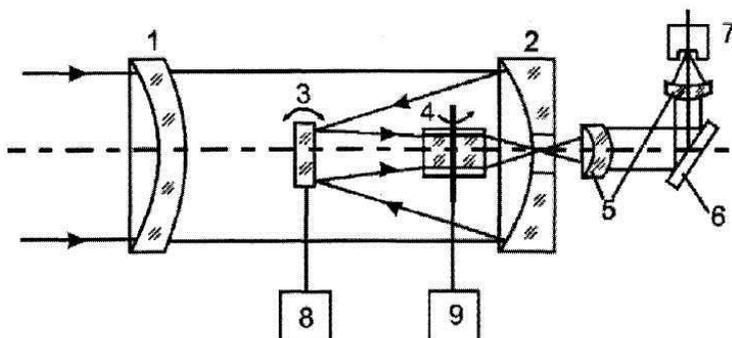


Рис.21.5. Оптическая схема тепловизора ТВ-03:

1 – насадочная сменная линза; 2 – зеркало сферическое;
 3 – плоское зеркало; 4 – восьмигранная призма; 5 – линзовый коллектив;
 6 – зеркало; 7 – приемник излучения; 8, 9 – механизмы кадрового и строчного сканирования

Технические параметры тепловизора ТВ-03 следующие:

угол поля зрения	– $\omega_{зр} = 4,5^\circ$ × $4,5^\circ$;
частота кадров	– $f_k = 16$ Гц;
число строк	– $N_c = 100$;
число элементов сторок	– $N_{эс} = 100$;
температурная чувствительность на уровне $T = 20^\circ\text{C}$	– $\Delta T_{нор} = 0,2^\circ\text{C}$.

21.6. Оптическая схема тепловизора «Оптитерм»

Данная схема тепловизора разработана фирмой Barnes Eng. Co (США), рис.21.6.

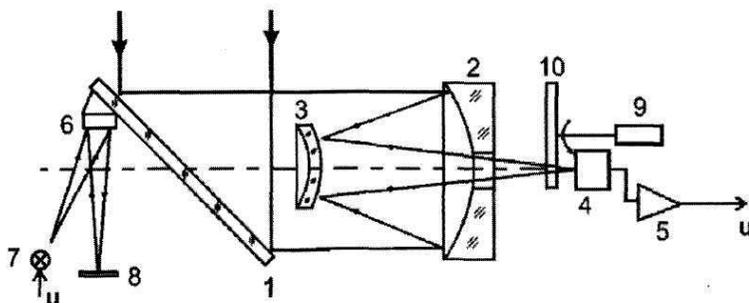


Рис. 21.6. Оптическая схема тепловизора «Оптитерм»

Оптическая схема следующая:

- 1 – плоское сканирующее зеркало;
- 2, 3 – параболическое и гиперболическое зеркала;
- 4 – приемник излучения;
- 5 – предусилитель;
- 6 – плоское зеркало;
- 7 – источник света;
- 8 – фотопленка;
- 9 – двигатель;
- 10 – модулятор.

В качестве приемника излучения используется неохлаждаемый полупроводниковый болометр.

Технические параметры тепловизора следующие:

угол поля обзора	– $\omega_{зр} = 20^\circ \times 10^\circ$;
	– $T_k = 17$ мин – в
	первых образцах;
период кадров	$T_k = 2$ мин – в
	последних моделях;
диапазон фокусировки	– $l = 2, 4\text{ м} \dots \infty$;
температурная чувствительность	– $\Delta T_{нор} = 0,04^\circ\text{С}$.

число градаций – восемь черно-белых
изображений N градаций.

Для индикации изображения используется зеркало 6, укрепленное на обратной стороне сканирующего зеркала 1. Световое пятно от зеркала 6 сканирует по поляроидной или обычной фотопленке. Таким образом, обеспечивается синхронизация визуализированного изображения. Для регистрации плотности изображения введен генератор серого тона, который обеспечивает воспроизведение восьми тонов от белого до черного.

21.6. Функциональная схема тепловизора «Рубин»

Схема тепловизора «Рубин» приведена на рис. 21.7.

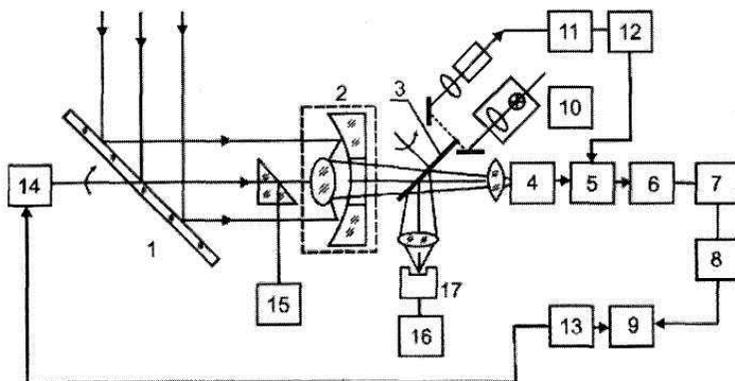


Рис.21.7. Функциональная схема тепловизора «Рубин»:
1 – сканирующее зеркало; 2 – зеркальный объектив; 3 – модулятор;
4 – приемник излучения; 5 – предусилитель; 6 – усилитель;
7 – синхронный детектор; 8 – усилитель мощности; 9 – механизм записи;
10 – световой датчик; 11 – фотодиод; 12 – усилитель опорного сигнала;
13 – блок управления сканированием; 14 – механизм сканирования;
15 – визир; 16 – блок управления температурой; 17 – эталонный излучатель

Объектив состоит из эллиптического и сферического зеркал. В оптическую схему встроен модулятор 3, который перекрывает поток излучения, и в эти моменты на приемник попадает излучение от эталонного излучателя 17 ($f_m = 1360$ Гц). Модулятор 3 используется для получения опорного сигнала предварительного усилителя 5. На выходе приемника излучения 4 возникает напряжение, пропорциональное разности потоков от объекта и эталонного излучателя. На вход предусилителя 5 поступает 2 сигнала: 1 – от приемника, 2 – компенсирующий, от усилителя опорного сигнала 12. Регулируя опорный сигнал, добиваются, чтобы результирующий сигнал был равен нулю. После предварительного усиления сигнал проходит обработку в блоке управления (6-8) и поступает в блок регистрации 9, где записывается на электрохимическую бумагу типа ЭХБ-4 или ЭХБ-6. Разрешающая способность записи – 3-4 эл/мм при размере изображения 90×45 мм и 150 строк в кадре.

Технические параметры и характеристики:

поле зрения	– $10^\circ \times 20^\circ$;
частота кадров	– $f_k - 0,016$ Гц;
период кадров	– $T_k - 1$ мин;
число строк	– $N_c - 200$;
число элементов в строке	– $N_{эс} - 200$;
эквивалентное фокусное расстояние	– $F_{экв.} - 115$ мм;
диаметр входного зрачка	– $D_{вх} - 100$ мм;
температурная чувствительность	– $\Delta T_{пор} - 0,1^\circ\text{C}$.

Тепловизор предназначен для регистрации стационарных и медленно меняющихся тепловых полей различных медицинских и промышленных объектов.

22. Моделирование тепловизионных изображений

Для моделирования тепловизионных изображений используется следующая схема, рис.22.1:

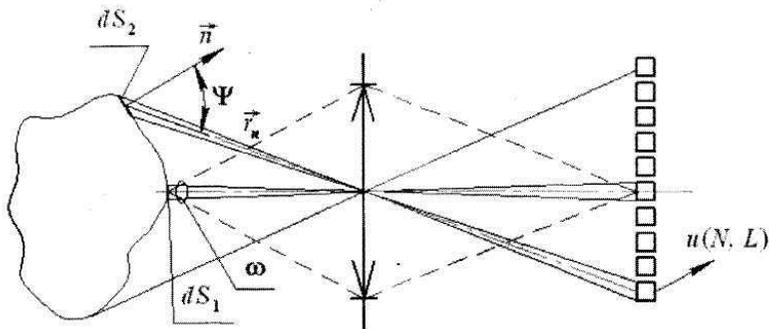


Рис. 22.1. К теории моделирования тепловизионных изображений

Теория моделирования тепловизионных изображений базируется на физических основах работы тепловизионных систем, подробно рассмотренных в п.9.1. В конечном итоге моделируется величина видеосигнала $u(N, L)$:

$$u(N, L) = \frac{1}{\pi} \omega \cdot ds \cos \psi \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) w'(\lambda, T, x', y') dy, \quad (22.1)$$

где

$$W'(\lambda, T, x', y') = \frac{1}{S} \iint_{(x,y)} W(\lambda, T, x, y) \cdot H(x' - x, y' - y) dx dy, \quad (22.2)$$

$$W(\lambda, T, x, y) = \varepsilon(\lambda, T, x, y) \cdot w^0(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\psi). \quad (22.3)$$

Для моделирования влияния уравнения формы объекта $f(x, y, z) = 0$ на значения видеосигнала, используется следующее соотношение:

$$\cos \Psi = \frac{\vec{\nabla} f \cdot \vec{r}_n}{|\vec{\nabla} f \cdot \vec{r}_n|}, \quad (22.4)$$

где – $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$ оператор Гамильтона, а \vec{r}_n – вектор направления наблюдения.

Влияние функции рассеяния точки (ФРТ) оптической системы тепловизора на распределение яркости в изображении формируется сверткой светимости поверхности объекта $W(\lambda, T; x, y)$ и ФРТ $H(x' - x; y' - y)$, математическая запись которой представлена соотношением (2). В свою очередь, математическая запись влияния температуры T , коэффициента излучения $\varepsilon(\lambda, T; x, y)$ и его индикатрисы излучения $\varepsilon(\psi)$ материала поверхности объекта на значение светимости изображения, представлена формулой (3).

23. Моделирования поляризационных тепловизионных изображений

Основные положения общей теории моделирования поляризационных тепловизионных изображений объектов следующие.

Вектор-параметр Стокса энергетической яркости теплового излучения объектов представляется в виде:

$$L_j = L_0 \begin{bmatrix} 1 \\ P_0 \cos 2t_0 \\ P_0 \sin 2t_0 \\ 0 \end{bmatrix} = L_0 L'_j, \quad (23.1)$$

где L_0, P_0, t_0 – соответственно энергетическая яркость, степень и азимут поляризационного излучения объекта; L'_j – нормированный вектор-параметр Стокса.

Матрица поляризационного фильтра представляется в виде:

$$\tau_{ij} = \tau_n \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\delta & \sin 2\delta & 0 \\ \cos 2\delta & \cos^2 2\delta & \sin 2\delta \cos 2\delta & 0 \\ \sin 2\delta & \sin 2\delta \cos 2\delta & \sin^2 2\delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (23.2)$$

где δ – азимут поляризации фильтра.

В общем случае моделируются двумерные функции яркости, степени и азимута поляризации теплового излучения объекта:

$$\begin{aligned} L_0 &= L_0(N, K); \\ L_0 &= L_0(N, K); \\ t_0 &= t_0(N, K). \end{aligned} \quad (23.3)$$

Также можно моделировать двумерную функцию видеосигналов в поляризованном свете:

$$u_i = \frac{1}{\pi} \omega \cdot ds \cos \Psi \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) W'(\lambda, T, x', y') d\lambda \right] \sum_{j=1}^4 \tau_j L'_j; \quad (23.4)$$

где

$$W'(\lambda, T, x', y') = \frac{1}{S} \iint_{(x,y)} W(\lambda, T, x, y) \cdot H(x' - x, y' - y) dx dy; \quad (23.5)$$

$$W(\lambda, T, x, y) dy = \varepsilon(\lambda, T; x, y) \cdot W^0(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\Psi). \quad (23.6)$$

В конечном итоге, двумерная функция видеосигналов в поляризованном свете может быть представлена в виде:

$$u_i(N, K) = A \sum_{j=1}^4 \tau_j L'_j(N, K), \quad (23.7)$$

где

$$A = \frac{1}{\pi} \omega \cdot ds \cos \Psi \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) W'(\lambda, T, x', y') d\lambda \right]. \quad (23.8)$$

С учетом (23.1) и (23.2) (23.7) принимает вид, при $i = 1$

$$u_1(N, K) = A \tau_n \left[1 + P_0(N, K) \cos 2(t_0 - \delta) \right]. \quad (23.9)$$

Выражение (23.9) представляет собой двумерную функцию видеосигналов с учетом поляризации теплового излучения поверхности объектов.

Для моделирования формы внутри контура объекта необходимо учесть, что степень P_0 связана с углом ориентации по формуле :

$$P_0(N, K) = a \left[1 - \cos \Psi(N, K) \right]. \quad (23.10)$$

Значение $\cos \Psi(N, K)$ также связано с уравнением формы через оператор Гамильтона:

$$\cos \Psi(N, K) = \frac{(\vec{n} \cdot \vec{r}_n)}{|\vec{n} \cdot \vec{r}_n|}, \quad (23.11)$$

где

$$\vec{n} = \overrightarrow{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \vec{k}. \quad (23.12)$$

Особый интерес для практики представляет обратная задача поляризационного тепловидения – распознавание формы внутри контура объектов. В процессе решения этой задачи был разработан ряд способов и устройств, которые защищены патентами РФ.

В конечном счете, получен ряд способов распознавания формы объектов внутри контура на основе получения и анализа поляризационных тепловизионных изображений (ПТИ) объектов соответственно с четырьмя, тремя, двумя азимутами объектов соответственно 0° и 45° и двумя с учетом эллиптичности теплового излучения объектов.

В качестве примера рассмотрим один из способов распознавания формы объектов на основании двух ПТИ с азимутами 0° и 45° . Величина видеосигналов при этих азимутах поляризации равна:

$$\begin{cases} u_1^{\delta=0}(N, K) = [1 + P_0(N, K) \cos 2t_0(N, K)] \cdot A \cdot \tau_n; \\ u_2^{\delta=45}(N, K) = [1 + P_0(N, K) \sin 2t_0(N, K)] \cdot A \cdot \tau_n. \end{cases} \quad (23.13)$$

После нормировки они принимают вид:

$$\begin{cases} u_1(N, K) = u_1^{\delta=0} / A \cdot \tau_n, \\ u_2(N, K) = u_1^{\delta=45} / A \cdot \tau_n. \end{cases} \quad (A)$$

В итоге получена система двух уравнений с двумя неизвестными (P_0 и t_0):

$$\begin{cases} u_1(N, K) = [1 + P_0(N, K) \cos 2t_0(N, K)]; \\ u_2(N, K) = [1 + P_0(N, K) \sin 2t_0(N, K)]. \end{cases} \quad (23.14)$$

Решение системы:

$$\cos 2t_0(N, K) = \frac{u_1(N, K) - 1}{P_0(N, K)};$$

$$u_2(N, K) = \left[1 + P_0(N, K) \times \sqrt{1 - \frac{[u_1(N, K) - 1]^2}{P_0^2(N, L)}} \right] \quad (23.15)$$

Получено квадратное уравнение:

$$P_0^2(N, K) \times [u_1(N, K) - 1]^2 = [u_2(N, K) - 1]^2,$$

$$P_0(N, K) = \pm \frac{u_2(N, K) - 1}{u_1(N, K) - 1}. \quad (23.16)$$

Воспользуемся следующей формулой:

$$P_0(N, K) = a [1 - \cos \Psi(N, K)];$$

$$\cos \Psi(N, K) = 1 \pm \frac{u_2(N, K) - 1}{au_1(N, K) - 1};$$

$$\Psi(N, K) = \arccos \left[1 \pm \frac{u_2(N, K) - 1}{u_1(N, K) - 1} \right].$$

(23.17)

Воспроизведение формы, например, внутри контура АСВD и вдоль кривой АВ, находящейся в плоскости ХОУ реализуется по формуле (23.18) (рис. 23.1).

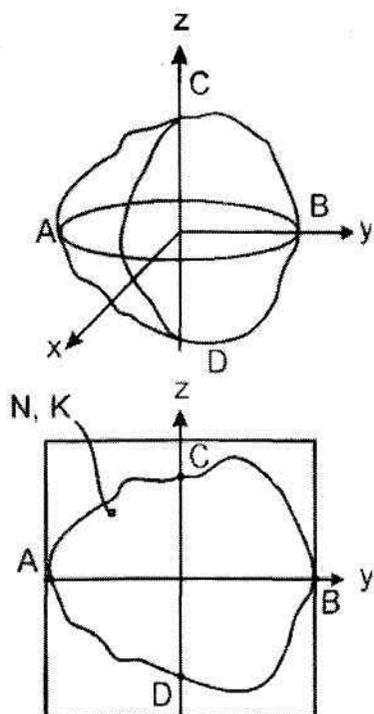


Рис. 23.1. К способу распознавания формы объектов на основе анализа ПТИ

В свою очередь, воспроизведение формы вдоль кривой CD, находящейся в плоскости XOZ, реализуется по формуле (23.9).

$$X(N, K) \Big|_{z=0} = Y(N, L) \cdot \operatorname{tg} \Psi(N, K), \quad (23.18)$$

$$X(N, K) \Big|_{y=0} = Z(N, L) \cdot \operatorname{tg} \Psi(N, K). \quad (23.19)$$

24. Методика расчета пороговой температурной чувствительности тепловизионных устройств

Методика расчета пороговой разности температур $\Delta T_{пор}$ тепловизионного устройства, эквивалентная схема которого приведена на рис. 24.1, заключается в следующем. Рассмотрим выражение для спектрального потока Φ_λ теплового излучения на чувствительном слое ИК приемника:

$$\Phi_\lambda = \frac{W_\lambda}{\pi} A_0 \alpha \beta \tau_0(\lambda), \quad (24.1)$$

где W_λ – спектральная поверхностная плотность потока излучения объекта (спектральная освещенность, формируемая излучением объекта на входном зрачке объектива тепловизионного устройства); A_0 – площадь входного зрачка оптической системы; $\tau_0(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания оптической системы; α, β – угловые размеры чувствительного элемента приемника излучения.

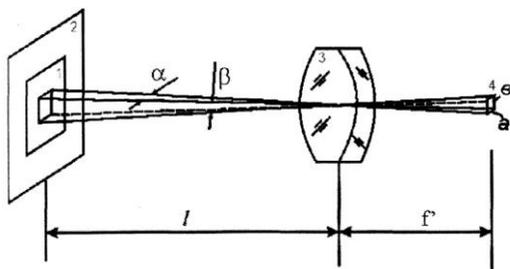


Рис.24.1. Эквивалентная схема тепловизионного устройства:
 1 – объект; 2 – фон; 3 – оптическая система с эффективной площадью входного зрачка A_0 ; 4 – чувствительный элемент линейчатого ИК приемника

Дифференциальное изменение потока в зависимости от изменения температуры объекта наблюдения можно выразить в виде:

$$\frac{\partial \Phi_{\lambda}}{\partial T} = \frac{\alpha \beta}{\pi} A_0 \tau_0(\lambda) \frac{\partial W_{\lambda}}{\partial T}. \quad (24.2)$$

Сигнал приемника, обусловленный дифференциальной разностью температур между объектом и фоном, можно получить, умножив выражение (24.2) на спектральную чувствительность S_{λ} :

$$\frac{\partial u_{\lambda}}{\partial T} = S_{\lambda} \frac{\partial \Phi_{\lambda}}{\partial T} = \frac{1}{\pi} \alpha \beta A_0 \tau_0(\lambda) \frac{\partial W_{\lambda}}{\partial T} S_{\lambda}, \quad (24.3)$$

так как спектральная чувствительность S_{λ} связана со спектральной обнаружительной способностью D^*_{λ} чувствительного элемента приемника зависимостью:

$$S_{\lambda} = \frac{u_n}{\Phi_n^{\lambda}} = \frac{u_n D^*_{\lambda}}{\sqrt{ab \Delta f_R}}, \quad (24.4)$$

где u_n – среднеквадратичное напряжение шума приемника в полосе частот Δf_R электрического фильтра,
 a, b – размеры чувствительного элемента приемника излучения,

то выражение (24.3) с учетом (24.4) принимает вид:

$$\frac{\partial u_\lambda}{\partial T} = \frac{\alpha \beta A_0 \tau_0(\lambda) u_n D_\lambda^*}{\pi \sqrt{ab \Delta f_R}} \frac{\partial W_\lambda}{\partial T} \quad (24.5)$$

Интегрируя (24.5) по длинам волн, получаем следующую формулу для изменения выходного сигнала приемника при воздействии на него сложного по структуре излучения и изменения температуры:

$$\frac{\partial u}{\partial T} = \frac{\alpha \beta A_0 u_n}{\pi \sqrt{ab \Delta f_R}} \int_0^\infty \frac{\partial W_\lambda}{\partial T} \tau_0(\lambda) D_\lambda^* d\lambda \quad (24.6)$$

В случае малых сигналов (24.6) можно представить в виде:

$$\frac{\Delta u}{\Delta T} = \frac{\alpha \beta A_0 u_n}{\pi \sqrt{ab \Delta f_R}} \int_0^\infty \frac{\partial W_\lambda}{\partial T} \tau_0(\lambda) D_\lambda^* d\lambda \quad (24.7)$$

Тогда, используя (24.7), можно записать выражение для отношения «сигнал/шум»:

$$\frac{\Delta u}{u_n} = \Delta T \frac{\alpha \beta A_0}{\pi \sqrt{ab \Delta f_R}} \int_0^\infty \frac{\partial W_\lambda}{\partial T} \tau_0(\lambda) D_\lambda^* d\lambda \quad (24.8)$$

Так как $\Delta T_{\text{пор}}$ определяется при $(\Delta u/u_n) = 1$, то из (24.8) имеем:

$$\Delta T_{\text{пор}} = \frac{\pi \sqrt{ab \Delta f_R}}{\alpha \beta A_0 \int_0^{\infty} \frac{\partial W_\lambda}{\partial T} \tau_0(\lambda) D_\lambda^* d\lambda} \quad (24.9)$$

Рассмотрим определение $\Delta T_{\text{пор}}$ по излучению абсолютно черного тела, то есть когда поверхностная плотность излучения W_λ определяется по функции Планка для светимости:

$$W_\lambda = C_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1}, \quad (24.10)$$

где C_1 и C_2 – постоянные в формуле Планка.

Так как в формуле (24.10) член $e^{C_2/\lambda T} \gg 1$, то выражение $\frac{\partial W_\lambda}{\partial T}$ для производной принимает вид:

$$\frac{\partial W_\lambda}{\partial T} \approx \frac{C_2}{\lambda T^2} W_\lambda. \quad (24.11)$$

Тогда, подставив (24.11) в (23.9), для $\Delta T_{\text{пор}}$ имеем:

$$\Delta T_{\text{пор}} = \frac{\pi \sqrt{ab \Delta f_R} T^2}{\alpha \beta A_0 C_2 \int_0^{\infty} \frac{1}{\pi} W_{\lambda} \tau_0(\lambda) D_{\lambda}^* \frac{d\lambda}{\lambda}} \quad (24.12)$$

Для упрощения процедуры интегрирования знаменателя выражения (24.12), воспользуемся следующим соотношением, полученным с привлечением формулы (24.4):

$$S_{\lambda} = \frac{S}{K_{\text{э}}} S(\lambda) = \frac{u_n}{K_{\text{э}} \Phi_n} S(\lambda) = \frac{u_n D_{\lambda}^*}{\sqrt{ab \Delta f_{\text{э}}}}, \quad (24.13)$$

где Φ_n – пороговый поток приемника излучения;

S – интегральная чувствительность приемника излучения по эталонному источнику;

$K_{\text{э}}$ – коэффициент использования приемником излучения эталонного источника ($T_{\text{э}} = 500 \text{ K}$);

$S(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность приемника излучения. Тогда, на основании (24.13), D_{λ}^* принимает следующий вид:

$$D_{\lambda}^* = \frac{D^*}{K_{\text{э}}} S(\lambda), \quad (24.14)$$

$$D^* = \frac{\sqrt{ab\Delta f_3}}{\Phi_n}$$

где Φ_n – обнаружительная способность приемника излучения.

И наконец, подставив (24.14) в (24.12) и заменив пределы интегрирования на конечный интервал $\lambda_1 \dots \lambda_2$ границы чувствительности приемника, получим следующую рабочую формулу для определения $\Delta T_{\text{нор}}$:

$$\Delta T_{\text{нор}} = \frac{\pi \sqrt{ab\Delta f_R} K_3 T^2}{\alpha \beta A_0 C_2 D^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) W_\lambda \tau_0(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda}} \quad (24.15)$$

Для тепловизионных устройств, работающих при окружающей температуре, расчет $\Delta T_{\text{нор}}$ можно вести при следующих условиях:

- 1) $T = 293 \text{ К}$; $C_2 = 1,439 \cdot 10^2 \text{ см} \cdot \text{К}$; $C_1 = 3,74 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мкм}^4$;

$$A_0 = \frac{\pi d^2}{4}$$

- 2) , где d – диаметр входного зрачка объектива тепловизионного устройства;

$$\alpha = a/f' ; \quad \beta = b/f' ,$$

- 3) где f' – фокусное расстояние объектива;

- 4) $\Delta f_R = 1/2\tau_d$; где τ_d – время сканирования одного элемента разложения кадра, которое определяется по следующей формуле:

$$\tau_d = \frac{T_э}{AB} = \frac{\eta T_k}{Ank} = \frac{1}{Ankf_k}, \quad (24.16)$$

где n – число активных строк в подкадре;
 k – число подкадров;
 η – коэффициент использования развертки кадра;
 $T_э$ – эффективное значение периода кадра;
 A – число элементов в строке;
 B – число строк в кадре;
 T_k – полное время кадра;
 f_k – частота кадров.

Анализ выражения (24.15) показывает, что в нем функционально связаны параметры объекта, слоя атмосферы между объектом и прибором, оптической системы, приемника излучения и электронного тракта тепловизора. Поэтому, при проектировании тепловизоров, для расчета и выбора одних параметров составных звеньев тепловизора, при заданных других, соотношение (24.15) представляет собой теоретический критерий выбора параметров составных звеньев тепловизионной системы.

25. Выбор полосы пропускания частот тракта тепловизора

Реализация оптимального фильтра в теории ОЭС при решении задачи выделения одиночного импульса (прямоугольного) на фоне белого шума может осуществляться с помощью RC-фильтра. Для системы, создающей изображение, желательно обеспечить быстрое нарастание сигнала. На основании результатов, приведенных в ряде работ, отметим следующее.

Задаваясь значением частоты среза $f_c = 1/2\tau_{ex}$ получим $\tau = RC = 1/2\pi f_c = \tau_{ex}/\pi$, то есть на время действия импульса сигнал на выходе нарастает до значения установившегося сигнала u_0 .

$$u(\tau_{ex}) = (1 - e^{-\tau_{ex}/\tau})u_0 = (1 - e^{-\pi})u_0 = 0,96u_0. \quad (25.1)$$

Шумовая полоса такого фильтра равна:

$$\Delta f_{ш} = \int_0^{\infty} K^2(f)df = \int_0^{\infty} \frac{df}{[1 + (2\pi f\tau)^2]}. \quad (25.2)$$

Поскольку

$$\int \frac{dx}{a^2 + x^2} = \frac{1}{a} \operatorname{arctg} \frac{x}{a},$$

то

$$\Delta f_{ш} = \frac{1}{2\pi\tau} \operatorname{arctg}(2\pi f\tau) \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{4\tau}. \quad (25.3)$$

Так как частота среза f_c равна:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} \rightarrow \tau = \frac{1}{2\pi f_c},$$

$$\Delta f_{\text{ш}} = \frac{1}{4}(2\pi f_c) = \frac{\pi}{2} f_c,$$

то с учетом (1) имеем:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} \rightarrow \tau = \frac{1}{2\pi f_c},$$

(25.4)

$$\Delta f_{\text{ш}} = \frac{1}{4}(2\pi f_c) = \frac{\pi}{2} f_c,$$

Выражение (25.4) показывает, что $\Delta T_{\text{нор}}$ у тепловизора с RC фильтром с частотой среза $f_c = 1/(2\tau_{\text{эк}})$ будет больше в 1,57 раз, чем у тепловизора с оптимальным фильтром.

26. Приближение М.М. Мирошникова для расчета температуры чувствительности тепловизоров

В монографии М.М. Мирошникова приведено следующее выражение для расчета $\Delta T_{пор}$:

$$\Delta T_{пор} = \frac{21,6 \cdot 10^{10} m}{T^3} \cdot \frac{1}{\tau} \cdot \frac{\Phi_n(f_0)}{D\ddot{o}\delta} \cdot \frac{1}{\sqrt{2t_{ex}}} \times \frac{1}{(\Delta \ln \lambda)_{\text{эф}}} \quad (26.1)$$

В этой формуле приняты следующие обозначения:

$\tau = \tau_{0 \max} \cdot \tau_{a \max}$, где $\tau_{0 \max}$ и $\tau_{a \max}$ – максимальные значения коэффициентов пропускания соответственно оптической системы, слоя атмосферы между объектом и прибором;

$$\delta = \sqrt{\alpha\beta}; \quad (26.2)$$

$\Phi_n(f_0)$ – пороговый поток приемника излучения на частоте модуляции f_0 ;

\ddot{o} – относительное отверстие объектива тепловизора;

t_{ex} – длительность входного импульса тепловизора.

$$(\Delta \ln \lambda)_{\text{эф}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) S(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda}, \quad (26.3)$$

где

$$\Phi(\lambda) = W^0(\lambda, T) / W^0(\lambda_m, T). \quad (26.4)$$

Выражение $(\Delta \ln \lambda)_{\text{эф}}$ представляет собой эффективную логарифмическую спектральную ширину измерительной системы тепловизора. Значение этого параметра для ряда приемников излучения и при различных температурах T приведены в литературе.

Частота среза – это частота, на которой коэффициент передачи по мощности падает в два раза.

27. Краткая теория температурно- частотой характеристики тепловизоров

Согласно теории, изложенной Ллойдом, ГЧХ тепловизоров определяются по формуле:

$$\Delta T_{\text{раз}}(\mathbf{v}) = \frac{3\Delta T_{\text{пор}} \cdot \nu(\alpha/\tau_d)^{1/2} \cdot \beta^{1/2}}{(\Delta f_R)^{1/2} \cdot \tilde{r}_\Sigma(\mathbf{v})(T_e \cdot f_k)^{1/2}}, \quad (27.1)$$

где $\Delta T_{\text{пор}}$ – пороговая разность температур тепловизора;
 Δf_R – полоса частот пропускания электронного тракта;
 α, β – угловой размер приемника по строке и по кадру;
 τ_d – время формирования информации одного элемента разложения кадра;

T_e – постоянная времени глаза;

f_k – частота кадров;

$$\tilde{r}_\Sigma(\mathbf{v})$$

– модуль передаточной функции (МПФ) всех узлов тепловизионной системы;

\mathbf{v} – пространственная частота изображения тест-объекта.

Для проведения расчетов ТЧХ $\Delta T_{разр} = f(v)$ целесообразно иметь в виду следующее:

$$\tilde{r}_{\Sigma}(v) = \tilde{r}_o(v) \cdot \tilde{r}_n(v) \cdot \tilde{r}_з(v) \cdot \tilde{r}_e(v) \cdot \tilde{r}_r(v), \quad (27.2)$$

где $\tilde{r}_o(v)$, $\tilde{r}_n(v)$, $\tilde{r}_з(v)$, $\tilde{r}_e(v)$ – МПФ соответственно оптической системы (\tilde{r}_o) , приемника излучения (\tilde{r}_n) , тракта усиления и блока обработки электрического сигнала $(\tilde{r}_з)$, видео контрольного устройства (ВКУ) (\tilde{r}_e) и человеческого глаза \tilde{r}_e .

Эти величины определяются по известным формулам

1. МПФ оптической системы определяется по формуле:

$$\bar{r}_o = e^{-\left[\frac{\pi^2}{2} q_0^2 (\delta_x \cdot v)^2 \right]}, \quad (27.3)$$

где $q_0 = 2\alpha_0 / \delta_x = \rho_0 / c$;

ρ_0 – диаметр абберрационного пятна рассеяния оптической системы;
 c – линейный размер приемника излучения;

$$\delta_x = \frac{c}{f'} \cdot 1000$$

(мрад) – угловой размер приемника излучения в направлении сканирования;

$2a_0$ – угловой размер кружка рассеяния оптической системы;
 f' – фокусное расстояние объектива тепловизора.

2. МПФ электронного тракта связана с пространственной частотой ν по формуле:

$$\tilde{r}_3(\nu) = \left[1 + (k\nu/\nu_c)^2 \right]^{-1/2}, \quad (27.4)$$

где $\nu_c = \frac{1}{(c/f') \cdot 1000}$, мрад⁻¹;

$$k = 2\pi \cdot q_c.$$

3. МПФ приемника излучения как пространственного фильтра определяется в виде функции $\sin c$:

$$\tilde{r}_n(\nu) = \left| \frac{\sin(\pi \delta_x \cdot \nu)}{\pi \delta_x \cdot \nu} \right|. \quad (27.5)$$

4. МПФ экрана определяется по формуле:

$$\tilde{r}_6(\nu) = e^{\left[-\left(\frac{\pi^2}{2} \right) q_s^2 (\delta_x \cdot \nu)^2 \right]}, \quad (27.6)$$

где q_e – коэффициент, связывающий угловой размер сканирующего пятна (на экране ВКУ) с угловым размером приемника излучения:

$$q_e = \frac{2d_e}{\delta_x} = \frac{2r_B}{c\beta}, \quad (27.7)$$

β – линейное увеличение ВКУ;

$2r_B$ – диаметр сканирующего пятна на экране ВКУ;

$$2r_B \approx 1,075\rho = h/N_c \quad (27.8)$$

h – высота кадра на экране ВКУ;

N_c – число строк в кадре;

ρ – расстояние между центрами соседних строк на экране ВКУ.

$$q_c = \tau/\tau_d,$$

τ – постоянная времени RC фильтра – аperiodического звена-эквивалента электронного тракта усиления и обработки сигнала;

τ_d – время формирования информации одного элемента разложения кадра.

5. МПФ глаза имеет вид:

$$\tilde{r}_z(\nu) = e^{-2\pi^2 \sigma_z^2 \nu^2},$$

где $\nu = 0,2 \dots 0,3$ мрад.

Это выражение справедливо в области пространственных частот $\nu > 0,2$ мрад⁻¹.

Рассмотрим отдельно вывод формулы (4) для МПФ электронного тракта, основываясь на следующем выражении:

$$\tilde{r}_{\text{э}}(f) = \left[1 + \left(f / f_c \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (27.9)$$

где f – электрическая частота в схеме обработки сигналов тепловизора;

$$f_c = 1 / (2\pi\tau) \quad (27.10)$$

предельная частота считывания элементов изображения тепловизионного кадра.

Подставив (10) в выражение 9), последнее принимает вид:

$$\tilde{r}_{\text{э}}(f) = \left[1 + (2\pi f\tau)^2 \right]^{-1/2}. \quad (27.11)$$

Так как справедливо соотношение

$$\tau = q_c \cdot t_{\text{вх}}, \quad (27.12)$$

где $t_{\text{вх}}$ – длительность входного импульса тепловизора, то имеем:

$$\tilde{r}_{\text{э}}(f) = \left[1 + \left(2\pi f q_c \cdot t_{\text{вх}} \right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (27.13)$$

Воспользуемся зависимостями угла δ_x с угловой скоростью сканирования Ω и временем t_{ex} , а также Ω с f' и линейной скоростью сканирования V :

$$t_{ex} = \frac{\delta_x}{\Omega}, \quad \Omega = \frac{V}{f'}. \quad (27.14)$$

Тогда для времени t_{ex} получим:

$$t_{ex} = \frac{\delta_x f'}{V}. \quad (27.15)$$

Подставив (15) в (13), получим:

$$\tilde{r}_z(f) = \left[1 + \left(2\pi f \cdot f' \cdot q_c \cdot \delta_x / V \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (27.16)$$

Так как величины f , V и v' между собой связаны зависимостью:

$$f = v'V,$$

где v' – линейная пространственная частота, то для

$$\tilde{r}_z(v')$$

имеем:

$$\tilde{r}_\vartheta(\mathbf{v}') = \left[1 + (2\pi \mathbf{v}' f' \cdot q_c \delta_x)^2 \right]^{-1/2}, \quad (27.17)$$

Примем во внимание следующую зависимость:

$$\mathbf{v} = f' \mathbf{v}'. \quad (27.18)$$

Тогда (16) преобразуется к виду:

$$\tilde{r}_\vartheta(\mathbf{v}) = \left[1 + (2\pi \mathbf{v} q_c \delta_x)^2 \right]^{-1/2}. \quad (27.19)$$

Так как справедливы зависимости

$$v_c = 1/\delta_x ; k = 2\pi q_c, \quad \text{то выражение (27.19)}$$

принимает вид:

$$\tilde{r}_\vartheta(\mathbf{v}) = \left[1 + (k \cdot \mathbf{v}/v_c)^2 \right]^{-1/2}, \quad (27.20)$$

которое совпадает с соотношением (4).

28. Работа тепловизионных систем в условиях воздействия неоднородного поля теплового излучения

Согласно рис. 28.1, в космическом тепловизионном эксперименте, на чувствительную площадку приемника излучения попадают следующие составляющие потока теплового излучения:

$$\Phi_{\lambda}^* = \bar{\Phi}_{\lambda} + \Delta\Phi_{\lambda} + \bar{\Phi}_{\lambda\phi} + \Delta\Phi_{\lambda\phi}, \quad (28.1)$$

где $\bar{\Phi}_{\lambda}$ – составляющая потока теплового излучения объекта при средней температуре \bar{T} :

$$\bar{\Phi}_{\lambda} = \frac{1}{\pi} A_0 \alpha_0 \beta_0 \varepsilon(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) W(\lambda, \bar{T}); \quad (28.2)$$

$\bar{\Phi}_{\lambda\phi}$ – то же для излучения фона:

$$\bar{\Phi}_{\lambda\phi} = \frac{1}{\pi} A_0 (\alpha\beta - \alpha_0\beta_0) \varepsilon_{\phi}(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) W(\lambda, \bar{T}); \quad (28.3)$$

$\Delta\Phi_{\lambda}$ – переменная составляющая потока теплового излучения объекта:

$$\Delta\Phi_{\lambda} = \frac{1}{\pi} \frac{A_0}{l^2} \varepsilon(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) \iint_{(x_0, y_0)} \Delta W[\lambda, T(x, y), \bar{T}] dx dy \quad (28.4)$$

$\Delta\Phi_{\lambda\phi}$ – то же для излучения фона:

$$\Delta\Phi_{\phi\lambda} = \frac{1}{\pi} \frac{A_0}{I^2} \varepsilon_{\phi}(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) \iint_{(x_{\phi}, y_{\phi})} \Delta W[\lambda, T_{\phi}(x, y), \bar{T}] dx dy. \quad (28.5)$$

Введем обозначения:

$$B[\lambda, T(x, y), \bar{T}] = \iint_{(x_0, y_0)} \Delta W[\lambda, T(x, y), \bar{T}] dx dy. \quad (28.6)$$

Найдем частную производную по температуре выходного сигнала приемника излучения тепловизора по формуле:

$$\frac{\partial u_{\lambda}}{\partial T} = \frac{\partial \Phi_{\lambda}^u}{\partial T} \cdot S_{\lambda}, \quad (28.7)$$

где S_{λ} – абсолютная спектральная чувствительность приемника излучения.

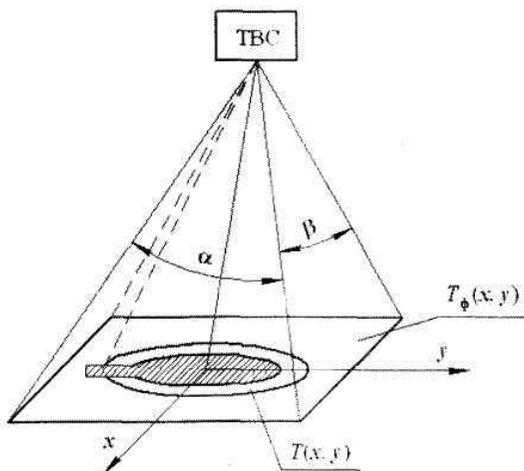


Рис. 28.1. К анализу работы тепловизионных систем в условиях воздействия неоднородных тепловых полей

$$\frac{\partial u_\lambda}{\partial T} = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{\partial W(\lambda, \bar{T})}{\partial T} \alpha_0 \beta_0 + \frac{1}{l^2} \frac{\partial B[\lambda, T(x, y), \bar{T}]}{\partial T} \right\} \times \quad (28.8)$$

$$\times S_\lambda A_0 \varepsilon(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda).$$

Введем обозначения:

$$A[\lambda, T(x, y), \bar{T}] = \left\{ \alpha_0 \beta_0 \frac{\partial W(\lambda, \bar{T})}{\partial T} + \frac{1}{l^2} \frac{\partial B[\lambda, T(x, y), \bar{T}]}{\partial T} \right\}. \quad (28.9)$$

В конечном счете, приращение суммарного сигнала, вызванное приращением температуры объекта, принимает следующий вид:

$$(28.10)$$

Воспользуемся следующей формулой:

$$S_\lambda = \frac{u_n D^* S(\lambda)}{k_y \sqrt{ab \Delta f}}. \quad (28.11)$$

Тогда, формула (28.10) принимает вид:

$$du = u_n K_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda \varepsilon(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) A[\lambda, T(x, y), \bar{T}] d\lambda dT, \quad (28.12)$$

где

$$K_0 = \frac{D^* A_0}{k_y \pi \sqrt{ab \Delta f}}.$$

На основании данных, изложенных в ряде работ, выражение для порогового сигнала u_n можно представить в виде:

$$u_n = u_{n0} \sqrt{1 + K^2 (\bar{\Phi}_\phi) + \Delta u_\phi^2 / u_{n0}^2}. \quad (28.13)$$

Здесь

u_{n0} – пороговый сигнал приемника излучения по эталонному источнику, который обычно приводится в паспортных данных приемника;

$K^2 (\bar{\Phi}_\phi)$ – коэффициент, учитывающий увеличение порогового сигнала за счет засветки постоянной составляющей излучения фона;

Δu_ϕ^2 – дисперсия выходного сигнала приемника излучения за счет переменной составляющей излучения фона.

С учетом (28.5) и (28.11), (28.13) принимает вид:

$$u_n = u_{n0} \left\{ \begin{array}{l} 1 + K^2 (\bar{\Phi}_\phi) + \\ + K_\phi^2 \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{(\lambda)} \varepsilon_\phi(\lambda) \tau_\alpha(\lambda) \tau_o(\lambda) B_\phi [\lambda, T_\phi(x, y), \bar{T}_\phi] d\lambda \right]^2 \end{array} \right\}^{1/2}, \quad (28.14)$$

где

$$K_\phi^2 = \frac{D^* A_0}{l^2 k_s \pi \sqrt{ab \Delta f}}; \quad (28.15)$$

$$B_\phi [\lambda, T_\phi(x, y), \bar{T}_\phi] = \iint_{(\varphi, \psi)} \Delta W [\lambda, T_\phi(x, y), \bar{T}_\phi] dx dy. \quad (28.16)$$

Введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} du &= \Delta u \\ dT &= \Delta T \end{aligned} \right\}; \quad (28.17)$$

$$\Delta T_n^n = \Delta T \left[(\Delta u / u_{ns}) = \left[1 + K^2 (\bar{\Phi}_\phi) + \left(\Delta u_\phi / u_{ns} \right)^2 \right]^{1/2} \right] \cdot m. \quad (28.18)$$

Тогда выражение для чувствительности тепловизора при воздействии неоднородного теплового фонового излучения получится в виде:

$$\Delta T_n^n = \frac{m \sqrt{1 + K^2 (\bar{\Phi}_\phi) + K_\phi^2 I_\phi^2}}{K_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{(\lambda)} \varepsilon_{\phi}(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) A[\lambda, T(x, y), \bar{T}] d\lambda}, \quad (28.19)$$

где

$$I_\phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{(\lambda)} \varepsilon_{\phi}(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) B_\phi[\lambda, T_\phi(x, y), \bar{T}_\phi] d\lambda. \quad (28.20)$$

На практике могут быть и случаи, когда приращение сигнала du является результатом приращения температуры объекта и окружающего фона. Рассмотрим это подробнее.

Для этого представим частную производную сигнала по температуре в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_\lambda}{\partial T} = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{\partial W(\lambda, \bar{T})}{\partial T} \alpha_0 \beta_0 + \frac{1}{l^2} \frac{\partial B[\lambda, T(x, y), \bar{T}]}{\partial T} \right\} \times \\ \times S_\lambda A_0 \varepsilon(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) + \\ + \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{\partial W(\lambda, \bar{T})}{\partial T} \alpha_\phi \beta_\phi + \frac{1}{l^2} \frac{\partial B_\phi[\lambda, T(x, y), \bar{T}]}{\partial T} \right\} \times \\ \times S_\lambda A_0 \varepsilon_\phi(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda). \end{aligned} \quad (28.21)$$

Введем обозначения:

$$A_0[\lambda, T(x, y), \bar{T}] = \left\{ \alpha_0 \beta_0 \frac{\partial W(\lambda, \bar{T}_\phi)}{\partial T} + \frac{1}{l^2} \frac{\partial B[\lambda, T(x, y), \bar{T}]}{\partial T} \right\}; \quad (28.22)$$

$$\begin{aligned} A_\phi[\lambda, T_\phi(x, y), \bar{T}_\phi] = \\ = \left\{ \alpha_\phi \beta_\phi \frac{\partial W(\lambda, \bar{T}_\phi)}{\partial T} + \frac{1}{l^2} \frac{\partial B[\lambda, T_\phi(x, y), \bar{T}_\phi]}{\partial T} \right\}. \end{aligned} \quad (28.23)$$

Тогда приращение суммарного сигнала принимает вид:

$$\begin{aligned} du = \frac{1}{\pi} A_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) \times \\ \times \left\{ A[\lambda, T_\phi(x, y), \bar{T}] \varepsilon(\lambda) + A_\phi[\lambda, T_\phi(x, y), \bar{T}_\phi] \varepsilon_\phi(\lambda) \right\} d\lambda dT. \end{aligned} \quad (28.24)$$

Воспользуемся еще раз формулой (28.11):

$$S_\lambda = \frac{u_n D^* S(\lambda)}{k_s \sqrt{ab \Delta f}}.$$

В итоге, приращение суммарного сигнала будет следующим:

$$\begin{aligned}
 du = u_n K_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{(x)} \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) \times \\
 \times \left\{ A[\lambda, T_{\bar{\phi}}(x, y), \bar{T}] \varepsilon(\lambda) + A_{\bar{\phi}}[\lambda, T_{\bar{\phi}}(x, y), \bar{T}_{\bar{\phi}}] \varepsilon_{\bar{\phi}}(\lambda) \right\} d\lambda dT,
 \end{aligned} \tag{28.25}$$

где

$$K_0 = \frac{D^* A_0}{k_{\text{э}} \pi \sqrt{ab \Delta f}}. \tag{28.26}$$

Представим пороговый сигнал (28.5) аналогично соотношению (28.13):

$$u_n = u_{\text{пз}} \sqrt{1 + K^2(\Phi) + \Delta u_{\bar{\phi}}^2 / u_{\text{пз}}^2}.$$

Воспользуемся введенными в формулах (28.18) и (28.17) обозначениями:

$$du = \Delta u; \quad dT = \Delta T;$$

$$\Delta T_n^* = \Delta T \left| \left(\frac{\Delta u}{u_{\text{пз}}} \right) = \left[1 + K^2(\Phi_{\bar{\phi}}) + \Delta u_{\bar{\phi}}^2 / u_{\text{пз}}^2 \right]^{1/2} \cdot m. \right.$$

Тогда, в окончательном виде получим следующее выражение для чувствительности тепловизора при воздействии неоднородного поля теплового излучения по поверхности объекта и фона:

$$\Delta T_n^* = \frac{\sqrt{1 + K^2(\Phi_{\bar{\phi}}) + K_{\bar{\phi}}^2 T_{\bar{\phi}}^2} \cdot m}{K_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{(x)} \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) \left\{ A[\lambda, T(x, y), \bar{T}] \varepsilon(\lambda) + A_{\bar{\phi}}[\lambda, T_{\bar{\phi}}(x, y), \bar{T}_{\bar{\phi}}] \varepsilon_{\bar{\phi}}(\lambda) \right\} d\lambda} \tag{28.27}$$

29. Спектр сигнала на выходе тепловизионных (ТПВ) ОЭС

Рассмотрим освещенность в изображении применительно к тепловизорам:

$$E(x, y) = \pi \tau_0 \sin^2 \sigma' \int \int_{-\infty}^{\infty} L(x_1, y_1) h(x, y, x_1, y_1) dx_1 dy_1, \quad (29.1)$$

где $L(x_1, y_1)$ – распределение яркости по поверхности объекта;
 $h(x, y, x_1, y_1)$ – функция рассеяния точки объектива тепловизора;
 σ' – задний апертурный угол объектива тепловизора.

Так как при работе ТПВ ОЭС освещенность E зависит от времени вследствие сканирования по поверхности объекта, то

$$E(x, y, t) = \pi \tau_0 \sin^2 \sigma' \int \int_{-\infty}^{\infty} L(x_1, y_1, t) h(x, y, x_1, y_1) dx_1 dy_1 \quad (29.2)$$

Если в плоскости изображения расположен безынерционный приемник излучения, имеющий распределение чувствительности по координатам x, y – $S(x, y)$, тогда реакция приемника на освещенность $E(x, y, t)$ равна:

$$du_0(t) = S(x, y) E(x, y, t) dx dy. \quad (29.3)$$

Полная реакция при условии аддитивности реакций, связанных с воздействием потока излучения на элементарные площадки, выражается как

$$u_0(t) = \int \int_{-\infty}^{\infty} S(x, y) E(x, y, t) dx dy. \quad (29.3')$$

Выражение (29.3') определяет форму сигнала, вырабатываемого приемником оптического излучения в ТПВ ОЭС.

Временной спектр этого сигнала будет:

$$\tilde{u}_0(f) = \int_{-\infty}^{\infty} u_0(t) e^{-j2\pi ft} dt. \quad (29.4)$$

Так как приемник, как правило, инерционный, то спектр сигнала на выходе ПОИ будет:

$$\tilde{u}_n(f) = \tilde{u}_0(f) K_{np}(f), \quad (29.5)$$

где $K_{np}(f)$ – коэффициент передачи частот приемника излучения.

В свою очередь, спектр сигнала на выходе усилителя равен :

$$\tilde{u}_y(f) = \tilde{u}_n(f) \cdot \dot{S}_{ex}(f) \cdot K_y(f), \quad (29.5')$$

где $\dot{S}_{ex}(f) = \dot{u}(f)/U(f)$ – крутизна входной цепи, состоящей из цепи включения приемника и цепи связи (рис. 1).



Рис. 29.1. Блок-схема включения приемника излучения и усилителя в тепловизионных ОЭС:

$\dot{u}_y(f)$ – комплексная амплитуда напряжения сигнала на выходе усилителя;

$\dot{u}(f)$ – комплексная амплитуда напряжения сигнала на входе усилителя;

$\dot{U}(f)$ – комплексная амплитуда обобщенного сигнала, вырабатываемого ПОИ;

$K_y(f) = \dot{u}_y(f) / \dot{u}(f)$ – коэффициент передачи усилителя.

В итоге, спектр сигнала на выходе усилителя равен:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_y(f) &= \tilde{u}_0(f) \cdot K_{np}(f) S_{\alpha\alpha}(f) \cdot K_y(f) = \\ &= \pi \tau_0 \sin^2 \sigma' K_{np}(f) S_{\alpha\alpha}(f) \cdot K_{yc} \times \\ &\times \int \int \int \int_{-\infty}^{+\infty} L(x_1, y_1, t) S(x, y) h(x, y, x_1, y_1) e^{-2\pi i f t} dx_1 dy_1 dx dy dt. \end{aligned} \quad (29.6)$$

Полученное выражение можно упростить, если ввести допущения:

1) оптическая система обладает свойством изопланарности:

$$h(x, y, x_1, y_1) = h(x - x_1, y - y_1);$$

2) задать коэффициент сканирования, тогда зависимость $E(x, y, t)$ от t будет в явном виде.

Если изображение перемещается со скоростью V , и ввести систему координат $x'o'y'$, связанную с подвижным изображением объекта (рис. 29.2), то в этих координатах $E(x', y')$ не зависит от t , а $x' = x - Vt$, $y' = y$ и $E(x', y') = E(x - Vt, y)$.

Тогда реакция приемника будет:

$$\begin{aligned}
 u_0(t) &= \int \int_{-\infty}^{\infty} S(x, y) E(x - Vt, y) dx dy = \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} S(x, y) E(x - Vt, y) dx.
 \end{aligned}
 \tag{29.7}$$

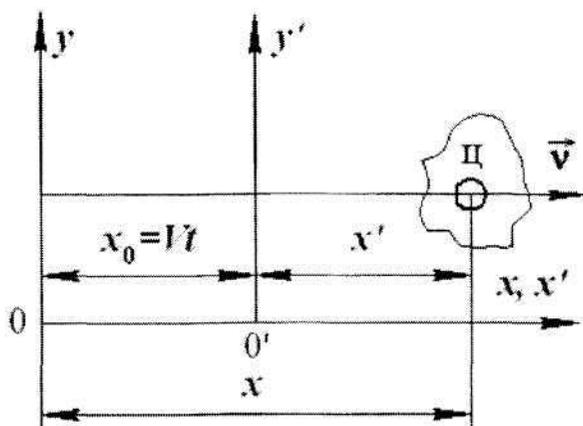


Рис. 29.2. Движение системы координат $x'o'y'$, связанной с изображением объекта Π

Спектр будет равен:

$$\begin{aligned}
 \tilde{u}_0(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} u_0(t) e^{-j2\pi ft} dt = \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int \int S(x, y) E(x - Vt, y) e^{-j2\pi ft} dx dy dt,
 \end{aligned}$$

где $u_0(t) = u_0(Vt)$,

а спектр

$$\tilde{u}_0(Vt) = \int_{-\infty}^{\infty} u_0(Vt) e^{-j2\pi ft} dt = \frac{1}{V} \int_{-\infty}^{\infty} u_0(x_0) e^{-j2\pi(f/V)x_0} dx_0.$$

При движении изображения со скоростью V вдоль оси x , пространственный период λ анализируется за время T .

Следовательно:

$$T = \frac{\lambda}{V}; \quad T = \frac{1}{f}; \quad \lambda = \frac{1}{\nu} \quad \text{т.е.} \quad f = V\nu \quad \text{или} \quad \frac{f}{V} = \nu.$$

Тогда:

$$\tilde{u}_0(Vt) = \frac{1}{V} \int_{-\infty}^{\infty} u_0(x_0) e^{-j2\pi\nu x_0} dx_0 = \frac{\tilde{u}_0(V)}{V}. \quad (29.8)$$

Поскольку

$$u_0(Vt) = \iint_{-\infty}^{\infty} S(x, y) E(x - Vt, y) dx dy,$$

то спектр

$$\tilde{u}_0(Vt) = \iiint_{-\infty}^{\infty} S(x, y) E(x - Vt, y) e^{-j2\pi ft} dx dy dt.$$

Следовательно:

$$\tilde{u}_0(f) = \tilde{u}_0(Vt) = \tilde{u}_0(\mathbf{v})/V = \tilde{u}_0(f/V)/V, \quad (29.9)$$

т.е.

$$\begin{aligned} u_0(f) &= \frac{1}{V} \int \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}(\mathbf{v}, \hat{\mathbf{y}}) \tilde{E}^*(\mathbf{v}, \hat{\mathbf{y}}) d\mathbf{y} = \\ &= \frac{1}{V} \int \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}\left(\frac{f}{V}, \hat{\mathbf{y}}\right) \tilde{E}^*\left(\frac{f}{V}, \hat{\mathbf{y}}\right) d\mathbf{y}, \end{aligned} \quad (29.10)$$

где

$$\tilde{E}^*(\mathbf{v}, \hat{\mathbf{y}}) = \pi\tau_0 \sin^2 \sigma' \int \int_{-\infty}^{\infty} L^*(V, \hat{\mathbf{y}}_1) \tilde{h}^*(\mathbf{v}, \mathbf{y} - \mathbf{y}_1) d\mathbf{y}_1. \quad (29.11)$$

В итоге, подставив (29.11) в (29.10), получим:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_0(f) &= \frac{\pi\tau_0 \sin^2 \sigma'}{V} \times \\ &\times \int \int_{-\infty}^{\infty} L^*\left(\frac{f}{V}, \hat{\mathbf{y}}_1\right) \cdot \tilde{S}\left(\frac{f}{V}, \hat{\mathbf{y}}\right) \cdot \tilde{h}^*\left(\frac{f}{V}, \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}_1\right) d\mathbf{y} d\mathbf{y}_1. \end{aligned} \quad (29.12)$$

30. Оптические методы измерения температуры

Из закона Планка следует, что температура тела T влияет на плотность излучения суммарного потока, его спектральные составляющие и на

спектральное распределение. В связи с этим можно выделить три метода радиационной пирометрии, основанных на измерении суммарного излучения, его плотности в некотором спектральном интервале, а также отношение плотностей излучения в различных участках спектра.

1. Первый метод – метод энергетической температуры или полной радиации.

Для реального тела спектральная светимость равна:

$$W_p(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot W^0(\lambda, T). \quad (30.1)$$

Если абсолютная спектральная чувствительность S приемника не зависит от λ , то сигнал на выходе приемника излучения пирометра равен:

$$u_\lambda = \frac{1}{\pi} \cdot A_{ex} \cdot \omega_{sp} \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot W^0(\lambda, T) \cdot S \cdot \tau_0(\lambda), \quad (30.2)$$

где A_{ex} – площадь входного зрачка пирометра;

ω_{sp} – телесный угол поля зрения пирометра;

$\tau_0(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания оптической системы пирометра;

$\varepsilon(\lambda, T)$ – коэффициент излучения материала тела.

Суммарный сигнал приемника излучения при $\varepsilon(\lambda, T) = \varepsilon(T)$ равен:

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{\pi} \cdot A_{ex} \cdot \omega_{sp} \cdot \varepsilon(T) \cdot S \cdot \tau_0 \int_0^\infty W^0(\lambda, T) d\lambda = \\ &= \frac{1}{\pi} \cdot A_{ex} \cdot \omega_{sp} \cdot \varepsilon(T) \cdot S \cdot \tau_0 \sigma T^4. \end{aligned} \quad (30.3)$$

Для АЧТ с температурой T_{Σ} имеем:

$$u_{\lambda} = \frac{1}{\pi} \cdot A_{\text{ex}} \cdot \omega_{\text{зр}} \cdot W^0(\lambda, T_{\Sigma}) \cdot S \cdot \tau_0; \quad (30.4)$$

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{\pi} \cdot A_{\text{ex}} \cdot \omega_{\text{зр}} \cdot S \cdot \tau_0 \int_0^{\infty} W^0(\lambda, T_{\Sigma}) d\lambda = \\ &= \frac{1}{\pi} \cdot A_{\text{ex}} \cdot \omega_{\text{зр}} \cdot S \cdot \tau_0 \sigma T_{\Sigma}^4. \end{aligned} \quad (30.5)$$

Приравняв (30.3) и (30.5), получим:

$$\varepsilon(T) \sigma T^4 = \sigma T_{\Sigma}^4; \quad (30.6)$$

$$T = T_{\Sigma} \sqrt[4]{1/\varepsilon}. \quad (30.7)$$

Отклонение истинной температуры T от радиационной T_{Σ} равно:

$$\delta T_{\Sigma} = (T - T_{\Sigma})/T = 1 - \sqrt[4]{\varepsilon(T)}.$$

2. Второй метод – метод частичной радиации (метод яркостной температуры).

Для реального тела с температурой T спектральная яркость объекта равна:

$$L_p(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot L^0(\lambda, T). \quad (30.8)$$

Тогда выходной сигнал с приемника излучения яркостного пирометра равен:

$$u(\lambda, T) = A_{\text{ex}} \cdot \omega_{\text{sp}} \cdot L_p(\lambda, T) \cdot S_{\lambda} \cdot \tau_0(\lambda). \quad (30.9)$$

Для АЧТ с яркостной температурой $T_{\text{я}}$ и спектральной яркостью $L^0(\lambda, T_{\text{я}})$ сигнал на выходе приемника излучения равен:

$$u(\lambda, T) = A_{\text{ex}} \cdot \omega_{\text{sp}} \cdot L^0(\lambda, T_{\text{я}}) \cdot S_{\lambda} \cdot \tau_0(\lambda). \quad (30.10)$$

Приравняв (30.9) и (30.10), имеем:

$$\varepsilon(\lambda, T) \cdot L^0(\lambda, T) = L^0(\lambda, T_{\text{я}}). \quad (30.11)$$

В приближении Вина для спектральной яркости АЧТ соотношение (30.11) имеет вид:

$$\varepsilon(\lambda, T) \frac{c_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T} = \frac{c_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T_{\text{я}}}. \quad (30.12)$$

После упрощений (12) приобретает вид:

$$\varepsilon(\lambda, T) \cdot e^{-c_2/\lambda T} = e^{-c_2/\lambda T_{\text{я}}}. \quad (30.13)$$

Прологарифмировав (30.13), имеем:

$$\ln \varepsilon(\lambda, T) - \frac{c_2}{\lambda T} = -\frac{c_2}{\lambda T_{\text{я}}}. \quad (30.14)$$

Решая уравнение (30.14) относительно $T_{\text{я}}$, получаем:

$$T_{\text{я}}^{-1} = T^{-1} - (\lambda/c_2) \cdot \ln \varepsilon(\lambda, T), \quad (30.15)$$

где $T_{\text{я}}$ – яркостная температура.

Так как пирометр работает в достаточно широком спектральном интервале $\Delta\lambda$, то формулы (30.8) ... (30.15) справедливы на, так называемой, эффективной длине волны $\lambda_{\text{эф}}$:

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) \cdot S(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\lambda} L(\lambda, T) \cdot S(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) d\lambda}. \quad (30.16)$$

Методическая погрешность метода равна:

$$\delta T_{\text{я}} = \frac{T - T_{\text{я}}}{T} = -\frac{\lambda T_{\text{я}}}{c_2} \cdot \ln \varepsilon(\lambda_{\text{эф}}, T). \quad (30.17)$$

3. Третий метод – метод цветовой температуры (или спектрального отношения).

Введем величину:

$$R_{отн} = \frac{L^0(\lambda_1, T_u)}{L^0(\lambda_2, T_u)} = \frac{\varepsilon(\lambda_1, T) \cdot L^0(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T) \cdot L^0(\lambda_2, T)}. \quad (30.18)$$

Это критерий определения цветовой температуры.

При наблюдении пирометром объекта, выражения для сигналов на выходе приемника излучения при нахождении соответственно первого и второго спектрального фильтров в поле зрения прибора, равны:

$$u(\lambda_1) = A_{ex} \cdot \omega_{sp} \cdot L^0(\lambda_1, T) \cdot S_{\lambda_1} \cdot \tau_0(\lambda_1) \varepsilon(\lambda_1, T); \quad (30.19)$$

$$u(\lambda_2) = A_{ex} \cdot \omega_{sp} \cdot L^0(\lambda_2, T) \cdot S_{\lambda_2} \cdot \tau_0(\lambda_2) \varepsilon(\lambda_2, T). \quad (30.20)$$

Если $\tau_0(\lambda_1) = \tau_0(\lambda_2)$, то в приближении Вина имеем:

$$R_{отн} = \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \cdot \frac{\lambda_1^{-5}}{\lambda_2^{-5}} \cdot \frac{e^{-c_2/\lambda_1 T}}{e^{-c_2/\lambda_2 T}} \cdot \frac{S_{\lambda_1}}{S_{\lambda_2}}. \quad (30.21)$$

Для АЧТ соответствующее значение сигналов $u(\lambda_1)$ и $u(\lambda_2)$ равны:

$$u(\lambda_1) = A_{ex} \cdot \omega_{sp} \cdot L^0(\lambda_1, T_u) \cdot S_{\lambda_1} \cdot \tau_0(\lambda_1); \quad (30.22)$$

$$u(\lambda_2) = A_{ex} \cdot \omega_{sp} \cdot L^0(\lambda_2, T_u) \cdot S_{\lambda_2} \cdot \tau_0(\lambda_2). \quad (30.23)$$

Параметр $R_{отн}^0$ для АЧТ равняется:

$$R^0_{отн} = \frac{u(\lambda_1)}{u(\lambda_2)} = \frac{L^0(\lambda_1, T_u) \cdot S_{\lambda_1}}{L^0(\lambda_2, T_u) \cdot S_{\lambda_2}} = \frac{\lambda_1^{-5} \cdot e^{-c_2/\lambda_1 T_u} \cdot S_{\lambda_1}}{\lambda_2^{-5} \cdot e^{-c_2/\lambda_2 T_u} \cdot S_{\lambda_2}} \quad (30.24)$$

Приравняв (30.21) и (30.24), получим:

$$e^{\frac{c_2}{T_u} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)} = \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \cdot e^{\frac{c_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)} \quad (30.25)$$

Прологарифмировав выражение (30.25), получим следующее уравнение:

$$\frac{c_2}{T_u} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) = \ln \left[\frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \right] + \frac{c_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right).$$

Решение уравнения (30.25) дает следующее выражение для температуры T_u :

$$T_u^{-1} = T^{-1} - (\Lambda/c_2) \cdot \ln \left[\frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \right], \quad (30.26)$$

где

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}.$$

Методическая ошибка метода равна:

$$\delta T_y = \frac{T - T_y}{T} = -\frac{\Delta T_y}{c_2} \ln \left[\frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \right]. \quad (30.27)$$

31. Анализ возможностей построения схем тепловизоров истинных температур

Выражение для сигнала U_λ на выходе приемника излучения тепловизора имеет вид:

$$u_\lambda = \tau_0(\lambda) S_\lambda \frac{A_{ex}}{\pi} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot W^0(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda, T). \quad (31.1)$$

Как видно из (31.1), вычислить T , если $\varepsilon(\lambda, T)$ – неизвестно, нельзя.

Д.Я. Свет предложил следующую методику построения пирометра (или тепловизора) истинных температур.

Для излучения АЧТ светимость на длине волны λ_i равна:

$$W^0(\lambda_i, T) = c_1 \cdot \lambda_i^{-5} \cdot e^{-c_2/\lambda_i T}. \quad (31.2)$$

Введем некоторую функцию $\omega_0(\lambda_i, T)$, которая определяется по формуле:

$$\omega_0(\lambda_i, T) = [W^0(\lambda_i, T)]^{\lambda_i} = c_1^{\lambda_i} \cdot \lambda_i^{-5\lambda_i} \cdot e^{-c_2/T}. \quad (31.3)$$

Особенностью функции $\omega_0(\lambda_i, T)$ является то, что в ней отсутствует смещение \max при изменении T . Тогда справедливо соотношение:

$$R_0(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{\omega_0(\lambda_i, T)}{\omega_0(\lambda_j, T)} = \frac{c_1^{\lambda_i} \cdot \lambda_i^{-5\lambda_i}}{c_1^{\lambda_j} \cdot \lambda_j^{-5\lambda_j}} \quad (31.4)$$

Как видно из соотношения (31.4), функция $R_0(\lambda_i, \lambda_j)$ от T не зависит.

Если имеются реальные тела, то имеем:

$$W(\lambda_i, T) = \varepsilon(\lambda_i, T) \cdot W^0(\lambda_i, T); \quad (31.5)$$

$$W(\lambda_j, T) = \varepsilon(\lambda_j, T) \cdot W^0(\lambda_j, T); \quad (31.6)$$

$$R(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{\omega_0(\lambda_i, T)}{\omega_0(\lambda_j, T)} = \frac{\varepsilon^{\lambda_i}(\lambda_i, T)}{\varepsilon^{\lambda_j}(\lambda_j, T)} R_0(\lambda_i, \lambda_j). \quad (31.7)$$

Из (31.7) следует, что если вычислить функцию $R(\lambda_i, \lambda_j)$ по известным сигналам на эффективных длинах волн λ_i и λ_j , то можно найти

отношение $\left(\varepsilon^{\lambda_i} / \varepsilon^{\lambda_j}\right)$.

Продедем это. Сигнал на выходе приемника излучения тепловизора на длине волны λ_i равен:

$$\begin{aligned} u_{\lambda_i} &= \tau_0(\lambda_i) \cdot S_{\lambda_i} \cdot \frac{A_{\varepsilon\varepsilon}}{\pi} \cdot \alpha_{\beta} \cdot \tau_{\beta}(\lambda_i) \cdot \varepsilon(\lambda_i, T) \cdot W^0(\lambda_i, T) = \\ &= K_{\lambda_i} \cdot \varepsilon(\lambda_i, T) \cdot W^0(\lambda_i, T). \end{aligned} \quad (31.8)$$

Аналогично, для сигнала на длине волны λ_j имеем:

$$u_{\lambda_j} = K_{\lambda_j} \cdot \varepsilon(\lambda_j, T) \cdot W^0(\lambda_j, T). \quad (31.9)$$

Тогда справедливы соотношения:

$$u_{\lambda_j} = K_{\lambda_j} \cdot \varepsilon(\lambda_j, T) \cdot W^{\circ}(\lambda_j, T). \quad (31.10)$$

$$u_{\lambda_j}^{\lambda_j} = K_{\lambda_j}^{\lambda_j} \cdot \varepsilon^{\lambda_j}(\lambda_j) \cdot c_1^{\lambda_j} \cdot \lambda_j^{-5\lambda_j} \cdot e^{-c_2/T}; \quad (31.11)$$

$$\frac{u_{\lambda_i}^{\lambda_i}}{u_{\lambda_j}^{\lambda_j}} = K \cdot \frac{\varepsilon^{\lambda_i}(\lambda_i)}{\varepsilon^{\lambda_j}(\lambda_j)} \cdot R_0(\lambda_i, \lambda_j). \quad (31.12)$$

В формуле (31.12) известными величинами являются

$$K = \frac{K_{\lambda_i}^{\lambda_i}}{K_{\lambda_j}^{\lambda_j}};$$

$$R_0(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{c_1^{\lambda_i} \cdot \lambda_i^{-5\lambda_i}}{c_1^{\lambda_j} \cdot \lambda_j^{-5\lambda_j}}.$$

Тогда

$$\frac{\varepsilon^{\lambda_i}(\lambda_i)}{\varepsilon^{\lambda_j}(\lambda_j)} = \frac{\left(\frac{u_{\lambda_i}^{\lambda_i}}{u_{\lambda_j}^{\lambda_j}} \right)}{K \cdot R_0(\lambda_i, \lambda_j)}. \quad (31.13)$$

В окончательном виде:

$$\frac{\varepsilon^{\lambda_i}(\lambda_i)}{\varepsilon^{\lambda_j}(\lambda_j)} = \frac{\left(u_{\lambda_i}^{\lambda_i} / u_{\lambda_j}^{\lambda_j} \right)}{K \cdot \left(c_1^{\lambda_i} \cdot \lambda_i^{-5\lambda_i} / c_1^{\lambda_j} \cdot \lambda_j^{-5\lambda_j} \right)}. \quad (31.14)$$

Теперь можно из (31.14) найти $\varepsilon(\lambda_i)$ и $\varepsilon(\lambda_j)$.

Решение уравнения (31.14) является очень сложной задачей, но, тем не менее, решение существует. Допустим, что решение найдется в виде:

$$\varepsilon(\lambda_i) = \gamma \cdot \varepsilon(\lambda_j) \quad (31.15)$$

Тогда (31.15) подставим в (31.8):

$$u_{\lambda_i} = K_{\lambda_i} \cdot \gamma \cdot \varepsilon(\lambda_j) \cdot W^0(\lambda_i, \Phi) \quad (31.16)$$

Вспользуемся еще соотношением (31.9):

$$u_{\lambda_j} = K_{\lambda_j} \cdot \varepsilon(\lambda_j) \cdot W^0(\lambda_j, \Phi) \quad (31.17)$$

В итоге уравнения (31.16) и (31.17) – это система двух уравнений с неизвестными величинами $\varepsilon(\lambda_j)$ и T , из которых теперь можно найти истинную температуру T .

Решение проведем следующим образом:

$$\frac{u_{\lambda_i}}{u_{\lambda_j}} = \frac{K_{\lambda_i}}{K_{\lambda_j}} \cdot \gamma \cdot \frac{W^0(\lambda_i, \Phi)}{W^0(\lambda_j, \Phi)} \quad (31.18)$$

$$I = \frac{K_{\lambda_i}}{K_{\lambda_j}} \cdot \gamma$$

Обозначим через

Тогда, на основании (31.18), получим:

$$\frac{u_{\lambda_i}}{u_{\lambda_j}} = I \cdot \frac{\lambda_j^{-5}}{\lambda_j^{-5} \cdot e^{c_2(\lambda_j - \lambda_i)T}} = I \cdot \frac{\lambda_i^{-5}}{\lambda_j^{-5}} \cdot e^{c_2(\lambda_j - \lambda_i)T} \quad (31.19)$$

Прологарифмируем (31.19):

$$\ln \left(\frac{u_{\lambda_j}}{u_{\lambda_i}} \right) = \ln \left[l \frac{\lambda_j^{-5}}{\lambda_i^{-5}} \right] + \frac{c_2}{T(\lambda_j - \lambda_i)}. \quad (31.20)$$

На основании соотношения (31.20) получим следующее уравнение относительно T :

$$\frac{c_2}{T(\lambda_j - \lambda_i)} = \ln \left(\frac{u_{\lambda_j}}{u_{\lambda_i}} / l \frac{\lambda_j^{-5}}{\lambda_i^{-5}} \right).$$

Решение этого уравнения дает следующее значение истинной температуры T :

$$T = \frac{c_2}{(\lambda_j - \lambda_i) \ln \left(\frac{u_{\lambda_j}}{u_{\lambda_i}} / l \frac{\lambda_j^{-5}}{\lambda_i^{-5}} \right)}. \quad (31.21)$$

Подставив в (31.21) значение параметра l в развернутом виде выражение для T принимает вид:

$$T = c_2 / \left\{ (\lambda_j - \lambda_i) \ln \left(\frac{u_{\lambda_j}}{u_{\lambda_i}} / \left[\gamma \frac{\tau(\lambda_i) \cdot S_{\lambda_i} \cdot \tau_{\phi_i}(\lambda_i) \cdot \lambda_i^{-5}}{\tau(\lambda_j) \cdot S_{\lambda_j} \cdot \tau_{\phi_j}(\lambda_j) \cdot \lambda_j^{-5}} \right] \right) \right\}. \quad (31.22)$$

В (31.22) λ_i, λ_j – эффективные длины волн измерительного канала

тепловизора для двух фильтров с $\tau_{\phi\lambda_i}(\lambda)$ и $\tau_{\phi\lambda_j}(\lambda)$; при этом λ_i можно найти по формуле:

$$\lambda_1 = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_0(\lambda) \tau_{\phi_1}(\lambda) W(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_0(\lambda) \tau_{\phi_1}(\lambda) \frac{W(\lambda, T)}{\lambda} d\lambda}$$

32. Методы энергетического расчета оптико-электронных приборов и систем

32.1. Цели и задачи энергетического расчета

Расчет параметров и характеристик оптико-электронных приборов и систем представляет собой, как правило, сложную задачу. Это объясняется рядом факторов: сложностью структур этих приборов и систем, состоящих из совокупности оптических, электронных, микропроцессорных и механических звеньев; спецификой их работы в условиях слабых сигналов и мощных разнообразных помех; невозможностью и затрудненностью учета всех возможных условий эксплуатации и др. Вследствие большого разнообразия задач, решаемых оптико-электронными приборами (ОЭП) невозможно установить какой-то единый критерий для оценки эффективности ОЭП. Достаточно простыми и распространенными критериями являются отношение «сигнал/шум» для ОЭП обнаружения и средняя квадратическая погрешность измерения того или иного параметра сигнала для измерительных ОЭП.

Очень часто для оценки ОЭП и качества их работ вводят энергетический критерий (раз.9.9 (1), характеризующий чувствительность к изменению энергетического потока на входном зрачке прибора. При этом для сопоставления ОЭП одного класса часто оказывается полезным знать их пороговую чувствительность (порог чувствительности) и величину минимального потока $\Phi_{п\ оэп}$ или минимальной облученности $E_{п\ оэп}$ на входном зрачке ОЭП, при которых обеспечивается требуемое отношение «сигнал/шум». В этой связи следует подчеркнуть, что многие параметры и характеристики ОЭП, а также критерии его качества можно найти именно с помощью

энергетического расчета. Цели этого расчета могут быть следующими: установление оптимальных соотношений между отдельными параметрами и характеристиками прибора, нахождение отношения «сигнал/шум» на выходе ОЭП, определение работоспособности прибора в заданных или изменяющихся условиях и др.

Задачами энергетического расчета ОЭП является определение значений некоторых параметров и характеристик прибора, при которых на выходе приемника излучения обеспечивается требуемое соотношение между полезным сигналом и сигналом, вызываемым внутренними (собственные шумы приемника излучения) и внешними (излучение фона) помехами. Эти задачи сводятся к вычислению либо пороговой чувствительности и дальности действия прибора при заданных параметрах, либо к нахождению значений этих параметров (в том числе, габаритных и электрических параметров прибора) по заданным дальностям действия или пороговой чувствительности. Дальность действия и пороговая чувствительность ОЭП являются их важнейшими характеристиками. Оба эти понятия практически идентичны, только одно из них (дальность действия) применяется при работе по излучающим объектам, удаленным на конечные расстояния, а второе – чаще всего используется применительно к аппаратуре, предназначенной для работы по бесконечно удаленным излучателям, например по звездам.

32.2. Обобщенная методика энергетического расчета

Как отмечалось выше, важнейшие параметры ОЭП можно определить на основе анализа энергетических соотношений между сигналами, поступающими на вход прибора, и порогом чувствительности ОЭП – величиной минимального потока $\Phi_{п\text{ ОЭП}}$ или освещенности $E_{п\text{ ОЭП}}$ на входе прибора, эквивалентной уровню шумов и помех, приведенных к этому входу.

Рассмотрим обобщенную методику энергетического расчета ОЭП. Основные этапы энергетического расчета следующие.

1. Определение потока $\Phi_{вх}$ или освещенности $E_{вх}$ (полезного сигнала) на входном зрачке приемной оптической системы в рабочей полосе частот (или по оптическому спектру, т.е. по длинам волн λ или частот ν , или по пространственным частотам, или по спектру временных частот при модуляции потока).
2. Приведение к тому же входу шумов (с учетом их внешних и внутренних источников) или порога срабатывания исполнительного элемента либо индикатора, т.е. определение пороговых значений $\Phi_{п оэп}$ или $\Phi_{п оэп}$ для той же полосы частот.
3. Составление основного энергетического уравнения, устанавливающего необходимое для правильной работы прибора соотношение между полезным сигналом, сигналами фона и помех и порогом чувствительности ОЭП. Это может быть отношение $\Phi_{вх}/\Phi_{п оэп}$, большее некоторой величины μ , или выражение для контраста между полезным сигналом $E_{вх}$ и сигналом от фона $E_{ф}$, превышающее порог чувствительности прибора по контрасту в заданное или рассчитанное число раз и т. п.
4. Выбор или расчет величины μ , входящей в основное энергетическое уравнение.
5. Решение основного энергетического уравнения относительно одного из входящих в него параметров прибора (например, дальности действия).
6. Выбор или расчет на основе энергетического уравнения остальных параметров прибора (например, диаметра входного зрачка).
7. Окончательный энергетический расчет.

Порядок проведения первых этапов может быть различным и при данной методике не сказывается на конечных результатах.

Очень часто на первой стадии энергетического расчета, во время разработки эскизного проекта, ведется упрощенный расчет, когда величины $\Phi_{вх}$, $E_{вх}$, $\Phi_{п оэп}$, $E_{п оэп}$ рассчитывают без учета пространственно-частотных характеристик (ПЧХ) отдельных звеньев прибора, т.е. на основе использования их условно обобщенных или

интегральных характеристик. Это связано, прежде всего, с аппаратной неопределенностью ПЧХ большинства звеньев ОЭП, а также с трудностью синтеза этих звеньев по выбранным или заданным ПЧХ.

На второй стадии энергетического расчета или при окончательном расчете, т.е. после выбора параметров прибора, можно учесть ПЧХ реальных сигналов, помех и всех звеньев ОЭП.

Общий вид основного энергетического уравнения (неравенства) зависит от назначения конкретного ОЭП, от конкретных условий его работы. В случае обнаружения полезного сигнала $\Phi_{ВХ}$ на фоне шумов, приведенных к входу прибора, оно имеет вид:

$$\Phi_{ВХ} / \Phi_{П ОЭП} \geq \mu. \quad (32.2.1)$$

Если необходимо обеспечить превышение разности между полезным сигналом Φ_C и сигналом от фона Φ_ϕ , то это уравнение может иметь вид:

$$\Phi_C - \Phi_\phi \geq \mu \Phi_{П ОЭП}. \quad (32.2.2)$$

Важно отметить, что все величины $\Phi_{ВХ}$, Φ_ϕ , $\Phi_{П ОЭП}$, входящие в основное энергетическое уравнение, берут в виде эффективных величин, т. е. пересчитанных к реальным условиям работы ОЭП или приведенных к его эффективной полосе пропускания. Например, с учетом коэффициентов использования для реальных условий работы прибора – φ_P и для условий паспортизации – $\varphi_{П}$ выражение (1) можно записать в виде:

$$\Phi_{ВХ} \times \varphi_P / (\Phi_{П ОЭП} \times \varphi_{П}) \geq \mu \quad (32.2.3)$$

или

$$\Phi_{ВХ} / \left[\Phi_{П ОЭП} \times (\Phi_{Р} \times \Phi_{П}) \right] \geq \mu. \quad (32.2.4)$$

На третьем этапе расчета выражения для $\Phi_{ВХ}$, $\Phi_{С}$, $\Phi_{Ф}$, $\Phi_{П ОЭП}$ необходимо представить в развернутом виде, т.е. в виде функций параметров и характеристик объекта наблюдения, среды, оптической системы, приемника излучения и электронного тракта.

На четвертом этапе энергетического расчета, при выборе или расчете величины μ , необходимо рассматривать статистические соотношения, характеризующие полезные сигналы и помехи, поскольку и те и другие практически всегда являются случайными величинами, хотя и с различными вероятностными характеристиками.

Пятый этап энергетического расчета состоит в решении развернутого энергетического уравнения относительно искомого параметра ОЭП. Основная трудность состоит в том, что на этой стадии проектирования ОЭП неизвестными обычно являются многие параметры. Поэтому приходится задаваться рядом из них, пользоваться методом последовательных приближений, проводить проверочные расчеты, вести математическое и физическое моделирование. Другая трудность состоит в том, что развернутое энергетическое уравнение является весьма громоздким и сложным для решения или анализа. Поэтому необходимо прибегать к помощи ЭВМ, а также к имеющимся в специальной литературе графикам, таблицам, номограммам.

Заключительные этапы энергетического расчета ОЭП можно проводить неоднократно, на различных стадиях разработки прибора, вплоть до корректировки рабочей документации.

32.3. Методы энергетического расчета ОЭП обнаружения, наведения, самонаведения и локации

32.3.1. Дальность действия пассивных ОЭП обнаружения, наведения и самонаведения

Наиболее простые соотношения для расчета дальности действия и пороговой чувствительности пассивных ОЭП обнаружения и самонаведения получены в ряде работ. Так, для случая работы прибора при отсутствии фона, в этой работе приводятся следующие выражения для дальности l и пороговой освещенности E_{Π} на входном зрачке прибора:

$$l = \sqrt{\frac{I \cdot A_{\text{ВХ}} \cdot K_p}{m \cdot \Phi_{\text{ЭП}} \cdot K(\Delta f) \cdot K_{\text{э}}}}, \quad (1)$$

$$E_{\Pi} = \frac{m \cdot \Phi_{\text{ЭП}} \cdot K(\Delta f) \cdot K_{\text{э}}}{A_{\text{ВХ}} \cdot K_p}. \quad (2)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

I – интегральная сила излучения объекта в направлении прибора;
 K_p – коэффициент использования приемником излучения объекта с учетом ослабления средой (атмосферой) и деталями оптической системы;
 $K_{\text{э}}$ – коэффициент использования приемником излучения эталонного источника;

m – отношение «сигнал/шум»;

$\Phi_{ЭП}$ – пороговый поток приемника по излучению эталонного источника на единицу полосы частот;

$A_{ВХ}$ – площадь входного зрачка объектива ОЭП;

$K(\Delta f)$ – коэффициент, учитывающий изменение частоты модуляции и ширины полосы усилителя с эталонными условиями измерения.

При использовании выражений (1) и (2) следует принять во внимание, что параметры K_P , $K_{Э}$ рассчитываются по формулам:

$$K_P = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \Phi_0(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

$$K_{Э} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \Phi_{Э}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{Э}(\lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

где $S(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность приемника излучения;

λ_1, λ_2 – длина волн левой и правой границы спектральной чувствительности приемника излучения;

$\Phi_0(\lambda)$ – спектральный поток излучения объекта;

$\Phi_{Э}(\lambda)$ – спектральный поток излучения эталонного источника;

$T_o(\lambda), \tau_a(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания соответственно

оптической системы ОЭП и слоя атмосферы между объектом наблюдения и прибором.

Коэффициент $K(\Delta f)$ равняется $\sqrt{\Delta f}$

в случае, когда ширина полосы частот усилителя мала по сравнению с частотой модуляции f_m . В тех случаях, когда f_m отличается от эталонной частоты модуляции f_0 потока излучения, то указанный коэффициент берут в виде :

$$K(\Delta f) = \sqrt{\frac{f_0}{f_m} \cdot \Delta f}. \quad (5)$$

В случае наблюдения объекта на равномерно излучающем фоне, то получены следующие выражения для дальности l и пороговой освещенности E_n

$$l = \sqrt{\frac{A_{BX} \cdot A_0 \cdot (L_p \cdot K_p - L_\Phi \cdot K_\Phi)}{m \cdot \Phi_{ЭП} \cdot K(\Phi_\Phi) \cdot K(\Delta f) \cdot K_\varepsilon}}, \quad (6)$$

$$E_n = \frac{(K_p L_p - K_\Phi L_\Phi) \cdot A_0}{l^2} = \frac{m \cdot \Phi_{ЭП} \cdot K(\Phi_\Phi) \cdot K_\varepsilon}{A_{BX}}, \quad (7)$$

где L_p, L_Φ – интегральная яркость излучения соответственно объекта и фона;

K_Φ – коэффициент использования приемником излучения фона;

$K(\Phi_\Phi)$ – коэффициент, характеризующий ухудшение чувствительности приемника излучения при засветке фоном;

A_0 – площадь проекции объекта на направление наблюдения.

Интересной ситуацией является наблюдение объекта на неравномерно излучающем фоне. Для этого случая, получено следующее выражение для дальности действия l :

$$l = \sqrt{\frac{L_P \cdot A_0 \cdot K_P}{m \cdot n \cdot L_\Phi \cdot K_\Phi \cdot \omega_{зр}}} \quad (8)$$

Здесь:

n – глубина модуляции потока излучения от фона;

$\omega_{зр}$ – телесный угол зрения оптической системы ОЭП.

Из этой формулы видно, что дальность действия ОЭП при их работе на неравномерном фоне в отличие от дальности при работе на равномерном фоне не зависит от площади входного зрачка $A_{ВХ}$.

При необходимости обеспечения максимальной дальности действия, ограничиваемой только параметрами приемника излучения, величину переменной составляющей излучения фона стремятся уменьшить до такой степени, чтобы она стала меньше порогового потока прибора. Как видно из формулы (6), этого можно добиться только уменьшением размеров мгновенного поля зрения (если фон заполняет все поле зрения). Предельно допустимую величину мгновенного поля зрения можно найти при совместном решении зависимостей (6) и (8), причем формула (6) определяет максимальную дальность действия, а (8) – минимальную.

Возведя в квадрат правые части указанных зависимостей и приравняв их, предельно допустимую величину мгновенного поля зрения находим в виде:

$$\omega_{зр} \leq \frac{\Phi_{ЭП} \cdot K(\Delta f) \cdot K(\Phi_{\phi}) \cdot K_{\varepsilon}}{A_{ВХ} \cdot L_{\phi} \cdot K_{\phi} \cdot n \cdot \left(1 - \frac{L_{\phi} K_{\phi}}{L_p K_p}\right)} \quad (9)$$

32.3.2. Дальность действия активных ОЭП лазерной локации при равномерном распределении энергии в сечении пучка лазера

Приемлемые для теории и практики соотношения для расчета дальности действия активных ОЭП с лазерами получены в ряде работ. Так, применительно к активным ОЭП с лазерами, для которых имеет место равномерное распределение энергии в сечении пучка лазера, получено следующее выражение для дальности действия l :

$$l = \sqrt[4]{\frac{\Phi_L A_0 \cdot A_{ВХ} \tau_n \cdot \tau_0 \tau_c^2 \tau_{\phi} \rho_g \cos^2 \alpha \cdot \beta_{(\theta, \varphi)}}{\pi \omega_L m \Phi_{ЭП} \cdot K(\Delta f)}}, \quad (10)$$

где: Φ_L – мощность лазера;

ω_L – телесный угол расходимости лазерного излучения на выходе передающей части активного ОЭП;

τ_n, τ_0 – коэффициент пропускания, соответственно, передающей и приемной части прибора;

τ_c, τ_{ϕ} – коэффициенты пропускания, соответственно, слоя атмосферы между объектом и прибором и фильтра;

ρ_g – диффузный коэффициент отражения поверхности лоцируемого объекта.

$\beta_{ll}(\theta, \varphi) = \beta(\theta, \varphi)$ – приведенный коэффициент габаритной яркости поверхности объекта. Значение этого коэффициента для различных форм объектов приведены в ряде работ;

α – угол между нормалью к поверхности объекта и оптической осью приемной части прибора (в ряде работ при выводе выражения (10) считалось, что оптические оси передающей и приемной части прибора совпадают);

A_0 – площадь поверхности объекта, которая полностью освещается лучами лазера передающей части прибора.

В тех случаях, когда угол $\omega_{лн}$ превышает угловых размеров объекта, то отраженное излучение от объекта будет поступать на приемник излучения не со всей поверхности объекта, а только с его облучаемой части. Для этого случая, дальность действия l принимает другой вид:

$$l = \sqrt{\frac{\Phi_{л} \cdot A_{ВХ} \tau_n \tau_c^2 \tau_o \tau_{\phi} \rho_g \cos \alpha \cdot \beta(\theta, \varphi)}{\pi \cdot m \Phi_{ЭП} \cdot K(\Delta f)}}. \quad (11)$$

Если поверхность объекта не является плоской, а, например, сферической, то для случая, когда $\omega_{л}$ превышает угловые размеры лоцируемого объекта и его покрытие имеет зеркальную и диффузионную составляющие отражения, получена следующая формула для дальности действия l :

$$l = 4 \sqrt{\frac{16 \Phi_{л} \cdot R^2 A_{ВХ} \tau_n \tau_c^2 \tau_o \tau_{\phi} \left(\rho_3 + \frac{2}{3} \rho_g \right)}{\pi \cdot m \Theta_{л}^2 \Phi_{ЭП} \cdot K(\Delta f)}}}, \quad (12)$$

здесь ρ_3 – коэффициент зеркального отражения материала покрытия объекта;

$\Theta_{л}$ – плоский угол расходимости лазерного пучка передающей части прибора;

R – радиус сферы.

Иногда с целью увеличения дальности действия приборов на объектах устанавливают специальные уголковые отражатели (катафоты). При их использовании дальность действия рассчитывается по формуле :

$$l = \sqrt[4]{\frac{16\Phi_{\text{л}}A_{\text{отр}} \cdot A_{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{от}} \tau_n \tau_o \tau_c \tau_\phi \cos \beta \cdot \sqrt{T_k} \cdot 10^8}{m\Phi_{\text{эл}} \pi^2 \theta_{\text{обс}} \theta_{\text{п}}^2 \left(\frac{\lambda}{d \cos \beta} + 0,05\delta \right)^2 \cdot \sqrt{K_f(1+m_{\text{п}})}}}, \quad (13)$$

здесь λ – длина волн лазера;

d – линейный размер входной грани одного уголкового отражателя;

$A_{\text{отр}}$ – площадь отражающей поверхности всего блока уголкового отражателей;

$\rho_{\text{от}}$ – коэффициент отражения катафота;

δ – расходимость отраженного пучка из-за неточности изготовления отражателя;

K_f – коэффициент, учитывающий форму зондирующего импульса;

T_k – длительность зондирующего импульса;

$m_{\text{п}}$ – коэффициент перекрытия пространства при обзоре.

По формуле (13) можно рассчитать дальность действия оптико-электронного локатора по объекту, снабженному блоком угловых отражателей. Величины, входящие в эту формулу, подставляют в следующих размерностях:

$\Phi_{\text{л}}$ – Вт; $A_{\text{отр}}$ и $A_{\text{вх}}$ – м²; $\Phi_{\text{эл}}$ – Вт /Гц^{1/2};

$K(\Delta f)$ – Гц^{1/2}; $\theta_{\text{п}}$ – рад; λ – мкм; d – см;

δ – угловые секунды; $\rho_{\text{от}}$, τ_n , τ_c , τ_o , τ_ϕ , m – безразмерные.

32.3.3. Дальность действия активных ОЭП с гауссовым распределением энергии в сечении пучка лазера

Вопросы энергетического расчета ОЭП с лазерами рассмотрены в ряде работ. Так, когда в сечении пучка лазера передающей части активного оптико-электронного прибора (АОЭП) имеется гауссово распределение энергии, то в этой работе получено следующее выражение для дальности действия АОЭП:

$$l = \sqrt[4]{\frac{2\Phi_{\text{Л}} A_{\text{О}} \cdot A_{\text{ВХ}} \cdot \rho_{\text{г}} \tau_{\text{н}} \tau_{\text{о}} \tau_{\text{С}}^2 \tau_{\text{Ф}} \cos^2 \alpha \cdot I^{-8(r/\Theta_{\text{н}})^2} \overline{\beta(\theta, \varphi)}}{m\Phi_{\text{П}} \pi\omega_{\text{Л}}}}, \quad (14)$$

здесь $\Phi_{\text{П}}$ – пороговый поток приемника излучения;
 r – расстояние между центром объекта и оптической осью передающей части приборов в пространстве предметов.

Значения коэффициента габаритной яркости $\overline{\beta(\theta, \varphi)}$ для объектов в виде диффузных диска, сферы и цилиндра приведены в ряде работ. Для анализа влияния формы поверхности объекта и состояния поляризации как освещающего объект излучения, так и отраженного (излучаемого) его поверхностью, в ряде работ дана методика уточненного энергетического расчета активных и пассивных ОЭП, в том числе, и оптико-электронных координаторов.

32.3.4. Методы энергетического расчета активных и пассивных приборов ночного видения (ПНВ)

32.3.4.1. Дальность действия ПНВ пассивного типа

Существует методика расчета дальности действия ПНВ пассивного типа. В этой методике учтены освещение объекта полусферическим излучением ночного неба, рассеянным излучением слоя атмосферы между объектом и прибором и направленным излучением Луны. Без учета пространственно-частотных характеристик объекта наблюдения, а также передаточных характеристик слоя атмосферы, оптических элементов и электронно-оптического преобразователя (ЭОП) ПНВ, то есть в приближении геометрической оптики, получено, что яркость изображения объекта на экране ПНВ выражается в виде:

$$L_{O\Sigma} = \frac{k\eta_o\tau_oL_Hd^2\rho_o}{4f'^2V^2} e^{-\beta_o l} + \frac{k\eta_o\tau_oL_Hd^2}{4f'^2V^2} \cdot (1 - e^{-\beta_o l}) +$$

$$+ \frac{k\eta_o\tau_oE_Ld^2\rho_o}{4\pi f'^2V^2} e^{-\beta_o l} \cdot \cos\alpha_{\pi} + \frac{k\eta_o j}{k_o\pi\phi V^2}, \quad (15)$$

В этой формуле приняты обозначения:

L_H – яркость ночного неба;

E_L – освещенность прямыми лучами Луны плоскости, перпендикулярной к лучам;

d – диаметр входного зрачка объектива ПНВ;

f' – заднее фокусное расстояние объектива ПНВ;

τ_o – интегральный коэффициент пропускания оптических элементов ПНВ;

η_o – коэффициент преобразования ЭОПа;

V – линейное увеличение ЭОПа;

k, k_o – коэффициент использования излучения соответственно системой «прибор/глаз» и входным фотокадом ЭОПа;

ρ_o – коэффициент отражения материала поверхности объекта;

β_o – показатель ослабления слоя атмосферы;

l – дальность до объекта;

j – плотность тока термоэлектронной эмиссии;

ϕ – интегральная чувствительность фотокада ЭОПа;

α_{π} – угол между нормалью к участку объекта и направлением на Луну.

В свою очередь, яркость изображения фона на экране ПНВ выражается в виде:

$$L_{\Phi\Sigma} = \frac{k\eta_o\tau_oL_Hd^2\rho_{\Phi}}{4f'^2V^2} e^{-\beta_o l_{\Phi}} + \frac{k\eta_o\tau_oL_Hd^2}{4f'^2V^2} \cdot (1 - e^{-\beta_o l_{\Phi}}) +$$

$$+ \frac{k\eta_o\tau_oE_Ld^2\rho_{\Phi}}{4\pi f'^2V^2} e^{-\beta_o l_{\Phi}} \cdot \cos\alpha_{\Phi\pi} + \frac{k\eta_o j}{k_o\pi\phi V^2}, \quad (43.16)$$

Здесь приняты обозначения:

ρ_ϕ – коэффициент отражения поверхности фона;

l_ϕ – дальность до фона;

$\alpha_{\phi l}$ – угол между нормалью к поверхности фона и направлением на Луну.

На основе формул (15) и (16) формируем уравнение относительного контраста изображения:

$$K = \frac{L_{o\Sigma} - L_{\phi\Sigma}}{L_{o\Sigma} + L_{\phi\Sigma}} = F(k, k_o, \eta, \tau_o, L_H, E_L, \rho_o, \rho_\phi, \beta_\alpha, f', V, l, l_\phi, j, \Phi). \quad (17)$$

Считая значения контраста K величиной известной (например у человеческого глаза пороговый контраст $K_{\Pi} = 0,02 \dots 0,03$), то, как видно из выражения (17), оно является в общем случае уравнением с двумя неизвестными величинами (l и l_ϕ). В этой связи оно может строго быть решено относительно l только в случае, когда дальность до фона $l_\phi \rightarrow \infty$ (наблюдение на фоне неба) или когда $l = l_\phi$ (объект и фон находятся на одном расстоянии от ПНВ). Во всех остальных случаях строгое решение возможно в случае заведомо известного значения l_ϕ .

32.3.4.2. Модель пространственно-частотного (ПЧС) контраста изображения объекта на экране ПНВ

В основу предлагаемой методики расчета дальности действия и разрешения ПНВ заложено формирование ПЧС контраста яркости изображения объекта на определенном фоне с учетом как энергетических характеристик излучения объекта и фона, так и передаточных (частотно-контрастных) характеристик оптических элементов и ЭОПа ПНВ, слоя атмосферы между объектом и прибором, а также человеческого глаза. Кроме того, учитываются ПЧС объекта и фона, которые рассматриваются как прямое преобразование Фурье функций распределения яркости объекта и фона по их наблюдаемой поверхности.

Тогда, модуль ПЧС контраста изображения объекта на определенном фоне можно записать в виде:

$$\tilde{K}(v, \mu) = \left| \frac{\tilde{L}_0(v, \mu) - \tilde{L}_\Phi(v, \mu)}{\tilde{L}_0(v, \mu) + \tilde{L}_\Phi(v, \mu)} \right| \cdot \tilde{h}_0(v, \mu) \cdot \tilde{h}_\Xi(v, \mu). \quad (18)$$

Здесь: $\tilde{L}_0(v, \mu)$ и $\tilde{L}_\Phi(v, \mu)$ – ПЧС яркости объекта и фона на экране ЭОПа.

Величины, входящие в формулу (18) определяются по следующим выражениям:

$$\tilde{L}_{0+}(v, \mu) = L_{0+} \cdot |\tilde{L}_{0+}(v, \mu)| + L_{0л} \cdot |\tilde{L}_{0л}(v, \mu)| + L_C \cdot |\tilde{L}_C(v, \mu)| + L_\Xi; \quad (19)$$

$$\tilde{L}_\Phi(v, \mu) = L_{\Phi+} \cdot |\tilde{L}_{\Phi+}(v, \mu)| + L_{\Phiл} \cdot |\tilde{L}_{\Phiл}(v, \mu)| + L_C \cdot |\tilde{L}_C(v, \mu)| + L_\Xi; \quad (20)$$

Составляющие в формулах (18) ... (20) определяются по формулам:

$$L_{0+} = \frac{k\eta_0\tau_0L_H d^2 \rho_0}{4f'^2 V^2} \cdot e^{-\beta_\alpha t}, \quad (21)$$

$$L_{0л} = \frac{k\eta_0\tau_0E_H d^2 \rho_0}{4\pi f'^2 \cdot V^2} \cdot e^{-\beta_\alpha t}; \quad (22)$$

$$L_C = \frac{k\eta_0\tau_0L_H d^2 \rho_0}{4f'^2 \cdot V^2} (1 - e^{-\beta_\alpha t}), \quad (23)$$

$$L_\Xi = \frac{k \cdot \eta_0 \cdot j}{k_0 \pi (\varphi l')^2}, \quad (24)$$

$$L_{\Phi+} = \frac{k\eta_0\tau_0L_H d^2 \rho_\Phi}{4f'^2 \cdot V^2} \cdot e^{-\beta_\alpha t}, \quad (25)$$

$$L_{\Phi L} = \frac{k\eta_0\tau_0 E_{\text{Л}} d^2 \rho_{\Phi}}{4\pi f^2 \cdot r^2} \cdot e^{-\beta_{\Phi} d}, \quad (26)$$

$$\tilde{L}_{O+}(v, \mu) = \iint_{(x_0, y_0)} \beta[\alpha_n(x, y)] \cdot e^{-j(vx + \mu y)} dx dy, \quad (27)$$

$$\tilde{L}_{OL}(v, \mu) = \iint_{(x_0, y_0)} \beta[\alpha_L(x, y), \alpha_H(x, y)] \cos \alpha_L(x, y) e^{-j(vx + \mu y)} dx dy, \quad (28)$$

(X_0, Y_0) – декартовые координаты на поверхности объекта;

$$\tilde{L}_{\Phi+}(v, \mu) = \iint_{(x_{\Phi}, y_{\Phi})} \beta_{\Phi+}[\alpha_{\Phi n}(x, y)] \cdot e^{-j(vx + \mu y)} dx dy, \quad (29)$$

$$\tilde{L}_{\Phi L}(v, \mu) = \iint_{(x_{\Phi}, y_{\Phi})} \beta_{\Phi}[\alpha_{\Phi L}(x, y), \alpha_{\Phi H}(x, y)] \cos \alpha_{\Phi L}(x, y) \cdot e^{-j(vx + \mu y)} dx dy, \quad (30)$$

(X_{Φ}, Y_{Φ}) – декартовые координаты на поверхности фона;

$$\tilde{L}_c(v, \mu) = \iint_{(x_{\Phi}, y_{\Phi})} e^{-j(vx + \mu y)} dx dy, \quad (31)$$

$$\tilde{h}_0(v, \mu) = e^{-2\alpha_0 \chi^2} \quad (32)$$

$$\tilde{h}_3(v, \mu) = e^{-2\alpha_3 \chi^2}, \quad (33)$$

В выражениях (32) и (33) χ – это пространственная частота, которая связана с v и μ по формуле:

$$\chi^2 = \nu^2 + \mu^2, \quad (34)$$

α_0 и α_s – размеры пятна рассеяния соответственно объектива и экрана ЭОПа.

Кроме того, выражения (32) и (33) получены для случая представления функции рассеяния оптических систем и ЭОПа в виде гауссоиды вращения. Поэтому, не исключены и другие аппроксимации функции рассеяния оптической системы и ЭОПа.

Следует отметить, что пространственную частоту можно связать с размером a_1 разрешаемого элемента на поверхности объекта следующим образом:

$$\nu = 1/a_1. \quad (35)$$

Так как размер изображения a связан с размером a_1 в пространстве предметов по формуле:

$$a = \frac{a_1 f' V}{l}, \quad (36)$$

то получим:

$$\nu = \frac{l}{a_1 f' V}. \quad (37)$$

32.3.4.3. Методика расчета дальности разрешения ПНВ пассивного типа

Как видно из формулы (18), при учете формул (19) ... (39), ПЧС контраста яркости изображения объекта на определенном фоне зависит

здесь μ – отношение «сигнал/помеха».

При этом следует учесть следующие приближения:

$$|\tilde{L}_{O\Phi}(v, \mu)| = \beta_O; \quad |\tilde{L}_{OL}(v, \mu)| = \beta(\alpha_L) \cos \alpha_L; \quad (41)$$

$$|\tilde{L}_{O\Phi}(v, \mu)| = \beta_{\Phi O}; \quad |\tilde{L}_{\Phi L}(v, \mu)| = \beta_{\Phi}(\alpha_{\Phi L}) \cos \alpha_{\Phi L}. \quad (42)$$

32.3.4.4. Методика расчета дальности разрешения ПНВ пассивного типа

В работе рассмотрена одна из методик расчета дальности действия активных ПНВ. Методика основана на выражениях для яркости изображения объекта и фона на экране ЭОПа ПНВ. В этих выражениях учтены следующие основные составляющие в яркости изображения объекта (ФОНА) на экране ЭОПа.

1. Составляющая яркости изображения за счет отражения лучей прожектора прямо прошедших до поверхности объекта (фона).
2. Составляющая яркости изображения за счет отражения лучей прожектора рассеянных «вперед» и достигших поверхности объекта (фона).
3. Составляющая яркости за счет рассеяния лучей в атмосфере. Эта составляющая является помехой рассеяния слоев атмосферы между прибором и объектом.
4. Составляющая яркости за счет темного свечения экрана ЭОПа. Эта составляющая называется внутренней помехой ПНВ.

Суммарная яркость изображения объекта на экране активного ПНВ выражается в виде:

$$\begin{aligned}
 L_{C\Sigma} = & \frac{k\eta_o\tau_n\tau_o D_n^2 \Phi_n d^2 \rho_o}{16\pi S_n f^2 V_\Sigma^2} \cdot e^{-2\beta_\alpha l} \cos \alpha + \\
 & + \frac{k\eta_o\tau_n\tau_o D_n^2 \Phi_n d^2 \rho_o \beta_{11}^C(\varepsilon)}{64\pi S_n f^2 V_\Sigma^2} \cdot e^{-\beta_\alpha l} \cos \alpha + \\
 & + \frac{k\eta_o\tau_n\tau_o D_n^2 d^2 \beta_\alpha^2 \Phi_n^2 \beta_{11}^C(\pi - \varepsilon)}{32\pi S_n f^2 V_\Sigma^2} \cdot [F(2\beta_\alpha l) - F(2\beta_\alpha l)] \times \\
 & \times C \cdot 10^6 + \frac{k_{за} \eta_o j}{\pi \Phi V_\Sigma^2}.
 \end{aligned}
 \tag{43}$$

Здесь, помимо принятых ранее, введены следующие обозначения:

Φ_n – световой поток (мощность) источника излучения передающей части прибора;

$k_{за}$ – коэффициент использования глазом излучения экрана ЭОПа;

D_n – световой диаметр объектива прожектора (передающей части) ПНВ;

τ_n – коэффициент пропускания передающей части ПНВ;

S_n – площадь излучающей поверхности источника излучения прожектора;

α – угол между осью прожектора и нормалью к поверхности объекта;

ε – угол между оптическими осями прожектора и приемной части ПНВ;

l_1 – расстояние от вершины прожекторного пучка лучей до входа в него визирной оси;

$\beta_{11}^C(\varepsilon)$ – значение нормированной индикатрисы рассеяния «вперед» слоя атмосферы между объектом и прибором;

$\beta_{11}^C(\pi - \varepsilon)$ – значение нормированной индикатрисы рассеяния «назад» слоя атмосферы;

$F(2\beta_\alpha l)$ – табулированная функция Гершуна;

c – коэффициент усреднения силы света внутри диаграммы направленности прожектора (лазера).

Аналогично для яркости изображения фона на экране ПНВ получена следующая формула:

$$\begin{aligned}
 L_{\Phi\Sigma} = & \frac{k\eta_o\tau_n\tau_o D_n^2 \Phi_n d^2 \rho_\Phi}{16\pi S_n f^2 V_\Phi^2} \cdot e^{-2\beta_\alpha l_\Phi} \cos\alpha_\Phi + \\
 & + \frac{k\eta_o\tau_n\tau_o D_n^2 \Phi_n d^2 \rho_\Phi \beta_{11}^C(\varepsilon)}{64\pi S_n f^2 V_\Phi^2} \cdot e^{-\beta_\alpha l_\Phi} \cos\alpha_\Phi + \\
 & + \frac{k\eta_o\tau_n\tau_o D_n^2 d^2 \beta_\alpha^2 \Phi_n^2 \beta_{11}^C(\pi - \varepsilon)}{32\pi S_n f^2 V_\Phi^2} \cdot [F(2\beta_\alpha l_1) - F(2\beta_\alpha l_\Phi)] \times \\
 & \times C \cdot 10^6 + \frac{k_\Phi \eta_o j}{\pi \phi l_\Phi^2}.
 \end{aligned} \tag{44}$$

Здесь приняты обозначения:

α_Φ – угол между оптической осью прожектора и нормалью к поверхности фона;

l_Φ – дальность до фона.

Тогда, с учетом (41) и (42), абсолютный контраст яркости изображения объекта на экране ЭОПа ПНВ получен как разность $L_{O\Sigma} - L_{\Phi\Sigma}$:

$$L_{O\Sigma} - L_{\Phi\Sigma} = \Delta L_{ПОР} = \mu L_\Phi \tag{45}$$

Здесь $\Delta L_{ПОР}$ – пороговая разность яркости изображения на экране ЭОПа.

Следует отметить, что для решения уравнения (43.45) относительно l необходимо знать значение $\Delta L_{ПОР}$ и значение l_Φ .

32.3.4.5. Методика расчета дальности разрешения ПНВ активного типа

Анализ выражений (43) и (44) показывает, что недостатком методики расчета дальности действия ПНВ активного типа, изложенной в работе, является проблематичность в расчете дальности разрешения, то есть зависимости дальности от размеров разрешаемых элементов

поверхности объекта или от их пространственных частот ν и μ . В этой связи воспользуемся результатами, изложенными в пп. 4.2–4.5.

По аналогии с формулой (18), модуль ПЧС контраста яркости изображения объекта на экране ЭОПа активного ПНВ формируем в виде:

$$\tilde{K}(\nu, \mu) = \left| \frac{\tilde{L}_{O\Sigma}(\nu, \mu) - \tilde{L}_{\Phi\Sigma}(\nu, \mu)}{\tilde{L}_{O\Sigma}(\nu, \mu) + \tilde{L}_{\Phi\Sigma}(\nu, \mu)} \right| \cdot \tilde{h}_O(\nu, \mu) \cdot \tilde{h}_\Sigma(\nu, \mu). \quad (46)$$

Здесь $\tilde{L}_{O\Sigma}(\nu, \mu)$, $\tilde{L}_{\Phi\Sigma}(\nu, \mu)$ – модули ПЧС суммарной яркости объекта и фона на экране ЭОПа активного ПНВ.

Модули ПЧС суммарной яркости объекта и фона на экране ЭОПа запишем в виде:

$$\tilde{L}_{O\Sigma}(\nu, \mu) = L_{O1} |\tilde{L}_{O1}(\nu, \mu)| + L_{O2} |\tilde{L}_{O2}(\nu, \mu)| + L_{O3} |\tilde{L}_{O3}(\nu, \mu)| + L_\Sigma; \quad (47)$$

$$\tilde{L}_{\Phi\Sigma}(\nu, \mu) = L_{\Phi1} |\tilde{L}_{\Phi1}(\nu, \mu)| + L_{\Phi2} |\tilde{L}_{\Phi2}(\nu, \mu)| + L_{\Phi3} |\tilde{L}_{\Phi3}(\nu, \mu)| + L_\Sigma. \quad (48)$$

Составляющие в этих формулах определяются следующим образом:

$$L_{O1} = \frac{k\eta_O \tau_n \tau_O D_n^2 \Phi_n d^2 \rho_O}{16\pi S_n l^2 f'^2 V_\Sigma^2} \cdot e^{-2\beta_\alpha l}; \quad (49)$$

$$L_{O2} = \frac{k\eta_O \tau_n \tau_O D_n^2 \Phi_n d^2 \rho_O}{64\pi S_n l f'^2 V_\Sigma^2} \cdot \beta_{11}^C(\epsilon) e^{-2\beta_\alpha l}; \quad (50)$$

$$L_{O3} = \frac{k\eta_O \tau_n \tau_O D_n^2 d^2 \Phi_n \beta_{11}^C(\pi - \epsilon)}{32\pi S_n f'^2 V_\Sigma^2} \cdot [F(2\beta_\alpha l) - F(2\beta_\alpha l)] \cdot 10^6; \quad (51)$$

$$L_{\Phi_1} = \frac{k\eta_0\tau_n\tau_0 D_n^2 \Phi_n d^2 \rho_{\Phi}}{16\pi S_n l^2 f^2 V_{\Theta}^2} \cdot e^{-2\beta_{\alpha} l}, \quad (52)$$

$$L_{\Phi_2} = \frac{k\eta_0\tau_n\tau_0 D_n^2 \Phi_n d^2 \rho_{\Phi}}{64\pi S_n l f^2 V_{\Theta}^2} \cdot \beta_{11}^G(\varepsilon) e^{-2\beta_{\alpha} l}, \quad (53)$$

$$L_{\Theta} = \frac{k_{\alpha} \eta_{\Theta}}{\pi \Phi l^2};$$

$$\begin{aligned} \tilde{L}_{O_1}(v, \mu) &= \tilde{L}_{O_2}(v, \mu) = \\ &= \iint_{(x_0, y_0)} \beta[\alpha(x, y)] \cos \alpha(x, y) \cdot e^{-J(vx + \mu y)} dx dy, \end{aligned} \quad (54)$$

$$\tilde{L}_{O_3}(v, \mu) = \iint_{(x_0, y_0)} e^{-J(vx + \mu y)} dx dy, \quad (55)$$

$$\begin{aligned} \tilde{L}_{\Phi_1}(v, \mu) &= \tilde{L}_{\Phi_2}(v, \mu) = \\ &= \iint_{(x_{\Phi}, y_{\Phi})} \beta_{\Phi}[\alpha_{\Phi}(x, y)] \cos \alpha_{\Phi}(x, y) \cdot e^{-J(vx + \mu y)} dx dy, \end{aligned} \quad (56)$$

$$\tilde{L}_{\Phi_3}(v, \mu) = \iint_{(x_{\Phi}, y_{\Phi})} e^{-J(vx + \mu y)} dx dy. \quad (57)$$

Тогда, с использованием формулы (45) и по аналогии с выражением (39), дальность разрешения активных ПНВ можно определить по формуле:

$$L_{\text{разр}}^{(\alpha)}(v, \mu) = l(v, \mu) \left| \left| \kappa(v, \mu) \geq \kappa_n \right| \right.$$

Как в случае пассивных ПНВ, для активных приборов, когда имеется практическая потребность расчета диаметра входного зрачка d объектива приемной части ПНВ, целесообразно (для упрощения инженерных расчетов) пользоваться следующим выражением для определения абсолютного значения контраста яркости изображения объекта на экране ЭОПа по формуле:

$$\left| \tilde{L}_{O\Sigma}(v, \mu) - \tilde{L}_{\Phi\Sigma}(v, \mu) \right| \cdot h_O(v, \mu) \cdot h_{\Sigma}(v, \mu) \geq \mu L_{\Sigma}. \quad (58)$$

При этом можно пользоваться следующими приближениями:

$$\left| \tilde{L}_{O1}(v, \mu) \right| = \left| \tilde{L}_{O2}(v, \mu) \right| = \beta(\alpha) \cos \alpha, \quad (59)$$

$$\left| \tilde{L}_{\Phi1}(v, \dots, \mu) \right| = \left| \tilde{L}_{\Phi2}(v, \mu) \right| = \beta_{\Phi}(\alpha_{\Phi}) \cos \alpha_{\Phi}, \quad (60)$$

где $\beta(\alpha)$, $\beta_{\Phi}(\alpha_{\Phi})$ – коэффициенты яркости поверхности объекта и фона.

32.3.5. Методика энергетического расчета тепловизионных систем

32.3.5.1. Анализ методик температурной чувствительности тепловизоров

В теории и практике расчета чувствительности тепловизионных систем наиболее широкое применение нашли методы расчета температурной

чувствительности, изложенные в монографии М.М. Мирошникова и монографии Дж Ллойда. Методика М.М. Мирошникова основана на расчете пороговой разности температур $\Delta T_{пор}$, эквивалентной шуму, по следующей формуле:

$$\Delta T_{пор} = \frac{21,6 \cdot 10^{10} m}{T^3} \cdot \frac{\Phi_n(f_0) \cdot \sqrt{\Delta f}}{D_0 \tau_0 \delta (\Delta \ln \lambda)_{эф}}, \quad (61)$$

здесь $\Phi_n(f_0)$ – пороговый поток приемника на частоте модуляции f_0 ;

m – отношение «сигнал/шум»;

Δf – шумовая полоса частот электрической схемы включения приемника излучения;

δ – относительное отверстие оптической системы тепловизора;

$\delta = \sqrt{\alpha \beta}$, где α и β – мгновенные поля зрения тепловизора по строке и кадру соответственно;

τ – произведение максимальных значений спектрального коэффициента пропускания оптической системы $\tau_0(\lambda)$ и слоя атмосферы между объектом наблюдения и системой $\tau_a(\lambda)$;

$(\Delta \ln \lambda)_{эф}$ – эффективная логарифмическая спектральная ширина полосы пропускания спектральной системы и слоя атмосферы;

D_0 – диаметр входного зрачка оптической системы;

T – температура абсолютно черного тела (АЧТ), относительно которого получается приращение температуры $\Delta T_{пор}$.

Методика Ллойда сводится к расчету $\Delta T_{пор}$ по следующей формуле:

$$\Delta T_{пор} = \frac{\pi \sqrt{ab \Delta f k} m T^2}{\alpha \beta A_0 C_2 D^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau(\lambda) \tau_a(\lambda) \frac{W(\lambda, T)}{\lambda} d\lambda}, \quad (62)$$

здесь a, b – линейные размеры чувствительной площадки приемника излучения;

D^* – интегральная удельная обнаружительная способность приемника излучения;

A_0 – площадь входного зрачка оптической системы тепловизора;

$S(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность приемника

излучения;

$W(\lambda, T)$ – спектральная светимость АЧТ с температурой T ;

λ_1, λ_2 – границы спектральной чувствительности приемника излучения;

C_2 – постоянная в формуле Планка.

В формуле (62) введен коэффициент запаса m , численно равный отношению «сигнал/помеха».

Анализ формул (61) и (62) показывает, что для инженерных расчетов более предпочтительной является методика Ллойда, так как в формулу (62) в явном виде входят параметры оптической системы, приемника излучения, атмосферы и объекта наблюдения.

32.3.5.2. Методика расчета температурно-частотной характеристики (ТЧХ) тепловизионных систем

Впервые вопрос о расчете ТЧХ тепловизионных систем был рассмотрен Ллойдом. При выводе зависимости минимальной разрешаемой разности температур тепловизора от пространственной частоты $\Delta T_{раз} = f(\nu)$ и ряде допущений, им получено следующее выражение:

$$\Delta T_{раз} = 3 \frac{\Delta T_{пор} \cdot \nu \cdot \sqrt{\beta} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\tau_d}}}{\tilde{r}_\Sigma(\nu) \cdot \sqrt{T_e} \cdot f_k \cdot \sqrt{\Delta f_R}}, \quad (63)$$

где $\Delta T_{пор}$ – пороговая разность температур тепловизора;

Δf – полоса частот пропускания электронного тракта;

α, β – мгновенные поля зрения тепловизора по строке и кадру (в мрад);

τ_d – время формирования информации одного элемента разложения кадра;

– модуль передаточной функции всей системы;

T_e – постоянная времени глаза;

f_k – частота кадров;

ν – пространственная частота в изображении элементов поверхности объекта.

Входящая в формулу (63) величина $\Delta T_{пор}$, может быть рассчитана по формуле (62).

Модуль передаточной функции (МПФ) тепловизора можно представить в виде:

$$\tilde{r}_\Sigma(\nu) = \tilde{r}_o(\nu) \tilde{r}_n(\nu) \tilde{r}_s(\nu) \tilde{r}_k(\nu) \tilde{r}_\varepsilon(\nu), \quad (64)$$

где $\tilde{r}_o(\nu)$, $\tilde{r}_n(\nu)$, $\tilde{r}_s(\nu)$, $\tilde{r}_k(\nu)$, $\tilde{r}_\varepsilon(\nu)$ – МПФ соответственно оптической системы, приемника излучения, тракта усиления и обработки электрического сигнала, видеоконтрольного устройства и глаза.

Эти величины определяются по формулам:

$$\tilde{r}_o(\nu) = e^{-\left[\frac{\pi^2}{2} q_s^2 \delta_s \nu^2\right]}, \quad (65)$$

$$\tilde{r}_n(\nu) = \frac{\sin(\pi \nu \delta_\nu)}{\pi \nu \delta_\nu}, \quad (66)$$

$$\tilde{r}_s(\nu) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi q_c \nu \delta_\lambda)^2}}, \quad (67)$$

$$\tilde{r}_k(\nu) = e^{-\left[\frac{\pi^2}{2} q_B^2 (\delta_B \nu)^2\right]}, \quad (68)$$

$$\tilde{r}_\varepsilon(\nu) = e^{-2\pi^2 \varepsilon_2^2 \nu^2}. \quad (69)$$

Здесь приняты обозначения:

$$q_o = 2\alpha_o(\delta_x) = \rho_o/c;$$

ρ_o – диаметр абберационного пятна рассеяния оптической системы;

a – линейный размер приемника излучения по координате x ;

$\delta_x = (c/f')1000$ (мрад) – угловой размер приемника излучения в направлении сканирования;

$2\alpha_o$ – угловой размер кружка рассеяния оптической системы;

$$q_e = 2r_e/c;$$

$2r_e$ – диаметр сканирующего пятна на экране ВКУ, приведенный к пространству изображений в фокальной плоскости объектива тепловизора;

$$2r_e \approx 1,075\rho = h / Nc\beta_e;$$

h – высота кадра на экране ВКУ;

Nc – число строк в кадре;

β_e – линейное увеличение ВКУ;

ρ – расстояние между центрами строк в кадре;

$$q_c = \tau / t_{ex};$$

t_{ex} – длительность входного импульса или время формирования одного элемента разложения кадра;

τ – постоянная времени апериодического звена – эквивалента электронного тракта усиления и обработки сигнала;

$$\delta_z = 0,2 \dots 0,3 \text{ мрад.}$$

32.3.5.3. Методика расчета температурной чувствительности тепловизионных систем

Анализ методов расчета температурной чувствительности тепловизоров показал, что формулы (61) и (62) имеют определенные ограничения, так как они получены для частного случая работы приборов по равномерному полю теплового излучения.

В ряде работ приведены методики расчета температурной чувствительности тепловизоров при их работе по неравномерному объектно-фоновому полю теплового излучения.

Так, в одной из работ, получено следующее выражение для расчета $\Delta T_{\text{нор}}^{(n)}$ при работе тепловизора по неравномерному объектному полю теплового излучения:

$$\Delta T_{\text{нор}}^{(u)} = \pi K_s \sqrt{ab\Delta f} / A_0 D^* \int_{\lambda_4}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) A[\lambda, T(x, y), \bar{T}] d\lambda \quad (70)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$T(x, y)$ – функция распределения температуры по поверхности объекта;

\bar{T} – среднее значение температуры объекта;

x, y – декартовы координаты точек на поверхности объекта;

$$A[\lambda, T(x, y), \bar{T}] = \alpha \beta (C_2 / \lambda \bar{T}^2) \cdot W(\lambda, \bar{T}) + \frac{1}{l^2} \cdot \frac{\partial B[\lambda, T(x, y), \bar{T}]}{\partial T};$$

$W(\lambda, \bar{T})$ – спектральная светимость АЧТ с температурой \bar{T} .

Описанная в работах методика позволяет рассчитать реальную чувствительность тепловизионных систем, работающих на борту космических аппаратов, для которых в поле зрения из-за больших значений дальности l попадают поверхности с неравномерным полем теплового излучения.

Для более сложной ситуации, когда на поверхности, как объектов так и окружающего фона, которые попадают в мгновенное поле зрения тепловизионной системы, наблюдается неравномерность их температурных полей, в одной из работ рассмотрена методика расчёта температурной чувствительности тепловизионных систем по неравномерному объектно-фоновому полю теплового излучения. Согласно этой методике, температурная чувствительность $\Delta T_{\text{нор}}^{(u)}$ определяется по формуле:

$$\Delta T_{\text{нор}}^{(u)} = \frac{m \sqrt{1 + K^2 (\bar{\Phi}_\Phi) + K_\Phi^2 J_\Phi^2}}{K_o \int_{\lambda_4}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_o(\lambda) \cdot \{\varepsilon(\lambda) \cdot A_o[\lambda, T(x, y), \bar{T}] + \varepsilon_\Phi(\lambda) \cdot A_\Phi[\lambda, T_\Phi(x, y), \bar{T}_\Phi]\} d\lambda} \quad (71)$$

Здесь:

$$K_s = D^* A_0 / \pi K_s \sqrt{ab\Delta f};$$

$$A_o[\lambda, T(x, y), \bar{T}] = \alpha_o \beta_o \frac{\partial W(\lambda, \bar{T})}{\partial T} + \frac{1}{l^2} \cdot \frac{\partial B[\lambda, T(x, y), \bar{T}]}{\partial T},$$

$$A_\phi[\lambda, T(x, y), \bar{T}_\phi] = \alpha_\phi \beta_\phi \frac{\partial W(\lambda, \bar{T}_\phi)}{\partial T} + \frac{1}{l^2} \cdot \frac{\partial B[\lambda, T(x, y), \bar{T}_\phi]}{\partial T},$$

$$B[\lambda, T(x, y), \bar{T}] = \iint_{(x_o, y_o)} \Delta W[\lambda, T(x, y), \bar{T}] dx dy.$$

$$I_\phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_\alpha(\lambda) \varepsilon_\phi(\lambda) B_\phi[\lambda, T_\phi(x, y), \bar{T}_\phi] d\lambda;$$

$$B_\phi[\lambda, T_\phi(x, y), \bar{T}_\phi] = \iint_{(x_\phi, y_\phi)} \Delta W[\lambda, T_\phi(x, y), \bar{T}_\phi] dx dy,$$

(x_o, y_o) , (x_ϕ, y_ϕ) – линейные размеры соответственно объекта и участков сопутствующего фона, который попадает в поле зрения тепловизора;

$$K_\phi = \frac{K_o}{l^2}, \quad \alpha_o \beta_o = \frac{x_o y_o}{l^2};$$

$K(\bar{\Phi}_\phi)$ – коэффициент нелинейности ПОИ;

$T_\phi(x, y)$ – функция распределения температуры фона;

\bar{T}_ϕ – среднее значение температуры фона;

$\varepsilon_\phi(\lambda)$ – спектральный коэффициент излучения участков поверхностей фона;

$\Delta W[\lambda, T(x, y), \bar{T}]$ – вариация светимости АЧТ, вызываемая изменением температуры $\Delta T = T(x, y)$.

Анализ выражения (71) показывает, что оно может рассматриваться в качестве обобщенного теоретического критерия проектирования тепловизионных систем, так как позволяет осуществлять выбор параметров и характеристик составных узлов приборов при их работе по произвольным объектно-фоновым полям теплового излучения.

32.3.6. Методика энергетического расчета оптико-электронных радиометров и измерительных ОЭС

Специфика работы оптико-электронных радиометров и ряда измерительных ОЭС состоит в том, что они предназначены для абсолютных измерений оптического излучения в энергетических единицах для УФ, видимой и ИК областей спектра. В этой связи, в качестве критерия энергетического расчета можно выбрать отношение «сигнал/шум» μ :

$$\mu = u / u_{ш}, \quad (72)$$

здесь: u – величина электрического сигнала на выходе приемника излучения радиометра при визировании исследуемой поверхности; $u_{ш}$ – среднеквадратичное значение напряжения внутренних шумов радиометра.

Величина сигнала u может быть представлена в виде:

$$u = A_{\text{вх}} \cdot \omega_{\text{зр}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) S_{\lambda} \tau_{\phi}(\lambda) d\lambda. \quad (73)$$

Здесь L_{λ} – спектральная яркость излучения наблюдаемой радиометром поверхности;

$\tau_{\phi}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания оптического фильтра; $\omega_{\text{зр}}$ – телесный угол поля зрения радиометра.

Значение напряжения шумов $u_{ш}$ радиометра определяется по формуле:

$$u_{\text{изл}} = S \Phi_{\text{изл}} \quad (74)$$

где S – интегральная чувствительность приемника излучения по излучению эталонного источника;
 $\Phi_{\text{изл}}$ – пороговый поток приемника излучения по эталонному источнику.

Так как на практике, чаще всего в паспортных данных приемника излучения, приводится не значение абсолютной чувствительности приемника излучения S , а значение интегральной чувствительности S и относительной спектральной чувствительности $S_{(\lambda)}$, то целесообразно воспользоваться следующей формулой:

$$S_{\lambda} = \frac{S \cdot S_{(\lambda)}}{k_{\text{э}}}, \quad (75)$$

где $k_{\text{э}}$ – коэффициент использования приемником излучения эталонного источника.

Тогда, с учетом (73 –75), отношение «сигнал/шум» в радиометре примет вид:

$$\mu = \frac{A_{\text{ВХ}} \omega_{\text{ЗР}}}{k_{\text{э}} \cdot \Phi_{\text{ЭП}}} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \tau_0(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) S(\lambda) d\lambda. \quad (76)$$

Иногда в паспорте приемника излучения приводится не значение порогового потока $\Phi_{\text{ЭП}}$, а значение удельной обнаружительной способности D^* . Если учесть, что параметры D^* и $\Phi_{\text{ЭП}}$ связаны между собой формулой:

$$D^* = \sqrt{\frac{ab\Delta f}{\Phi_{ЭП}}}, \quad (77)$$

то выражение (76), в этом случае, примет следующий вид:

$$\mu = \frac{A_{ВХ} \omega_{ЭП} D^*}{\sqrt{ab\Delta f}} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \tau_0(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) S(\lambda) d\lambda. \quad (78)$$

33. Определение параметров и характеристик тепловизоров

33.1. Основные параметры и характеристики тепловизоров

Тепловизоры используют не только для воспроизведения изображения нагретых объектов по их собственному тепловому излучению, но и для измерения тепловых (или температурных) полей различных теплоизлучающих объектов. Для измерений с помощью тепловизоров необходимо прежде всего знать их параметры и характеристики. К ним относятся: поле и мгновенное поле зрения, угловое разрешение, порог температурной чувствительности, дальность обнаружения (малоразмерных теплоизлучающих объектов) и оптическая передаточная функция.

Поле зрения — плоские углы по вертикали u_v и горизонтали u_g , ограничивающие область пространства, попадающего в кадр. При прямоугольном растре отношение u_v/u_g определяет его форму.

Мгновенное поле зрения — плоские углы по вертикали и

горизонталю определяемые фокусным расстоянием объектива и линейными размерами чувствительной площадки а приемника излучения.

Угловое разрешение — предельный (минимальный) угол между двумя точечными излучателями, расположенными на фоне с постоянной заданной температурой, и воспроизводимыми раздельно в тепловизионном изображении.

Трудность практической реализации точечных ИК излучателей, неравномерность чувствительности тепловизоров в пределах мгновенного поля обзора и наличие шумов привели к другому определению понятия углового разрешения. Угловое разрешение тепловизора — минимальное значение плоского угла между центрами одинаково излучающих элементов тест-объекта, отделенных друг от друга элементом, равным им по размеру и отличающимся по радиационному контрасту, при котором эти элементы раздельно воспроизводятся в телевизионном изображении (ОСТ 3-4408-82).

Порог температурной чувствительности — минимальная разность температур $(A_T)_{пор}$ объекта и фона, вызывающая выходной сигнал, пиковое значение которого равно среднеквадратичному значению шума (ОСТ 3-4408— 62). В иностранной технической литературе величину $(A_T)_{пор}$ обозначают NETD (по первым буквам английских слов Noise Equivalent Temperature Diffence — разность температур, эквивалентная шуму). Это сокращение аналогично обозначению порогового потока NEP (Noise Equivalent Power — мощность, эквивалентная шуму).

Величина $(A_T)_{пор}$ зависит от температуры Т объекта, поэтому более полной характеристикой температурного разрешения следует считать зависимость $(A_T^*)_{пор} = / СП-$ Так как эту зависимость трудно определять на практике, в паспортных данных тепловизоров приводят значение $(A_T)_{пор}$ для одной или нескольких температур Т объекта.

Дальность обнаружения — максимальное расстояние между точечным объектом наблюдения и тепловизором, при котором выходной сигнал последнего превышает в заданное число т раз среднеквадратичное значение шума. Этот параметр зависит от большого числа факторов (характеристик теплоизлучающего объекта, состояния атмосферы, характеристик фона, на котором находится наблюдаемый объект).

Оптическая передаточная функция (ОПФ) — мера способности тепловизора воспроизводить пространственные частоты, содержащиеся в изображаемой картине. ОПФ является комплексной функцией, модуль которой представляет частотно-контрастную характеристику (ЧКХ). Значение этой функции условно принято за

единицу при нулевой частоте или близкой к ней. Аргумент ОПФ определяет фазовый сдвиг пространственной частоты, вносимый системой.

При использовании ОПФ как средства описания и анализа тепловизионного прибора необходимо соблюдать следующие условия:

- 1) воспринимаемое тепловизором излучение некогерентно;
 - 2) обработка сигнала линейна;
- воспроизведение изображения — пространственно инвариантный процесс;
- преобразование излучения объекта в его изображение однозначно и происходит без шумов. Последние три условия в тепловизорах обычно нарушаются, поэтому использование ОПФ для тепловизионного прибора является недостаточно надежной оценкой его качества.

33.2. Максимальная дальность обнаружения малоразмерных теплоизлучающих объектов

Максимальная дальность обнаружения D_{\max} является одним из главных параметров тепловизора при использовании его для обнаружения и наблюдения удаленных теплоизлучающих объектов. Ниже приведены основные формулы для определения величины D_{\max} . При выводе формул были сделаны следующие допущения: объект обнаружения представляет собой плоский «серый» излучатель, имеющий постоянные коэффициент излучения и температуру по всей поверхности; нормаль к поверхности излучения образует угол α с линией деятельности D ; направления осей пучков, исходящих из любых элементарных площадок излучения и опирающихся на площадь объектива передающей камеры, настолько близки друг к другу, что углы α и дальности D считаются одинаковыми для всех элементарных площадок и относятся к геометрическому центру поверхности излучения; фон, на котором находится объект, считается неизлучающим; трасса наблюдения горизонтальна.

Эталонные инфракрасные излучатели

При тепловизионных измерениях функции эталонных источников выполняют модели абсолютно черного тела, а также различные лампы и лазеры, применяемые при калибровке приборов, имитации измерения фонов и целей.

В связи с отсутствием в настоящее время государственной поверочной схемы по прямой передаче единицы Кельвина тепловизионным

средствам измерений низких температур, в тепловидении используется ГОСТ 8.106—80 «Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений энергетической яркости и силы излучения тепловых источников с температурой от 220 до 900 К.

Переход к шкале радиационных температур осуществляется расчетным путем по формуле Планка. Значение энергетической яркости, воспроизводимой государственным специальным эталоном при температуре фазовых переходов воды, олова и цинка, составляют соответственно 100,5; 1173,5 и 4151,0 Вт/(ср • м²). Эталон обеспечивает воспроизведение единицы энергетической яркости со средним квадратическим отклонением результата измерений $L \leq 0,5 \cdot 10^{-2}$ Вт/(ср • м²), у вторичного эталона $L < 0,5 \cdot 10^{-2}$ Вт/(ср • м²).

Образцовые средства измерений 1-го и 2-го разряда имеют соответственно доверительную относительную погрешность $50 \ll 3 \cdot 10^{-2}$ и $80 \ll 9 \cdot 10^{-2}$ для энергетической яркости. В качестве рабочих средств измерений применяют излучатели с энергетической яркостью 40...12000 Вт/(ср • м²), радиометры-яркометры в диапазоне энергетической яркости 40... 12000 Вт/(ср • м²), излучатели с силой излучения $1 \cdot 10^{-4}$...3,5 Вт/ср, радиометры и приемники ИК излучения в диапазоне силы излучения $1 \cdot 10^{-4}$...3,5Вт/ср. Для рабочих средств измерений допустимая относительная погрешность $60 = (3...50)10^{-2}$. Соотношение погрешностей образцовых и рабочих средств измерений должно быть не более 1 : 3.

При передаче единицы энергетической яркости от государственного специального эталона образцовым и рабочим ИК излучателям используется метод прямого измерения радиометрами-яркометрами и метод сличения радиометрами-компараторами. При прямом методе измерений по градуировочной кривой радиометра и его реакции на излучение находят яркость градуируемого излучателя. Метод сличения — более точный. Компаратором для эталонной установки АЧТ-419 (температура затвердевания цинка — $419,58 \pm 0,03$ °С) является радиометр РАД-3С с поворотным устройством, предназначенный для передачи единицы энергетической яркости рабочему эталону ИРЭ-60Н. В эталонном излучателе АЧТ-01 используется температура тройной точки воды ($0,01 \pm 0,0002$ °С), а в АЧТ-232 — олова. Радиометр-компаратор типа РАД-3 используется при непосредственном сличении рабочего эталона с поверочными излучателями.

Одними из первых были метрологически аттестованы как образцовые средства измерения температуры низкотемпературные излучатели РП-728 и РП-729, воспроизводящие тепловое поле в виде круга 50 и 100

мм в диапазоне от 26 до 36 °С при 11 фиксированных уровнях температуры [120]. Аттестацию проводили на установке УВС-1М непосредственным сличением этих излучателей энергетической яркости с яркостью рабочего эталона ИРЭ-60Н с помощью радиометра-компаратора РАД-3Н методом замены. Погрешность не превышала 0,2 К на уровне 30 °С. Создан и рабочий эталон ИНЭ-1 с прямым измерением температуры. Для выполнения операций сличения образцового и рабочих ИК излучателей по энергетической яркости, определения неравномерности излучения по площади, получения теплопортрета излучателя, его изотермических зон, времени выхода на режим и других параметров разработан стенд типа Р2К (рис. 1) на базе тепловизора «Рубин-2» и преобразователя аналоговой термограммы в дискретную типа «Квантователь». Электронный тракт тепловизора доработан с целью уменьшения нелинейных искажений, в его зеркальный объектив введена кольцевая бленда, конструкция дополнена интегрирующим звеном, вертикальным и горизонтальными приводами сканирования, осциллографом, самописцем.

Преобразователь «Квантователь» в составе стенда использован без доработок. Стенд Р2К может работать в пяти режимах: радиометрии, термографировании кадра за время 1 мин, сканировании вертикальной строки с частотой 1/150 Гц, сканировании вертикальной строки с периодом 1 мин, сканировании горизонтальной строки с периодом 1 мин. Стенд дает возможность получать аналоговую или цифровую (квантованную на 5 или 10 уровней) термограмму, регистрировать вертикальный или горизонтальный термопрофиль. При этом порог температурной чувствительности достигает 0,03 °С.

Через сканирующее зеркало и объектив ИК излучение, прерываемое с частотой 1360 Гц зеркальным модулятором, поступает через германиевый конденсор на охлаждаемый жидким азотом ПИ, представляющий собой фоторезистор из антимонида индия, маломощный предусилитель и полосовой фильтр с полосой 1360 поступает на основной усилитель, где усиление регулируется калиброванным аттенуатором диапазона регистрируемых температур, а фаза сигнала фазорегулятором для обеспечения работы синхронного детектора. В предусилителе через дифференциальный вход осуществляется вычитание из сигнала постоянной составляющей, т. е. формирование уровня отсчета температур. Производится по каналу синхронизирующих импульсов, получаемых с синхродатчика с частотой 1360 Гц, через синхроусилитель, формирователь опорных импульсов и аттенуар уровня отсчета температур. Нижний уровень сигнала формируется от встроенного ИК излучателя, термостабилизируемого регулятором температуры.

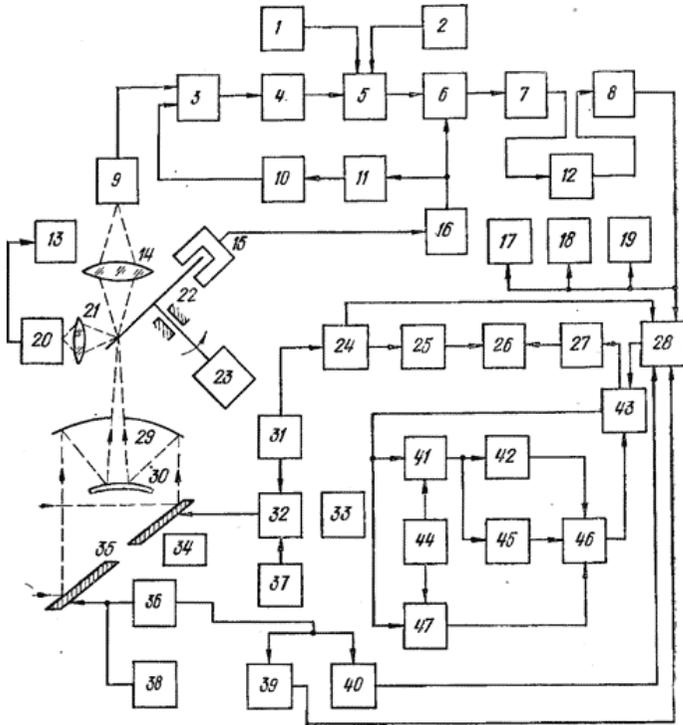


Рис. 1. Функциональная схема стенда Р2К для контроля ИК излучателей:

1 — аттенуатор диапазона; 2 — фазорегулятор; 3 — предусилитель; 4 — полосовой фильтр; 5 — основной усилитель; 6 — синхронный детектор; 7 — интегрирующее звено; 8 — фильтр-пробка; 9 — приемник излучения; 10 — аттенуатор уровня отсчета температуры; 11 — формирователь опорных импульсов; 12 — дополнительное интегрирующее звено; 13 — регулятор температуры; 14 — конденсор; 15 — синхродатчик; 16 — синхроусилитель; 17 — осциллограф; 18 — стрелочный индикатор; 19 — самописец; 20 — встроенный ИК излучатель; 21 — линза; 22 — модулятор; 23 — привод модулятора; 24 — датчик строчный; 25 — синхронизатор; 26 — электрохимический регистратор; 27 — функциональный усилитель; 28 — коммутатор; 29 — бленда; 30 — объектив; 31 — привод строчный; 32 — муфта; 33 — ручной привод; 34 — визир; 35 — сканирующее зеркало; 36 — привод кадровый; 37 — вертикальный привод сканирования; 38 — горизонтальный привод; 39 — полутоновой датчик; 40 — датчик кадровый; 41 — дискретизатор; 42 — формирователь изотерм; 43 — переключатель; 44 — источник опорных напряжений; 45 — коммутатор линейки резисторов; 46 — сумматор; 47 — формирователь сигналов перегрузки

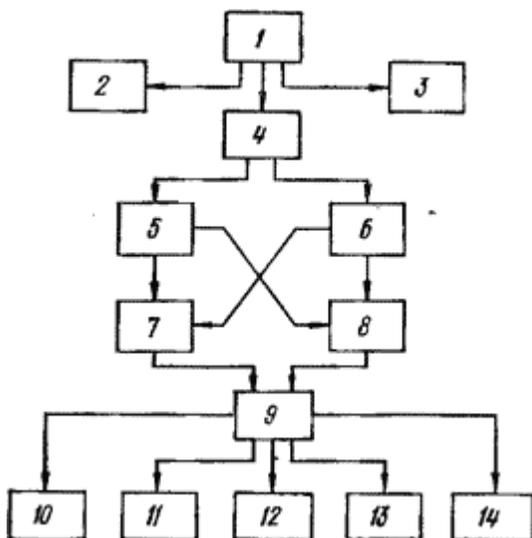


Рис. 2.

Вследствие конечного значения допусков на симметрию четырехпластного модулятора и неидентичности коэффициента отражения каждой из лопастей на выходе синхронного детектора появляется паразитная модуляция сигнала с частотой $1360/4 = 340$ Гц, подавляемая фильтром-пробкой, ограничивающим порог температурной чувствительности. Для улучшения работы фильтра к имеющемуся интегрирующему звену может вводиться дополнительное звено в случае работы в режиме радиометра или медленной регистрации термопрофилей самописцем (типа Н392) через согласующий каскад. Сигнал можно наблюдать и измерять осциллографом или стрелочным индикатором; возможно подключение вольтметра. Коммутатор во время холостого хода сканера по строке обеспечивает от полутонового датчика получение дискретной десятиуровневой шкалы плотностей на электрохимической бумаге типа ЭХБ-4, а во время обратного хода по кадру — получение гасящего импульса от датчика кадров. Переключателем сигнал пропускается через преобразователь «Квантователь» и поступает на функциональный усилитель с нелинейной передаточной функцией, учитывающей нелинейность зависимости оптической плотности бумаги ЭХБ-4 оттока записи через нее. Термограмму получают в

электрохимическом регистраторе, синхронизируемом со сканером через синхронизатор, строчные датчик и привод, который может отключаться через муфту, подключающую ручной привод или вертикальный привод сканирования. Для получения дискретной термограммы, позволяющей обнаруживать неизотермичность АЧТ и визуально ее наблюдать, в работу включается «Квантователь» и сигнал через дискретизатор, имеющий источник опорных напряжений, поступает на формирователь изотерм, которые на термограмме могут быть белыми или черными (для уверенного наблюдения щей способности, под которой понимается минимальный тепловой импульс, регистрируемый тепловизором.

Так как один и тот же излучатель (в зависимости от расстояния, с которого производится наблюдение) может быть и точечным, и протяженным, за критерий при классификации (рис. 2) принимают его угловые размеры. Если угловые размеры излучающей поверхности превосходят мгновенный угол зрения тепловизора в десять и более раз, излучатель считают протяженным.

В табл. 1 приведены основные параметры моделей АЧТ, применяемых при испытаниях тепловизоров.

1. Параметры АЧТ, применяемых при испытаниях тепловизоров

Параметр	АЧТ «Рубин-2»	АЧТ «Радуга»	АЧТ «ИТ-80У»	АЧТ «ИТ-80Д»	АЧТ КИ-1
Число излучающих поверхностей	1	2	1	1	
Формы излучающей поверхности	Круг	Два квадрата	Квадрат	Квадрат	Два круга
Площадь излучающей поверхности, см ²	13	225	81	150	12,5
Диапазон воспроизво димых температур, °С	29 ... 39	20 ... 80	26 ... 85	26 ... 80	30 ... 40
Время выхода на ре					

жим, мин:					
при нагреве	5	15	2	3	5
при остывании	15	30	5	10	12
Нагреваемая масса, г	130	1200	160	180	—
Основная погрешность	2-10-2	2-10 ⁻² .	0,5 и	3-10-2	БЮ-2
воспроизведения тем			1,5-10-2		
пературы					
Относительная нерав	—	—	0,33-10 ⁻²	—	—
номерность энергии					
ческой яркости по					
верхности					
Дискретность уста	1	1; 10	1; 5	1 ... 30	2. 3; 5
новки, °С					

В комплект тепловизоров «Рубин-2» и «Янтарь-МТ» входит одноэлементный излучатель АЧТ «Рубин-2» (рис. 3). Он состоит из собственно излучателя и электронного блока, соединенных между собой кабелем длиной 1,5 м. Излучающая поверхность выполнена в виде круга из алюминиевого сплава типа АМГ, имеющего концентрические треугольные канавки глубиной 5 мм с покрытием. На обратной стороне круга имеется канавка в виде спирали, куда укладывают нихромовый провод нагревателя, закрепляя его с помощью гипса. В центре круга в углублении размещается полупроводниковый терморезистор типа СТЗ-19-2,2 к, заливаемый сплавом Розе для обеспечения теплового контакта. Сверху на нагреватель наклеивают платиновый термометр сопротивления ИС-568; всю конструкцию размещают в цилиндрическом кожухе. Электрическая схема состоит из моста переменного тока, датчика температуры R13, аттенюатора R9, усилителя рассогласования А1, фазочувствительного регулятора на транзисторах V11, V12, питающего полуволнами напряжения через диод V1S нагреватель R14. Имея хороший тепловой контакт с излучающей поверхностью, термометр R12 позволяет контролировать температуру в процессе настройки

излучателя. Так как измерительный мост уравновешен, колебания питающего напряжения не оказывают значительного влияния на точность поддержания температуры.

Излучатель необходимо периодически проверять, так как со временем наблюдается уход температуры относительно заданной, что объясняется процессом старения термодатчика. Схема, изображенная на рис. 3, использовалась и для построения 10-элементного ИК излучателя, имеющего 10 каналов регулирования температуры. Каждая из излучающих поверхностей такого излучателя имеет площадь 65 см², диапазон дискретно задаваемых температур — (30...80) °С. Остальные параметры такие же, как и одноэлементного излучателя.

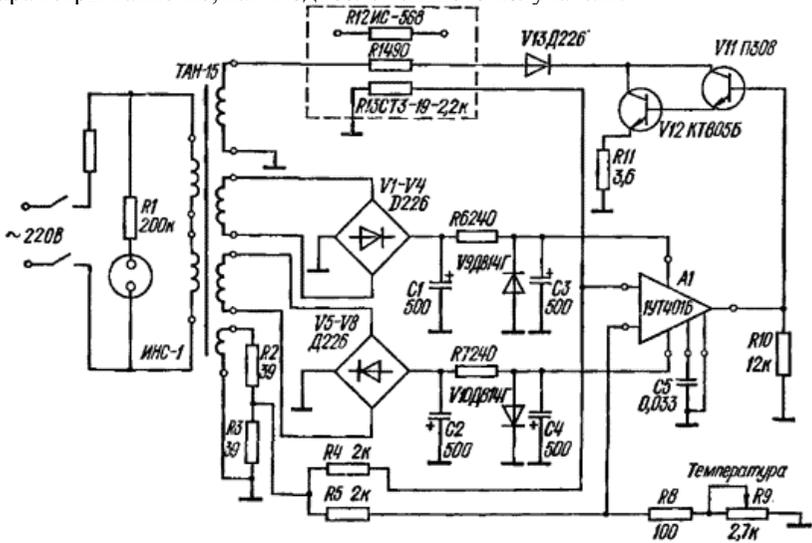


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема излучателя к тепловизору «Рубин-2»

Излучатель применяется для контроля линейности передаточного коэффициента тепловизоров; настройки их информационно-измерительного канала.

Тепловизоры «Алмаз», «Радуга-МТ», «Радуга-АТ», «Радуга-2» комплектуются двухплощадным ИК излучателем (рис. 4,а). В него входят два канала регулирования для каждой излучающей поверхности.

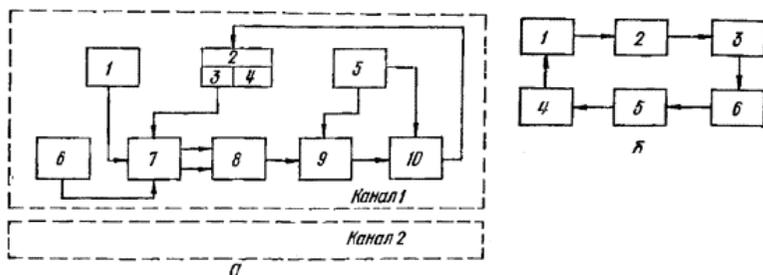


Рис. 4. Структурные схемы АЧТ «Радуга» (а) и излучателя КИ-1 (б)

Последние имеют форму квадрата 150×150 мм и выполняются из плиты толщиной 20 мм алюминиевого сплава АМГ2М с покрытием. В полость плиты вкладывают намотанный на текстолитовый корпус нагреватель из константановой проволоки; нагреватель дополнительно пропитывают электроизоляционным лаком, после чего заливают сплавом Розе для обеспечения теплового контакта с плитой, имеющей отверстие для полупроводникового терморезистора. Для замера температуры наклеивают термометр сопротивления ИС-568А. Термически обе плиты, находящиеся в одной плоскости, изолируют одну от другой зазором 3 мм. В первых моделях АЧТ «Радуга» имелся радиатор для проточной воды, охлаждающий излучатель до температур ниже окружающей среды. Однако он увеличивал теплопроводность между двумя излучающими поверхностями, что при значительной разности температур между ними ухудшало изотермичность поверхностей и стабильность температуры. Стабилизатор 1 питает мост постоянного тока 7, в плечи которого включены термодатчик 3 и аттенюатор 6, выполненный из двух переключателей на 11 положений. Сигнал с диагонали моста 7 подается через дифференциальный усилитель 8 на компаратор 9, ко второму входу которого подключен источник переменного напряжения 5. По сигналам компаратора срабатывает тиристорный регулятор 10, нагруженный на нагреватель 2, находящийся в тепловом контакте с термометром сопротивления 4, по показаниям которого и подстраивают резисторы в плечах моста 7 для каждого из 21 положений аттенюатора 6. Возможна его настройка и по энергетической яркости при наличии стенда для сличения излучателей.

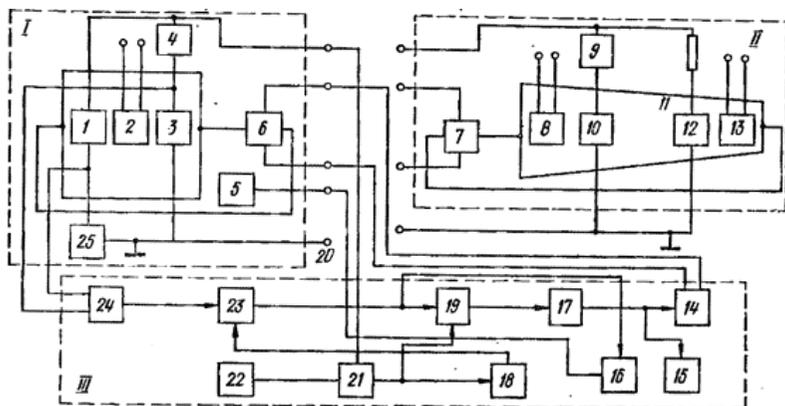


Рис. 5. Структурная схема излучателей ИТ-80У и ИТ-80Д из модульного ряда «Излучатель»

В комплект тепловизора ТВ-03 входит ИК излучатель типа КИ-1, имеющий две рабочие поверхности диаметром 40 мм каждая и электронный блок. Температура одной поверхности равна 30 °С, на второй поверхности температура может быть 32, 35 и 40 °С при точности установки $\pm 0,2$ °С. Местоположение излучающих поверхностей меняется с помощью телескопических кронштейнов. Шероховатая излучающая поверхность покрыта эмалью ПФ-19М и принадлежит медному нагреваемому сердечнику.

Структурная схема КИ-1 изображена на рис. 4,б и представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования с термодатчиком 5, включенным в мост с задатчиком 4, сигнал с которого через усилитель рассогласования 1 подается на тиристорный регулятор 2, нагружаемый на нагреватель 3, термически связанный с сердечником 6 и излучающей поверхностью излучателя.

Для тепловизора АТП-44М также разработан ИК излучатель с двумя излучающими поверхностями, имеющими независимую регулировку температуры. Он предназначен для калибровки и проверки тепловизора в процессе эксплуатации. Собственно ИК излучатели и их электронный блок крепят на легком штативе.

При построении измерительных ИК излучателей целесообразно использовать модульные конструкции. На рис. 5 изображена структурная схема трех модулей (диапазона, уровня и управления), комбинации из которых по два образуют два типа пленарных излучателей: ИТ-80У — для калибровки уровня отсчета температур тепловизоров, ИТ-80Д — одномерный излучатель для калибровки

диапазона регистрируемых температур. Модуль управления III может работать с модулем уровня I или модулем диапазона II. Габаритные размеры последних модулей $195 \times 220 \times 352$ мм, а первого — $195 \times 128 \times 352$ мм. Создан и высокотемпературный модуль уровня, образующий с модулем управления излучатель ИТ-200. Перечисленные излучатели образуют модульный ряд «Излучатель».

Модуль уровня I состоит из двух платиновых термометров сопротивления / и 3 типа ИС-568, датчика температуры 2, аттенюаторов 25 и 4, трансформатора 6 и вентилятора 5. В модуле диапазона II термометры сопротивления 10, 12 перекоммутируются по схеме измерения разности температур холодного и горячего концов или измерения температуры последнего датчиком 8. Измерительный мост, образованный термометрами сопротивления 10, 12 и аттенюаторами 25, 4, соединенными с модулем II разъемом 20, запитывается от синхронизируемого сетью генератора пилообразного напряжения 21. Сигнал с частотой 100 Гц с выхода моста подается на усилитель 24 переменного напряжения и далее на управляемый формирователем меандра 18 синхронный детектор 23, откуда выделенная постоянная составляющая сигнала рассогласования сравнивается компаратором 19 с пилообразным напряжением. В момент равенства указанных напряжений формирователь импульсов 17 через тиристорный регулятор 14 подает ток на индикатор 15 выхода на режим и на трансформатор 7, во вторичную обмотку которого включена излучающая поверхность 11. Питание и синхронизация всей схемы осуществляется от блока питания 22. Для ускорения процесса остывания излучающей поверхности при больших перепадах температур, задаваемых аттенюаторами 25, 4, в схему введен вентилятор 5 с пороговой схемой управления 16, которая включает вентилятор лишь при определенной полярности и амплитуде сигнала рассогласования с синхронного детектора. Для ориентировочного измерения температуры излучающей поверхности имеются контрольные датчики температуры 13 типа ИС-568, позволяющие оценить в модуле диапазона температуру холодного и горячего концов. На рис. 6 схематически показана конструкция основного модуля модульного ряда «Излучатель», в котором в качестве излучающей поверхности используется токопроводящая лента. Обмотку I трансформатора 2 питают от сети 50 Гц, 220 В через тиристорный регулятор, работающий по сигналам датчиков температуры 3. Токовая шина 5 и лента нагревателя 4 образуют замкнутый виток, в котором токи достигают сотен ампер.

Излучатели с ленточным нагревателем имеют минимальную нагреваемую массу, и, следовательно, малое время выхода на режим

tВ, позволяющее строить нестационарные излучатели. Для сравнения параметров многочисленных конструкций излучателей предложен коэффициент эффективности

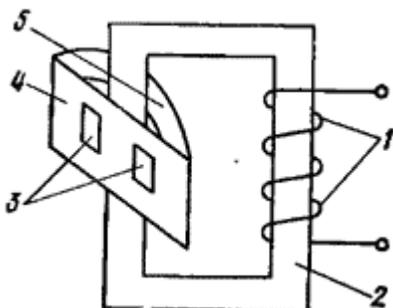


Рис. 6. Основной модуль модульного ряда «Излучатель»

$$k_{\text{ЭИ}} = \sigma T_{\text{д}} / (\gamma t_{\text{в}}),$$

где σ — площадь, излучающей поверхности; $T_{\text{д}}$ — диапазон воспроизводимых температур; γ — относительная погрешность воспроизведении температуры.

Покрывание для пленарных излучателей должно иметь хорошую теплопроводность В противном случае поток воздуха за счет конвекции вдоль излучающей поверхности приводит к неравномерности энергетической яркости. Температура верхней части излучателя оказывается выше нижней. Так для покрытия АК-243 на меди перепад может достигать 0,1...0,3 С на уровне 35 °С в зависимости от толщины покрытия. С ростом температуры излучателя растет и неизотермичность.

33.3. Применение тепловизоров

Измерение температурных полей

После создания первых тепловизоров длительное время считалось достаточным качественное наблюдение теплоизлучающих объектов. Затем появилась необходимость количественного измерения температуры объектов по получаемым термограммам. В настоящее время применение тепловизоров для дистанционного измерения температурных полей является одним из важных приложений

тепловидения, используемых при неразрушающем контроле различных объектов.

Измерить истинную температуру нагретого тела с помощью тепловизора сложно. Практически измеряются не истинную (T), а так называемую радиационную (T_r) температуру — температуру абсолютно черного тела, при которой его энергетическая светимость M_e равна энергетической светимости нечерного излучателя с коэффициентом теплового излучения ϵ (T).

Такой способ измерения радиационной температуры применяют в тех случаях, когда в тепловизоре используется неселективный ПИ (например пирикон

Величина T_r зависит от коэффициента теплового излучения, знание которого и его зависимость от температуры необходимы для правильной интерпретации результатов измерений и количественной оценки температуры тела.

Влияние отраженного объектом излучения окружающей среды на определяемую температуру учитывают, вводя эквивалентный коэффициент теплового излучения.

Другой способ измерения температуры основан на определении энергетической светимости тела в ограниченном спектральном диапазоне. Он применяется тогда, когда в тепловизоре используется селективный ПИ. Если спектральный диапазон чувствительности приемника достаточно узкий, то воспринимаемое тепловизором инфракрасное излучение объекта можно считать монохроматическим с длиной волны. При этой длине волны измеренная температура объекта будет равна температуре черного тела, имеющего такую же энергетическую яркость, что и объект. Эту температуру называют яркостной.

Таким образом, при обоих способах тепловизионного измерения температуры нагретого объекта не устраняется влияние коэффициента теплового излучения. Расчеты показывают, что если поверхность объекта имеет, например, температуру 300 К и коэффициент теплового излучения $\epsilon = 0,5$, то при отклонении коэффициента ϵ на величину $\Delta\epsilon = 0,01$ ($\Delta\epsilon/\epsilon = 2\%$) выходной сигнал тепловизора будет соответствовать температуре, отличающейся от 300 К на 0,6 К. С ростом коэффициента теплового излучения погрешность ΔT измерения температуры уменьшается, но превышает разрешающую способность по температуре современных тепловизоров.

Тепловизионные измерения температуры нагретых объектов проводят двумя способами: дифференциальным и непосредственным. В одних

случаях важно знать непосредственное значение радиационной или яркостной температуры, в других требуется определить лишь перепады этих температур по поверхности объекта.

С учетом конструктивной сложности дифференциальные измерения аппаратуры выполняются проще, так как не требуется стабильность уровня видеосигнала вследствие дрейфа нуля усилительного тракта, влияния низкочастотного шума приемника излучения и т. п. Пример дифференциальных измерений — определение тепловизором уровня жидкости в железнодорожных цистернах по линии перепада температуры на их поверхности.

При дифференциальных измерениях местоположение уровня отсчета видеосигнала на шкале температур не определено и его измеряют как разность между двумя величинами. Точки или зоны выборки видеосигнала на термограмме определяют в зависимости от конкретных задач. При этом одну из точек или зону принимают за опорную и по отношению к ней оценивают перепады температур. Дифференциальные измерения делятся на сравниваемые с нормой или с эталонным термопортретом, выполняемые визуально или с помощью ЭВМ. Сравнение с нормой представляет собственно допусковой тепловой контроль, а сравнение с термопортретом — задачу по обработке изображений. В первом случае сравнивают двумерное изображение с заданной константой, во втором — два двумерных изображения.

При измерениях различают цифровые (дискретные) и числовые термограммы. Цифровые термограммы получают квантованием аналогового видеосигнала в цифровых тепловизорах или с помощью соответствующих преобразователей. При работе тепловизора с ЭВМ числовая термограмма получается, например, в виде массива цифр, адекватного объекту на ленте цифрорепечатающего устройства или образа термограммы, записанной на магнитную ленту или перфоленту. Непосредственные измерения проводят при контроле температурных режимов элементов радиоэлектронной аппаратуры, узлов авиационных двигателей и т. д. Такие измерения делятся на прямые и выполняемые путем сличения. При прямых измерениях уровень отсчета температур формируется за счет опорного сигнала, образуемого в самом тепловизоре. При измерениях путем сличения точка отсчета формируется за счет опорного сигнала вне тепловизора.

Измерения сличением широко применяли в первых моделях тепловизоров и иногда применяют в современных моделях, где уже преобладают прямые измерения. Сущность измерения сличением заключается в том, что рядом с объектом в поле зрения тепловизора помещают эталонный инфракрасный излучатель с известной

температурой. Совместно термографируя объект и излучатель по величине сигналов от них судят о распределении температур по поверхности объекта. Оценка величины сигнала в одном из трех режимов — радиометрическом, сканирования строки или кадра — ведется непосредственно по яркости или цвету термограмм, изотерм различного типа или по индикаторам (стрелочный прибор, осциллограф, цифровой измеритель сигнала генератор термопрофилей и т. п.), т. е. отсчет измеряемой температуры ведется по изображению и по индикатору.

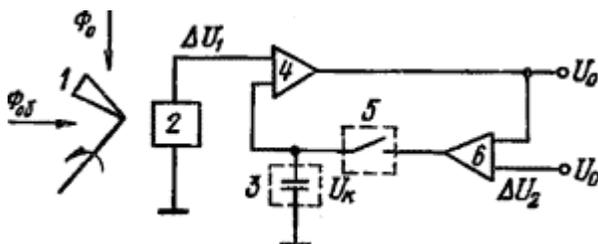


Рис. 7. Схема компенсации дрейфа пилового клина с температурами от видеосигнала 85 до 100° F (29,4...37,7 °C)

Наибольшая точность измерения достигается при равенстве опорного (от эталонного излучателя) и измеряемого (от объекта) сигналов. Для остальных точек динамического диапазона сигнала точность измерения уменьшается. Предварительно тепловизор градуируют в пределах предполагаемой амплитуды сигнала от объекта. Для этого в поле зрения тепловизора помещают АЧТ с температурой T_1 и регистрируют уровень сигнала от него. Далее изменяют температуру АЧТ до T_2 и по регистратору отмечают вторую реперную точку. В пределах AT — T_2 — T_1 считают шкалу индикатора линейной, что достаточно справедливо лишь при небольшой AT , в связи с нелинейной зависимостью энергетической яркости АЧТ от его температуры. Как правило, такая калибровка осуществляется после включения тепловизора и достаточно длительного прогрева элементов его конструкции. Далее калибровку периодически повторяют, так как измерение сличением носит характер лабораторных экспериментов. Для уменьшения погрешности измерения сличением вместо АЧТ используют протяженный ИК излучатель в виде теплового аналогового или дискретного клина. Дискретный десятиэлементный использовался в одном из первых зарубежных тепловизоров фирмы «Варне». Этот клин также необходимо было после 30-минутного прогрева термографировать совместно с объектом и, сравнивая оптическую

плотность участка клина и объекта, оценивать значение температуры. При измерении температуры сличением особых метрологических требований к видеоканалу не предъявляется. При переходе на прямые измерения в новых моделях тепловизоров необходимо было переработать видеоканал, что привело к его превращению в измерительный или информационно-измерительный канал. Основное требование к последнему: стабильность коэффициента передачи (так как он непосредственно определяет точность измерения) а также формирование стабильной или известной точки отсчета уровня видеосигнала. При прямых, измерениях отсчет температуры также проводят по изображению и по индикатору.

При создании измерительного канала наиболее важной задачей является уменьшение дрейфа видеосигнала до величины, соизмеримой с порогом температурной чувствительности тепловизора. Для этого применяют ряд мер. Одной из них является введение в состав тепловизора оптического прерывателя, с помощью которого поток излучения объекта сравнивается с потоком встроенного черного тела. Чем ближе к входу оптического канала вводится поток черного тела, тем выше точность калибровки, так как при этом учитывается излучение элементов оптической системы.

По периодичности ввода потока черного тела различают построчную, надкадровую и покадровую калибровку, для чего используют время обратного, или нерабочего хода при сканировании. С увеличением частоты автокалибровки уменьшается мощность низкочастотного шума ПИ, проникающего в видеосигнал.

Если такое устройство не обеспечивает необходимой точности измерения, применяют электронную схему компенсации дрейфа сигнала, которая позволяет при постоянной температуре черного тела изменять уровень отсчета температуры тепловизором. Схема состоит из прерывателя 1 (рис.7), который периодически подает на приемник излучения 2 потоки $\Phi_{об}$, Φ_0 от объекта и черного тела, ключа 5, предусилителя 4, усилителя 6 сигнала рассогласования и запоминающего конденсатора 3. Прерыватель и ключ работают синхронно, причем когда на ПИ падает поток Φ_0 , ключ замкнут, а когда- поток $\Phi_{об}$ — ключ разомкнут. Поток Φ_0 подается на приемник во время нерабочего хода сканирующего луча; в этом случае выходное напряжение U_c предусилителя равно постоянному (опорному) напряжению U_0 и не зависит от сигнала с ПИ. Обозначая At ,— входное напряжение предусилителя, U_K — напряжение на зажимах конденсатора.

Для уменьшения погрешности измерения температура черного тела должна быть близкой к среднему значению диапазона измеряемых температур. Знак опорного напряжения UB выбирается в зависимости от того, в меньшую или большую сторону относительно температуры черного тела выбирается уровень отсчета.

К измерительным тепловизорам применимы метрологические понятия; и определения, используемые в другой измерительной аппаратуре. Абсолютная погрешность АТ тепловизионных измерений выражается в единицах измеряемой величины и является именованным числом. При градуировке тепловизора по шкале температур обозначается АТС°С; при градуировке по энергетической яркости черного тела АТЯ, Вт/(см² • ср).

Диапазоном регистрируемых температур TR считается перепад температур АЧТ, которому соответствует сигнал, укладываемый в пределы динамического диапазона тепловизора.

За уровень отсчета температур Tu принимается температура АЧТ, сигнал от которого не выходит за пределы динамического диапазона тепловизора при заданном диапазоне регистрируемых температур. Величина J используется как опорная точка в процессе отсчета температур.

Различают диапазон наблюдаемых температур Dr К и диапазон измеряемых температур DT и. За величину DT Н принимают максимальное и минимальное значения температур АЧТ, термографируемых одновременно или разновременно и вызывающих сигнал, соответствующий экстремальным границам динамического диапазона тепловизора. Величиной DT считается максимальное и минимальное значения температур АЧТ, измерение которых тепловизором возможно с точностью, укладываемой в пределы заданной погрешности измерений.

В тепловизионных измерениях применяют также такие параметры, как последовательность устанавливаемых значений уровня отсчета и диапазона измеряемых температур, погрешности измерения температуры окружающей среды и поддержания уровня привязки, время выхода на режим измерений, частоту и время автокалибровки измерительного канала и др. (табл. 2).

2. Основные параметры измерительных тепловизоров отечественного производства

Параметр	«Рубин-1» «Рубин-2»	«Рубин-3*» («Факел»)	«Алмаз»	«Радуга»	«Радуга-га-АТ»	«Радуга-»	ТВ-03
Абсолютная погрешность, °C	—	±0,5	1	1	1	—	—
Относительная погрешность, %	—	—	—	—	—	5	±5
Диапазон регистрируемых температур, °C	25	50	35	35	35	35	80
Уровень отсчета температур, °C	—	0—100	20—200	0—200	0—200	—	—
Диапазон наблюдаемых температур, °C	20—200	20—600	20—200	0—200	0—200	0—20	20—200
Диапазон измеряемых температур, °C	—	10—50	25—50	25—50	25-50	20—80	25-50
Пределы значений уровня отсчета; шаг,	—	0;1; 10	1	1;2; 10	1;2; 10	1	—
Пределы значений диапазона регистри	—	1; 10	—	1; 2;	1; 2;	—	—
				3x10	3x10		

руемых температур, °С	0,3						
Погрешность поддержания уровня привязки, °С	0,1	—	0,2	0,2	0,2	—	
Уровень привязки, °С	35	0	—	35	35	35 30	—
Время выхода на режим измерений, мин	60	10	30	30	30		—
Частота автокалибровки, Гц	—	6	150	25	25	25	200
Время калибровки, мкс	—	10	185	185	185	185	—
Относительная неравномерность сигнала по каналам, %	—	—	- 0,5	0,5	0,5	0,5	—

* t_0 — температура окружающей среды.

Контроль качества сборки статоров электрических машин. В СССР были впервые в мире разработан способ неразрушающего контроля качества сборки активной стали статоров мощных электрических машин (турбогенераторов электростанций) в процессе их изготовления и профилактического ремонта. Этот способ позволяет определить места статора, где нарушена изоляция между листами активной стали. Дефектные участки имеют температуру, отличающуюся на несколько градусов от других участков статора, что обнаруживается специально созданным тепловизором —дефектоскопом «Статор-1».

Поток излучения с внутренней поверхности статора фокусируется объективом на ЧЭ ПИ (селенид свинца с термоэлектрическим

охлаждением). Так как вольтовая чувствительность и порог чувствительности приемника зависят от его температуры и, следовательно, от температуры окружающей среды, питание термоэлектрического холодильника изменяется в зависимости от температуры ЧЭ ПИ. С выхода приемника сигнал поступает на предусилитель $V1$ (рис. 8) с компенсатором дрейфа сигнала (усилитель $V2$, ключ KK запоминающий конденсатор $C1$).

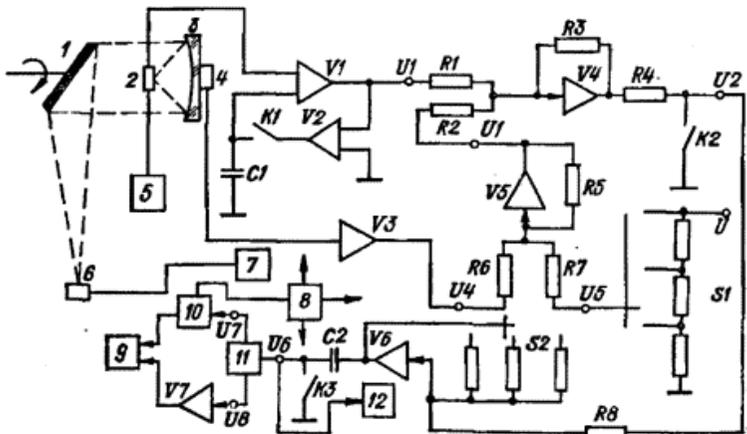


Рис. 8. Функциональная схема измерительного канала тепловизора-дефектоскопа «Статор-1»:

1 — сканирующее зеркало; 2 — приемник излучения; 3 — объектив; 4 — датчик температуры; 5 — стабилизатор температуры приемника; 6 — черное тело; 7 — электронный регулятор; 8 — синхронизатор; 9 — регистрирующее устройство; 10 — преобразователь; 11 — селектор видеосигнала; 12 — электроннолучевой индикатор

В предусилителе усиливается сигнал с ПИ и по командам датчика строчных синхронизирующих импульсов привязывается к уровню сигнала от черного тела. Привязка производится один раз за каждый оборот сканирующего зеркала в тот момент времени, когда на приемник попадает излучение черного тела.

Сигнал с предусилителя $V1$ поступает на формирователь уровня $V4$ с помощью которого формируется оптимальный уровень сигнала, укладываемый в динамический диапазон электронного тракта. Для этого на вход формирователя $V4$ через резистор $R2$ подается постоянное напряжение с сумматора $V5$, к которому приложено напряжение $U6$ с аттенюатора $S1$ и напряжение $U4$ с усилителя датчика

температуры. Значение $t/4$ зависит от температуры внутри оптической головки, что позволяет вводить в рабочий сигнал поправку на изменение собственного излучения элементов конструкции головки. В формирователе уровня ключ К2 привязывает уровень рабочего сигнала к нулю, так как он был сдвинут на величину $U_3 = U_b$.

В основном усилителе V6 диапазон регистрируемых температур регулируется изменением коэффициента усиления с помощью аттенюатора S2. Собственный дрейф усилителя устраняется ключом К3 и конденсатором С2.

После основного усилителя видеосигнал поступает на селектор, разделяющий его на постоянную и переменную составляющие. Переменная составляющая несет информацию о перепадах температуры относительно средней температуры статора, которая пропорциональна постоянной составляющей. Значение последней наносится на термограмму в виде меток, образующих линию. Отклонение этой линии от прямой характеризует изменение средней «оставляющей температуры статора».

Видеосигнал подается на регистрирующее устройство через функциональный усилитель V7, который учитывает нелинейную зависимость оптической плотности электрохимической бумаги типа ЭХБ-4 от тока, проходящего через нее. Для быстрого выбора уровня отчета и диапазона измеряемых температур служит электронно-лучевой индикатор, по которому наблюдают амплитуду видеосигнала и регулируют ее с помощью аттенюаторов S1 и S2.

Количественную оценку температурных полей производят по оптической плотности электрохимической бумаги с учетом показаний декадных аттенюаторов и линии регистрации средней температуры. Температура черного тела поддерживается на уровне $60 \pm 0,2$ °С электронным регулятором. С помощью синхронизатора, кинематически связанного с приводом сканирующего зеркала, ключи К1—К3 замыкаются в моменты времени, когда на приемник попадает излучение от черного тела.

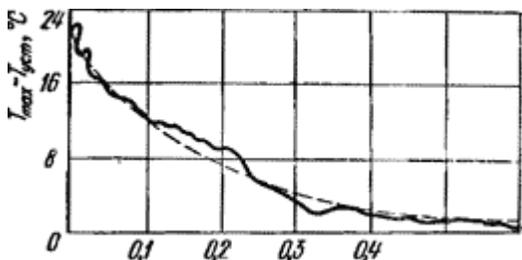
Контроль теплового режима электротехнических устройств (силовых трансформаторов, электродвигателей, разъединителей, высоковольтных линий электропередач и др.) имеет важное значение для их эксплуатации. Применение тепловизионных устройств позволило значительно сократить время, необходимое для контроля, сделать его достоверным, дешевым и безопасным.

Впервые тепловизионный метод контроля теплового режима электротехнических устройств применен шведской фирмой AGEMA. Разработанный для этой цели тепловизор обеспечивает измерение

абсолютной температуры высоковольтных трансформаторов, переключателей и распределительных устройств высокого напряжения, высоковольтных изоляторов. Как показали многократные проверки, повышение температуры объекта на 10 °С должно регистрироваться и учитываться при последующем осмотре; при повышении на 20 °С объект подлежит замене при ближайшем ремонте; при превышении более чем на 30 °С напряжение должно быть отключено, а объект заменен.

Была проведена серия экспериментов с целью определения эффективности применения тепловизионного метода для контроля состояния и профилактического осмотра высоковольтного оборудования. Контролю подвергались контакты и губки разъединителей (110 кВ), элементы конденсаторных батарей (110 кВ), трансформаторы тока (220 кВ), вводы масляных выключателей (110 кВ), подвесная изоляция (110...330 кВ), контакты предохранителей (6 кВ). Эффективность тепловизионного метода контроля видна из примера проверки конденсаторной батареи подстанции «Южная» (мощность батареи 55 МВА, число конденсаторов 2874). При пробое элементов конденсатора перегорают предохранители и ток, проходящий через конденсатор, падает до нуля (рабочий ток 5 А). Поэтому пробитые конденсаторы имеют такую же температуру, как и окружающие его металлические конструкции, а исправные — более высокую, так как через них проходит ток. По заводской инструкции контроль конденсаторов должен проводиться 2 раза в год, что требует примерно 2 чел./мес трудозатрат; тепловизионный контроль позволяет выполнить эту работу в течение одного дня. По подсчетам экономический эффект от внедрения тепловизионного метода для контроля высоковольтного оборудования крупной подстанции составляет около 100 тыс. рублей в год.

Большое значение для повышения надежности электроснабжения имеет заблаговременное обнаружение прогрессирующих перегревов в линиях электропередачи. Контрольные методы, которые применяются в настоящее время для этой цели, трудоемки, связаны с большими материальными затратами и необходимостью частичного отключения оборудования. Этих недостатков лишен тепловизионный метод, который позволяет оценить проводимость контактного соединения по градиенту температуры в области болтового соединения.



0,5 X,М

Рис.9. График изменения температуры вдоль оси шины в зависимости от расстояния до точки с максимальной температурой T_{max}

График зависимости $T_{max} - T_{изм} = f(x)$ изображен на рис. 9 (штрихпунктирная линия); там же показан аналогичный график, построенный на основании контрольных замеров температуры вдоль оси шины с плохим качеством болтового соединения с помощью тепловизора «Рубин-МТ», имеющего выход строчного видеосигнала осциллограф (сплошная линия)

Успешно осуществляется контроль линий электропередачи с вертолета.

Контроль состояния облицовки плавильных печей.

Сталеплавильные печи облицованы изнутри керамическими огнеупорными материалами. По мере эксплуатации печей часть облицовки изнашивается и разъедается расплавленным металлом, что связано с опасностью для обслуживающего персонала; поэтому облицовку через определенный срок приходится заменять. Полная замена облицовки больших сталеплавильных печей очень дорога, так как связана с остановкой производства на 3...4 нед. Наиболее приемлем здесь термографический контроль. Внешняя проверка действующих печей тепловизором может указать на локальные перегревы стальной оболочки, трещины и области обмуровки, где она тоньше нормы. Измерения температуры внешней оболочки, выполненные с помощью тепловизора, могут указать области разрушения обмуровки на рассматриваемом участке. Термограмма позволяет задержать замену обмуровки до тех пор, пока она не станет абсолютно необходимой, т. е. использовать обмуровку в течение максимального возможного времени. Снятая во время работы печи термограмма будет способствовать быстрому обнаружению опасных трещин во время периодического осмотра в охлажденной печи, так как сделать это визуально очень трудно.

Диагностика устройств тягового электроснабжения железных дорог.

С помощью тепловизоров возможна диагностика устройств тягового электроснабжения железных дорог. При этом для массового контроля и выявления неисправностей контактных соединений температурная чувствительность тепловизора должна быть не ниже $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, диапазон измеряемых температур — $20\dots+150\text{ }^{\circ}\text{C}$; поле зрения $20\text{ X }10^{\circ}$, мгновенный угол зрения 10 мрад , время кадра $1/12,5\text{ с}$.

Критерием состояния тарельчатых изоляторов типа ПФ-6А может быть разность температур между их шапкой и тарелкой. У исправного изолятора значения температуры тарелки и шапки не отличаются друг от друга на термограмме, а общая температура изолятора отличается от температуры окружающей среды на $0,2\text{—}0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для выявления дефектных изоляторов с помощью тепловизора его температурная чувствительность должна быть не ниже $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, диапазон измеряемых температур — $20\dots+50\text{ }^{\circ}\text{C}$; поле зрения $3\text{ X }0^{\circ}$, мгновенный угол зрения $5'$.

Наличие хотя бы одного исправного изолятора в гирлянде (в тяговой сети постоянного тока) не позволяет выявить дефектные изоляторы тепловизионным способом, так как через гирлянду не проходит ток утечки.

Тепловизоры применяют также для определения состояния изоляции высоковольтных выводов на тяговых подстанциях энергоучастков. Чувствительность тепловизора при этом должна быть не ниже $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Испытание автопокрышек.

Тепловые процессы, протекающие в автопокрышках, имеют важное значение для их эксплуатации. При заводских испытаниях автомобильных и авиационных покрышек на специальных стендах стремятся выявить влияние на распределение температуры по структуре покрышки таких факторов, как скорость ее вращения, изменение этой скорости, давление воздуха в камере и нагрузка на колесо. Необходимо знать влияние каждого из этих факторов в отдельности и их совместное воздействие. Эти воздействия не одинаковы для разных точек покрышки и зависят от ее конструкции. Однако обычная термограмма показывает только среднюю температуру в каждом концентрическом слое покрышки, в результате чего положение области перегрева не может быть локализовано. Эта задача успешно решается с помощью специального тепловизора,

снабженного дополнительным устройством, получившим название «термостроб». Оно позволяет видеть стробированное (неподвижное) тепловое изображение вращающегося объекта. Применяя тепловизор с термостробом, можно наблюдать тепловое изображение вращающейся крышки во время динамических испытаний и фиксировать участки ее перегрева.

К областям применения тепловизоров в промышленности и науке при исследовании температурных полей относят также следующие:

измерение температурных режимов при изготовлении бумаги, листового проката металла, производстве стекла, резины и пластика, бетонных и железобетонных изделий;

испытание стекол с электрическим подогревом для автомобилей и самолетов;

измерение температуры вращающихся деталей машин, а также металлических деталей и инструментов при обработке на станках;

изучение процессов теплопередачи в моделях, испытываемых в аэродинамических трубах;

исследование распределения температуры в газовой струе авиационных двигателей;

определение температуры поверхности ИСЗ в камерах, моделирующих космические условия полета;

контроль качества защиты атомных реакторов электростанций;

определение положений подземных и скрытых коммуникаций;

контроль уровня и положения теплых или холодных жидкостей в резервуаре;

непрерывный контроль обмуровки вращающихся обжиговых печей в процессе их работы;

определение потерь в зубчатых зацеплениях;

дефектоскопия материалов и отдельных конструкций при проведении статических и динамических испытаний;

определение областей перехода ламинарного режима течения в турбулентный при аэрофизических исследованиях;

дефектоскопия болтовых и заклепочных соединений; неразрушающий контроль неметаллических материалов; исследование внутренней коррозии баков и цистерн; контроль качества сварки тонкостенных конструкций по термограммам сварного шва, на который подается импульс тока;

изучение теплоизоляции труб искусственных катков; исследование тепловых эффектов в клинических и биологических процессах и др.

С развитием тепловизионной техники область применения

тепловизоров для анализа тепловых полей непрерывно расширяется. В России и за рубежом для этого созданы специальные типы приборов. В модели АТП-44 (рис. 10) используется зеркальный объектив со сканирующим плоским зеркалом. Поле зрения 10 X 10е, порог температурной чувствительности 0,2 °С, время сканирования кадра 2,5'с при 250 строках в кадре. В тепловизоре цифровой преобразователь теплового сигнала в телевизионный стандарт выполнен на основе оперативного запоминающего устройства (ОЗУ). Запись и считывание информации производится независимо. На экране ЭЛТ цветного ВКУ возможно получение неизменного сигнала любого выбранного кадра. Предусмотрены изотермы, шкалы температур, соответствующих уровню черного, указатель диапазона температур и строка цифр на 15 знаков 127.

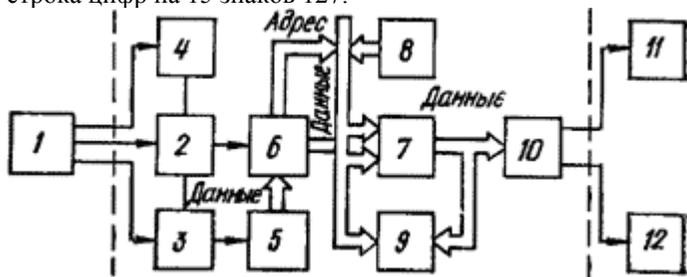


Рис. 10. Структурная схема анализатора тепловых полей АТП-44: 1 — приемная камера; 2—блок синхронизации; 3 —блок предварительной аналоговой обработки; 4 — блок управления сканером, 5 — АЦП; 6 — контроллер ввода; 7 — ОЗУ; 8 — контроллер вывода; 9 — блок формирования вспомогательной информации; 10 — блок формирования ТВ сигнала; 11 — черно-белое ВКУ; 12 — цветное ВКУ

В тепловизоре фирмы «Джеол» (Япония) сканирование также осуществляется плоским зеркалом с частотой от 0,80 до 0,25 Гн, при этом число строк может изменяться от 67 до 200. Порог температурной чувствительности 0,2 °С. В приборе введена линеаризация зависимости коэффициента усиления от температуры, что облегчает анализ термограмм. На экране ЭЛТ, кроме теплового изображения наблюдаемого объекта, слева и снизу индицируется распределение амплитуды сигнала в вертикальном или горизонтальном направлении. В тепловизоре фирмы «Бофорс» (Швеция) вместо колеблющегося зеркала используется шестигранная зеркальная призма, вращающаяся со скоростью 4500 мин-1 и обеспечивающая 110 строк/кадр. Кадровое

сканирование осуществляется плоским зеркалом (рис.11) с частотой 4 Гц. Порог температурной чувствительности тепловизора $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

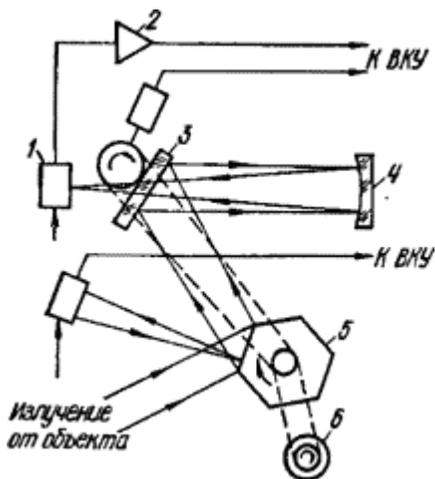


Рис. 11. Оптическая схема тепловизора фирмы «Бофорс» (Швеция): 1 — приемник излучения; 2 — усилитель; 3 — плоское зеркало для кадрового сканирования; 4 — зеркальный объектив; 5 — зеркальная вращающаяся призма; 6 — двигатель

Применение зеркальной призмы привело к устранению паразитных вибраций сканирующего зеркала, возникающих обычно при его колебательном движении. Амплитуда тем больше, чем выше скорость сканирования, что не позволяет увеличивать частоту кадров или строк. В тепловизоре фирмы «Тексас Инструмент» (США) также используется для сканирования зеркальная вращающаяся призма. Малая скорость сканирования ($0,25\text{ Гц}$) позволяет достигнуть низкого порога температурной чувствительности ($0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$); угловое разрешение прибора $0,75\text{ мрад}$ при поле зрения $33\text{ X }33^{\circ}$. Недостатком тепловизоров с одноэлементным ПИ и вращающейся зеркальной призмой является необходимость их установки перед объективом полз зрения. Это ведет к увеличению размеров тепловизора и уменьшению числа его граней. При этом частоту кадров не удастся сделать больше» 5 Гц , что вызывает мелькание изображения на экране ВКУ даже при использовании ЭЛТ с послесвечением.

Неразрушающий контроль изделий электронной техники

Среди различных методов неразрушающего контроля изделий электронной техники (ИЭТ) метод исследования и прогнозирования работоспособности таких изделий по их тепловому излучению начинает занимать все более значительное место.

Современные ИЭТ представляют собой сложные конструкции, содержащие большое количество компактно размещенных элементов, в которых во время работы выделяется и рассеивается тепловая энергия. Теплопроводность, конвекция и излучение являются теми механизмами, посредством которых тепло передается окружающей среде от элементов ИЭТ, нагретых до температуры более высокой, чем температура среды.

Потери через теплопроводность протекают, в основном, в объемах, заполненных твердым веществом. Эти потери зависят от физического контакта между элементами ИЭТ и платой, на которой они смонтированы. Благодаря теплопроводности от элементов отводится 70...80 % тепловой энергии тепло- рассеивающих элементов, плотно смонтированных на подложке.

Потери через конвекцию зависят, главным образом, от потока тепловой энергии, передаваемой окружающей среде в непосредственной близости к излучающему элементу, и определяются разностью их температур. Количество теплоты, удаляемое посредством конвекции, зависит от способа охлаждения элемента и может изменяться в широких пределах от нуля (в вакууме) до 90 % (при принудительном потоке холодного воздуха). В условиях свободной конвекции при нормальном атмосферном давлении отвод теплоты за счет конвекции составляет около 15 % общего количества удаленного тепла.

Потери через излучение происходят вследствие превращения части тепловой энергии в лучистую и подчиняются закону Стефана—Больцмана (определяются четвертой степенью абсолютной температуры излучающего элемента и его коэффициентом теплового излучения). Эти потери составляют около 10% общих тепловых потерь.

В реальных условиях нет четкого разделения между отдельными механизмами теплопередачи в ИЭТ, а существует сложное взаимодействие между ними, в результате чего меняются тепловая модель электронного устройства и температура его отдельных компонентов. Теоретический расчет теплового режима ИЭТ является очень сложным, вследствие чего особое значение приобретает неконтактный способ измерения температуры ИЭТ с помощью тепловизоров, который по сравнению с контактными способами,

например, с помощью термомпар, имеет следующие преимущества: при использовании тепловизоров или сканирующих ИК радиометров получают информацию о температуре гораздо большего количества точек поверхности ИЭТ, чем это возможно при использовании контактных датчиков температуры, и за значительно меньший промежуток времени;

некоторые измерения можно провести в зонах высокого напряжения и для тех элементов ИЭТ, которые не допускают физического контакта, например, изделия микроэлектроники;

использование неконтактных методов позволяет автоматизировать процессы измерений и вывести их результаты на ЭВМ, получая при этом быструю и непрерывную информацию о состоянии контролируемого изделия.

В современных ИЭТ широко используют многослойные печатные платы; некоторые дефекты их производства (сужение дорожек, частичные разрывы, царапины, микротрещины, отслоения проводников, внутренние короткие замыкания и др.) не могут быть выявлены при обычных испытаниях, но хорошо обнаруживаются на термограммах, снятых тепловизором. При использовании последних в крупносерийном производстве предварительно снимают эталонную термограмму с исправной платы или устройства и с ней сравнивают термограммы всех остальных плат, на основании чего принимается решение о их пригодности для последующего монтажа в изготавливаемой аппаратуре.

Перспективен тепловизионный метод дефектоскопии изделий микроэлектроники, так как для этого класса изделий особенно важны температурные характеристики. В то же время интегральные микросхемы (ИС) относятся к наиболее сложным объектам с точки зрения тепловизионного анализа, так как минимальные размеры их элементов доходят до 5...10 мкм, а минимальная разность температур — до 0,05...0,1 °С. Это вызывает необходимость автоматизации процесса телевизионного контроля и разработки эталона тепловизионного сигнала или эталона теплового поля для бездефектной микросхемы.

Построение эталона теплового поля, соответствующего бездефектному состоянию ИС, можно проводить как на основании теоретических расчетов, так и по результатам статистической обработки большого количества изделий с учетом информации от заказчика об их отказах при эксплуатации. Целесообразно также корректировать параметры применяемого эталона по мере накопления экспериментальных данных.

Составлены следующие алгоритмы машинной классификации

объектов по их эталонным тепловизионным сигналам:

алгоритм 1 — определение коэффициента корреляции между исследуемым и эталонным сигналами;

алгоритм 2 — выявление характерных областей теплопортретов;

алгоритм 3 — принятие решения.

В алгоритме 1 рассчитывают статистические характеристики выборочных значений тепловизионных сигналов исследуемых объектов (средние значения и дисперсии по строкам и по кадру и коэффициент взаимной корреляции между входным и эталонным сигналами).

В алгоритме 2 просматривают все значения амплитуд теплопортретов, сравнивают с заранее выбранным порогом (изотермическим уровнем) и выделяют области, амплитуда которых превышает порог.

Алгоритм 3 осуществляет собственно классификацию объектов на основании поступающего на его вход набора признаков, вырабатываемых алгоритмами 1 и 2.

Качество работы алгоритмов машинной классификации объектов по их тепловизионным сигналам проверено на опытной партии однотипных гибридных интегральных микросхем, состоящих из 64 усилительных каскадов. Проверка показала, что алгоритмы обеспечивают более высокое качество классификации, чем оператор.

Для обнаружения скрытых дефектов электронных и интегральных схем тепловизионная контрольная аппаратура должна обладать высоким разрешением по температуре и пространству. Скорость сканирования желательно иметь переменной: малой для объектов с установившимся тепловым режимом и большой для исследования нестационарных тепловых полей. Юстирующие и фокусирующие устройства должны обеспечивать проведение повторяющихся измерений в идентичных условиях.

Этим требованиям удовлетворяет, в частности, микроскоп-тепловизор АГА-680

(Швеция), предназначенный для определения «горячих точек» в интегральных схемах и других элементах микроэлектроники. В микроскопе можно использовать три сменных линзовых объектива (табл. 3).

3. Параметры объективов микроскопа-тепловизора АГА-680

Параметр	Объектив		
	№ 1	№ 2	№ 3
Поле, зрения, мм	6X6	1,6X	0,65X0,65
Увеличение	15x	1,6	125 x 20
Разрешающая способность, мкм	100 36	50 x 30	20
Расстояние от объектива до рабочей поверхности, мм		21	

При использовании объектива с 15-кратным увеличением минимальная разрешающая способность тепловизора по температуре 0,6 С (при температуре объекта 70 °С). Применяя объектив с 125-кратным увеличением, можно зарегистрировать минимальную разность температур 2,5 °С.

Микроскоп-тепловизор фирмы АГЕМА имеет одноэлементный ПИ и оптико-механическую систему сканирования с частотой кадровой развертки 16 с-1 и строчной развертки 1600 с-1.

К основным областям применения тепловизора-микроскопа относят следующие: выявление областей с повышенной температурой в микросхемах; поиск и исследование дефектных соединений и контактов; наблюдение за состоянием образца при его испытаниях с разрушением или без него; проверка соответствия термических характеристик изделия расчетным данным; осмотр проводников, точек пайки или сварки внутри схемы во время ее работы; получение термограмм микросхем; проверка соединений тонкопленочных элементов.

Высоким быстродействием обладает микроскоп-тепловизор фирмы Элматики (ФРГ). Сканирование по строке в этом приборе осуществляется колебаниями плоского зеркала с помощью торсионного механизма. Прибор имеет три объектива с увеличением 15х, 36х, 52х и линейным разрешением 25,10 и 7,5 мкм соответственно. Меньшее быстродействие имеет прибор фирмы «Элтро» (ФРГ), предназначенный для наблюдения объектов в видимом и инфракрасном диапазонах одновременно. Сменные зеркально-линзовые объективы позволяют получить увеличение 15х, 52х и 73х. Частота кадров 1; 0,32 или 0,5 Гц при 100 строках в кадре. В качестве ПИ можно использовать фоторезисторы из InSb или HgCdTe. Тепловое изображение рассматриваемого объекта воспроизводится на экране

ЭЛТ. Предусмотрен просмотр распределения амплитуды вдоль строки. Кадровое поворотное зеркало управляется в этом режиме вручную, а ЭЛТ работает в осциллографическом режиме. Разрешающая способность по температуре не ниже 1 °С.

При использовании тепловизоров для диагностики электронных схем необходимо выполнять следующие условия: данные проверки идентичных узлов можно сопоставлять только в том случае, если геометрическая конфигурация узлов совершенно одинакова, температура Окружающего воздуха постоянна, а способ крепления исследуемых объектов неизменен. Если коэффициент теплового излучения материала постоянный, его знать не обязательно. Это условие выполняется для изделий, изготовленных по единому технологическому процессу.

Геометрическая конфигурация термограмм от одного исследуемого узла электронной схемы к другому сохраняется неизменной, так как расположение компонентов фиксировано печатной платой. Горячие компоненты, в которых рассеивается большое количество тепла, проявляются на термограммах в виде выбросов (пиков) и легко обнаруживаются.

В последнее время в связи с бурным развитием микроэлектроники появились новые методы и средства неразрушающего контроля и прогнозирования надежности ИЭТ. Один из этих методов основан на использовании тепловизора-микроскопа с видиконом, чувствительными инфракрасному излучению. Он позволяет наблюдать электролюминесцентное (рекомбинационное) излучение из р- и я-областей структуры, прилегающих к р-я-переходам транзисторов. Метод дает возможность контролировать оптимальные компоновки структур, погрешности совмещения при фотолитографии и другие дефекты технологии и производства ИЭТ.

Снятие тепловых карт местности

Использование тепловизоров для снятия тепловых карт местности основано на дистанционном измерении температуры земной поверхности с самолета или с ИСЗ. Получаемые тепловые карты несут информацию об энергетическом состоянии исследуемых участков поверхности Земли, что используется для решения различных научных и практических задач.

Тепловые карты позволяют судить о геологическом строении и полях активности кратеров, способствуют поискам и регистрации тепловых источников, гейзеров, мест подземных утечек в энергосистемах, тепломагистралях, дренажных устройствах, позволяет своевременно

обнаруживать очаги за- рождающихся пожаров и определять границы крупных пожаров сквозь пелену сплошного дыма, а также границы пожаров горючих ископаемых по скрытым очагам в штабелях угля, сланцев, шахтных отвалов и т. д.

Большое внимание в нашей стране и за рубежом уделяется использованию самолетных тепловизоров при борьбе с лесными пожарами. При этом выделяют три основные задачи: обнаружение малых (площадью не менее 0,5 м²) очагов зарождающихся пожаров с температурой 600...700°С; картирование контуров охваченного огнем значительного участка леса или торфяного болота сквозь сплошную пелену дыма, когда визуальные методы неэффективны; контроль за затухшим или затухающим пожаром, обнаружение участков кромки, где можно ожидать вторичного возгорания.

Тепловые карты применяют также для изучения океанских течений и течений, обусловленных стоком рек; обнаружения заболеваний лесной и сельскохозяйственной растительности; определения мощности и возраста льдов, прогнозирования образования ледовых трещин; исследования природных ресурсов Земли и т. д.

Тепловые карты существенно отличаются от обычных аэрофотоснимков, так как в формировании последних участвует отраженное излучение, в формировании тепловых карт — отраженное и собственное излучение, а в ряде случаев лишь последнее. Поэтому на тепловых картах обнаруживаются нагретые объекты или участки местности, которые не выявляются на фотоснимках. Особенностью тепловых карт является зависимость динамики тепловых процессов, протекающих в течение суток. В связи с этим тепловые карты, полученные в разное время даже от одних и тех же объектов отличаются друг от друга.

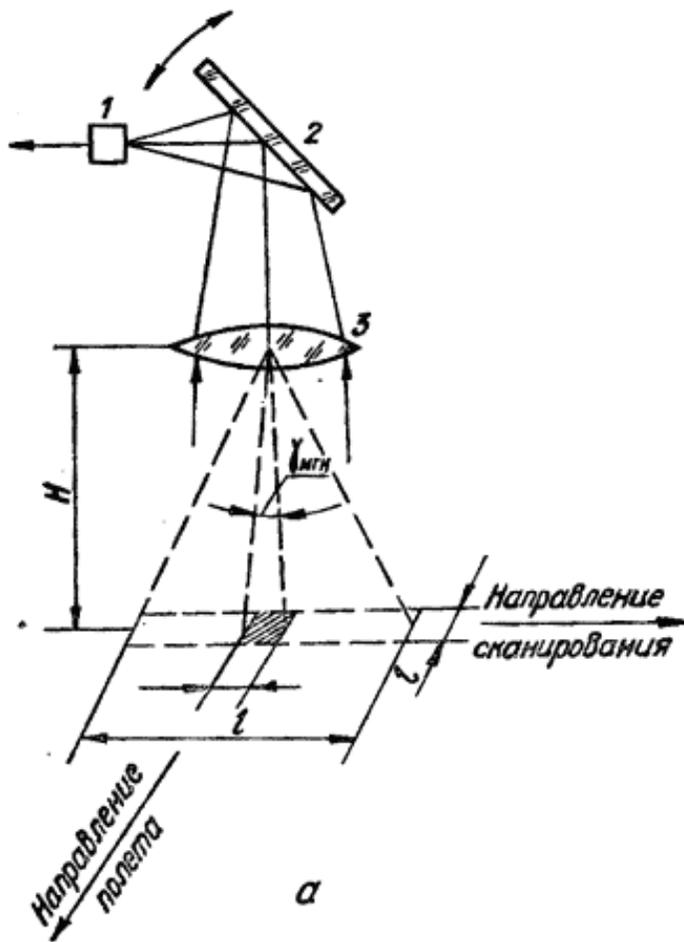
Основные требования, предъявляемые к тепловизионной аппаратуре для снятия тепловых карт местности: рабочий спектральный диапазон должен соответствовать спектральным областям наибольшего пропускания инфракрасного излучения атмосферой и областям максимального излучения исследуемой поверхности; чувствительность и разрешающая способность должны позволять обнаруживать и регистрировать мелкие объекты с малыми температурными контрастами; угол обзора должен быть достаточно большим, но при этом ухудшение разрешающей способности на краю поля обзора не должно превышать допустимые значения.

Тепловизоры, предназначенные для снятия тепловой карты местности и устанавливаемые на летательных аппаратах, выполняют сканирование мгновенного угла зрения только в плоскости, перпендикулярной направлению полета, обеспечивая просмотр по

строке. Просмотр по кадру осуществляется за счет прямолинейного движения носителя аппаратуры. Обычно в таких тепловизорах применяют систему с оптико-механическим сканированием, реже — системы с электронным сканированием и самосканированием (на основе приборов с зарядовой связью, чувствительных в ИК области спектра).

Наиболее простая тепловизионная система для снятия тепловой карты местности содержит одноэлементный приемник излучения 1 (рис.12,а) и плоское качающееся зеркало 2, расположенное в сходящемся пучке лучей за объективом 3. Ширина строки l , просматриваемой за один период качания зеркала $T = \text{бп}/\text{об}$, где бп — линейный размер чувствительной площадки ПИ в направлении полета летательного аппарата; H — высота полета; $f_{\text{об}}$ — фокусное расстояние объектива. Период сканирования строки $T_c = 1/V$, где V — скорость полета летательного аппарата. Число элементов разложения вдоль строки $N_c = \text{об} \cdot 3 / \sqrt{H} \cdot \text{рл}$.

В оптико-механических сканирующих устройствах тепловизионных систем, предназначенных для снятия тепловой карты местности, используются также многогранные призмы и многогранные усеченные пирамиды.



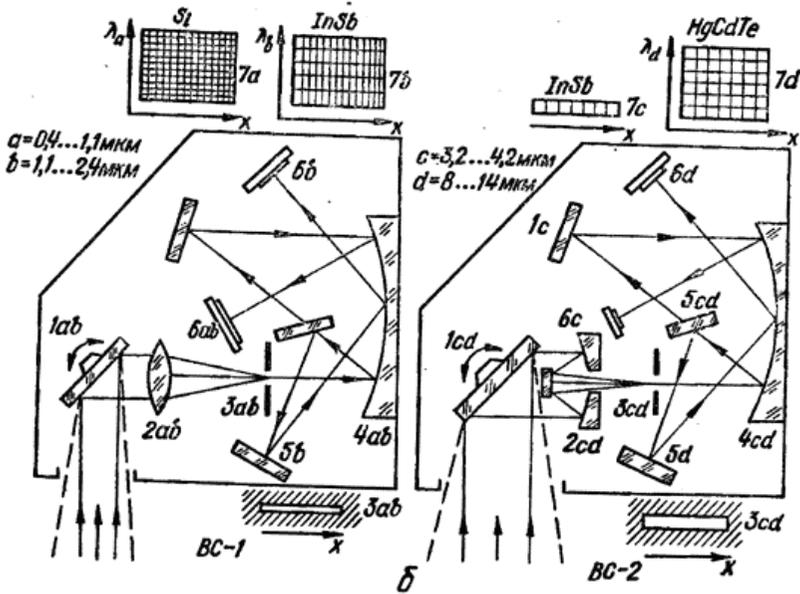


Рис.4.12. Схема тепловизионной системы с одноэлементным (а) и с матричным приемниками излучения (б)

Несмотря на некоторые достоинства тепловизионных систем с одним ПИ (простота конструкции, малые размеры приемника, упрощающие его систему охлаждения) они заменяются системами с многоэлементным (линейным) приемником. За период сканирования просматривается одновременно n строк, где n — число ЧЭ ПИ. Выходные сигналы чувствительных элементов можно обрабатывать параллельно в n каналах и последовательно, сведя все сигналы в единый канал. Последовательная обработка сигналов может быть реализована высокоскоростной коммутацией или мультиплексированием с помощью приборов с зарядовой связью.

В Институте космических исследований АН СССР была разработана схема тепловизионной аппаратуры с матричным приемником излучения. Аппаратура состоит из двух каналов ab и cd (рис. 12,б) с поддиапазонами c , b $0,4 \dots 2,4$ и c , d $3,2 \dots 14$ мкм. Каждый канал состоит из колеблющегося зеркала /, объективов 2 и 4, щелевых диафрагм 3, дифракционных решеток 5 и матричных приемников излучения 6.

Изображение, вырезаемое целью Z , разлагается в спектр. Полученный кадр считывается матричным ПИ. Каждая строка кадра соответствует изображению узкой полосы сканируемой поверхности в определенной области спектра.

Колебания самолета относительно его центра масс вызывают искажения геометрических контуров при снятии тепловой карты местности и ухудшают разрешающую способность тепловизора. Колебания по углу тангажа и приводят к периодическому сгущению и разрежению строк сканирования (рис.13, а), по углу крена y — к смещению во времени строк параллельно самим себе по синусоидальному закону (рис.13,б), а по углу рысканья $-z$ — к веерообразному периодическому развороту строк (рис. 5.7, в).

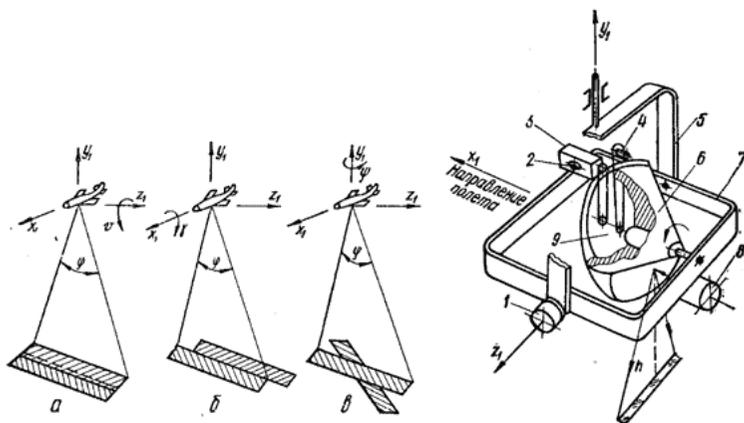


Рис. 13. Влияние колебаний самолета на искажения геометрических контуров при линейно-строчном обзоре местности

Рис.4.14. Схема самолетного тепловизора с гироскопической стабилизацией

На краях полосы просмотра разрешающая способность ухудшается до-, полностью из-за рысканья самолета.

В табл. приведены значения разрешающей способности для тепловизоров (тепловизоров) с одноэлементным ($p = 1$) и многоэлементными ($y = 10$) линейными ПИ для двух типов самолетов; ширина полосы просмотра принята равной 60° .

Устранение влияния колебаний самолета относительно его центра масс на искажение геометрических контуров при снятии тепловой карты местности и ухудшение разрешающей способности тепловизоров достигается гироскопической стабилизацией (рис.14). В кардановом

подвесе с внешней 5 и внутренней 7 рамками размещается трехгранная зеркальная пирамида 6, приводимая во вращение двигателем 9.

Пирамида выполняет функции сканирующего устройства и ротора трехстепенного гироскопа. Коррекция гироскопа по курсу производится датчиком момента 1 от самолетного гирокомпаса; коррекция по тангажу — датчиком момента, расположенным на вертикальной оси (на рисунке не показан), который обрабатывает сигнал тангажа, выдаваемый датчиком 2 встроенной гировертикали 3. В схему тепловизора входят также магнитная головка 4 синхронизации развертки визирного луча с разверткой электронного луча ВКУ и приемник излучения 8. Головка связана с выходной осью по углу крена встроенной гировертикали передачей 1:1. Таким образом, поле обзора тепловизора стабилизировано по всем трем осям x и y и z .

Рассмотренные системы с линейно-строчным обзором местности обладают следующими недостатками: зависимость потребной частоты вращения зеркального барабана от скорости полета носителя при заданном коэффициенте перекрытия строк; необходимость вращения с большой частотой крупноразмерных оптических элементов; различная амплитуда сигналов от одинаковых объектов, расположенных в разных местах зоны обзора (вследствие того, что излучающие объекты находятся на разных расстояниях от носителя в пределах угла обзора); нелинейная форма строки (рис. 15).

Этих недостатков во многом лишена система с коническим обзором (см. рис.6), в которой мгновенный угол зрения вращается относительно оси сканирования, совмещаемой с вертикалью. При этом размер площадки земной поверхности, проектируемый в каждый момент времени на ЧЭ_ПИ, остается неизменным.

Для уменьшения отражений от неба и облаков составляющей инфракрасного излучения угол визирования α выбирается близким к углу Брюстера (60°). За счет полета самолета круговая траектория сканирования превращается в трохоиальную. Шаг трохойды определяет расстояние между ее витками, равное при любом угле сканирования расстоянию; которое пролетает самолет за один цикл сканирования.

В системах сканирования с разверткой визирного луча по образующей конуса сканирование земной поверхности без пропусков и наложения строк получается при соотношении размеров чувствительной площадки ПИ, равном 1 : 3; применение мозаичного ПИ с числом ЧЭ 6 X 2 приводит к небольшому выигрышу в чувствительности за счет снижения скорости сканирования в 6 раз и накопления сигнала на двух площадках, последовательно просматривающих элементы тепловой карты местности;

сканирование визирного луча по образующей конуса позволяет получать квазипараллельное движение проекции ЧЭ приемника на местности. Траектории просмотра земной поверхности каждой точкой не пересекаются между собой;

при использовании однозеркального сканера мозаичный ПИ не применяют, так как невозможна ориентация проекции его ЧЭ вдоль направления полета ЛА.

В схеме одного из тепловизоров для картографирования и обзора местности с самолета, в качестве сканирующего устройства используется вращающаяся зеркальная пирамида, которая перемещает мгновенный угол зрения в плоскости, перпендикулярной направлению полета ЛА. Поток излучения участка земной поверхности попадает в объектив и фокусируется на ЧЭ приемника излучения. Электрический сигнал с выхода ПИ, пропорциональный принятому потоку излучения, усиливается и подается на модулирующий электрод электронно-лучевой трубки. Развертка вдоль горизонтальных строк производится синхронно с вращением призмы, а перемещение строк по кадру происходит в соответствии с высотой и скоростью полета ЛА. В результате на экране трубки воспроизводится тепловое изображение участка местности.

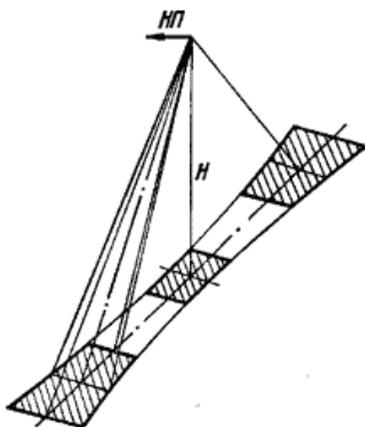


Рис. 15. Форма строки при сканировании многогранной зеркальной призмой

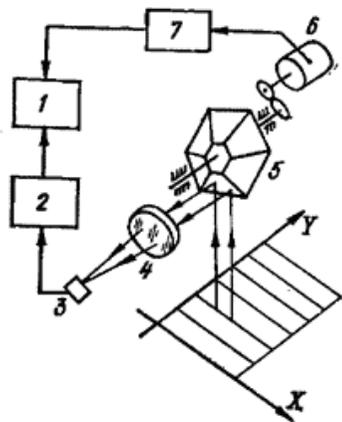


Рис. 16. Функциональная схема тепловизора для картографирования и обзора местности с самолета:

1 — кинескоп; 2 — усилитель фототока; 3 — приемник излучения; 4 — объектив; 5 — вращающаяся зеркальная пирамида; 6 — двигатель вращения пирамиды; 7 — синхронизирующее устройство

Эффективность аппаратуры для аэросъемки при решении конкретных задач зависит от правильного выбора порога температурной чувствительности АТ и разрешающей способности прибора. Практика применения тепловизионной аппаратуры для изучения природных ресурсов показывает, что удовлетворительные результаты получают при $АТ = 0,3...0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ на фоне $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $\gamma = 5...7'$ ($1,5...2$ мрад).

Рекомендуется в тепловизорах для изучения природных ресурсов с воздуха иметь два канала — один, с высоким пространственным разрешением ($5...7'$), другой с низким ($50...70'$). В полете нет необходимости производить непрерывную одновременную регистрацию по обоим каналам. В необходимых случаях оператор использует тот или иной канал простым переключением на фоторегистрирующее устройство.

Тепловизионную аппаратуру широко применяют в авиации для обзора местности перед самолетом, обнаружения низкотемпературных излучающих объектов, при посадке летательных аппаратов в условиях пониженной видимости, для картографирования местности и т. д.

Конструктивные особенности такой аппаратуры можно проиллюстрировать на примере установки ААД-4 фирмы «Тексас инструмент» (США), предназначенной для обнаружения с вертолета теплоизлучающих наземных целей. Сканирующее устройство, ПИ и электронная аппаратура смонтированы на кардановом подвесе внутри вертолета. Ось визирования наводится на цель, изображение местности индицируется на ЭЛТ с диагональю экрана 36 см.

Приемник инфракрасного излучения выполнен на основе германия с примесью ртути и представляет собой мозаику с 400 ЧЭ, охлаждаемыми до температуры $24...28 \text{ K}$. Поле зрения прибора в режиме поиска $23 \times 30^\circ$, в режиме слежения $5,75 \times 7,5^\circ$. Сканирование по азимуту осуществляется в пределах 360° , а по углу места — в пределах $90^\circ (+20...-70^\circ)$. Порог температурной чувствительности составляет $0,14 \text{ } ^\circ\text{C}$ в режиме поиска цели и $0,28 \text{ } ^\circ\text{C}$ — в режим слежения. Частота кадров 30 кадр./с. Масса всей установки, включая карданный подвес (60 кг), электронный блок (60 кг) и блок питания (50 кг), составляет примерно 290 кг. Для интерпретации результатов информации, полученной с помощью тепловизионной системы, наблюдатель должен обладать большим опытом, так как даже в изображении известных объектов в ряде случаев обнаруживаются непонятные детали.

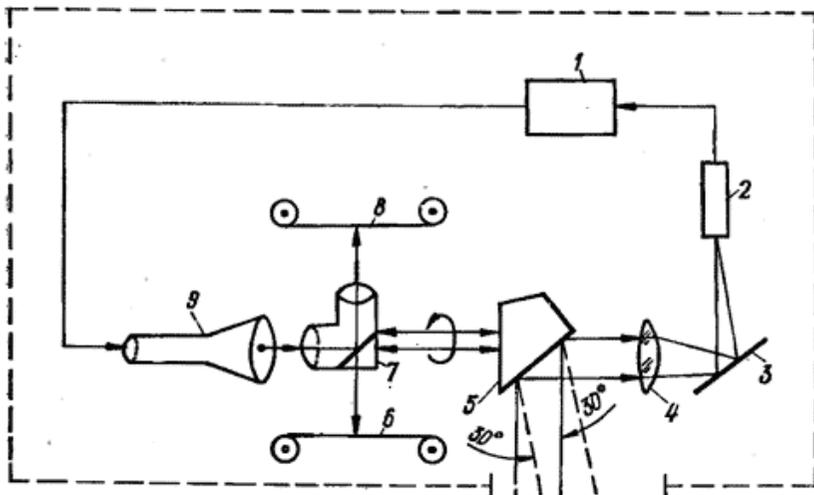


Рис. 17. Схема тепловизора для получения тепловых стереопар:
 1 — усилитель фототока; 2 — приемник излучения; 3 — неподвижное зеркало, 4 — объектив; 5 — вращающаяся зеркальная призма; 6, 8 — фотопленка; 7 — вращающийся объектив; 9 — кинескоп

В современных тепловизионных системах, предназначенных для установки на ЛА, используют также ПИ из HgCdTe, работающие при температуре жидкого азота. На основе этих систем фирмой «Дженерал дайнемикс» разработано несколько картографических устройств с линейным сканированием, осуществляющих съемку непосредственно под самолетом.

Хотя туман и влажность атмосферы оказывают неблагоприятное влияние на работу тепловизионных систем, инфракрасное излучение лучше распространяется в такой среде, чем видимый свет в дневных условиях. Например, в случае, когда дальность метеорологической видимости составляла всего 800...1400 м из-за наличия густого тумана с дымом, получено хорошее изображение местности при съемке с больших расстояний.

Во всех рассмотренных тепловизорах для снятия тепловой карты местности предусматривается сканирование последней под ЛА, в связи с чем они не позволяют получить продольную стереопару тепловых карт. В настоящее время разработаны тепловизоры, позволяющие за один проход получить ИК стереопару (рис. 17). В таком тепловизоре зеркальные грани призмы расположены под разными углами,

благодаря чему при вращении ее производится поочередное сканирование в двух плоскостях, расположенных под углом 30° . Оптическая система фокусирует ИК излучение участка земной поверхности на ЧЭ ПИ. Выходной сигнал приемника после усиления подается на модулирующий электрод электронно-лучевой трубки. Световое пятно на

экране трубки с помощью объектива, вращающегося синхронно с призмой, формирует строки изображений поочередно на двух фотопленках. Таким образом, создаются два тепловых изображения одного и того же объекта, снятые под разными углами, что позволяет использовать для распознавания объекта такой параметр, как его высота.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ СТОЛКНОВЕНИИ КОРАБЛЕЙ ПРИ ИХ ДВИЖЕНИЯХ НА ВСТРЕЧНЫХ КУРСАХ

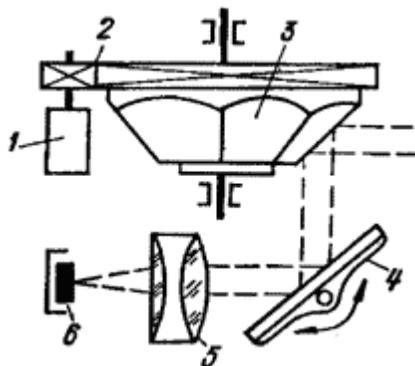


Рис. 18. Схема корабельного тепловизора с гироскопической головкой: — двигатель вращения зеркальной пирамиды; 2 — редуктор; 3 — вращающаяся зеркальная пирамида

В корабельном тепловизоре, предназначенном для навигации в ночных условиях и предупреждения столкновений кораблей при их движении на встречных курсах, узел сканирования выполнен по схеме, не с вертикальной осью вращения зеркальной пирамиды (рис. 18). Головка прибора помещена в карданный подвес и связана электрическими проводами и трубопроводами охлаждения ПИ с корпусом, который устанавливается на корабельной мачте.

Для получения четкого изображения наблюдаемых теплоизлучающих объектов необходима большая частота вращения зеркальной пирамиды. Достаточно большой кинетический момент вращающейся

пирамиды используется в системе гироскопической стабилизации оси визирования тепловизора при качке корабля.

33.4. Перспективы развития телевизионных систем

Основной блок телевизионной аппаратуры — формирователь видеоизображения — содержит вакуумный прибор с накаливаемым катодом и сложной системой управления электронным лучом. Попытка замены электровакуумных телевизионных передающих трубок объединением фоточувствительной матрицы с электронным устройством, обеспечивающим последовательный опрос ЧЭ матриц, делались уже давно, но успеха не имели. Принцип работы и сложная технология не позволяли использовать матрицы с большим числом ЧЭ, сравнимые с телевизионными трубками. Только изобретение приборов с зарядовой связью (ПЗС) позволило объединить фоточувствительную матрицу и процессор и реализовать идею самосканирующего твердотельного телевизионного устройства, аналогичного видикону. При использовании такого устройства на порядок снижаются габаритные размеры и масса формирователя изображения, отпадает необходимость в отклоняющих и фокусирующих системах, источнике высоковольтного напряжения; появляются высокая геометрическая точность изображения, жесткая привязка к координате, безынерционность.

Следует различать фоточувствительные приборы с переносом заряда (ФППЗ) и с зарядовой инжекцией (ФПЗИ)*. Основные принципы работы этих приборов распространены на устройства ИК диапазона спектра электромагнитных волн. В результате появились так называемые тепловизоры с самосканированием, разработка которых в настоящее время ведется весьма интенсивно.

Современный самосканирующий ФППЗ, выполненный на ПЗС, представляет собой кремниевую пластину, на которой содержится несколько сотен тысяч миниатюрных МОП-конденсаторов. На поверхность пластины проецируется с помощью объектива изображение наблюдаемого объекта. Поглощенные фотоны вызывают генерацию электронно-дырочных пар, неосновные носители которых накапливаются в элементах ФППЗ (МОП-конденсаторах). Количество накопленных зарядов пропорционально числу попавших фотонов, т. е. локальной освещенности (облученности). Благодаря этому распределение зарядов в МОП-конденсаторах адекватно

распределению освещенности в оптическом изображении объекта. Изменяя смещения на электродах МОП-конденсаторов, заряды перемещают поочередно к выходу ФППЗ, осуществляя электронное сканирование. Так образуется видеосигнал, который используют для модуляции электронного луча в кинескопе. При наличии синхронизации между движением луча и перемещением зарядов ПЗС на экране кинескопа появляется изображение наблюдаемого объекта. Процесс перемещения зарядов к выходу ФППЗ осуществляется регистром переноса (рис. 1). Каждый элемент регистра образован тремя электродами, соединенными с соответствующими шинами, чем обеспечивается направленный перенос зарядовых пакетов. Предположим, к первой фазе Φ_1 приложен высокий положительный потенциал и под всеми первыми электродами накоплены заряды. Если теперь подать высокий потенциал на вторую фазу Φ_2 , а с первой Φ_1 его снять, то потенциальные ямы под первыми электродами «схлбнутся», а под вторым — образуются. Заряды будут перетекать слева направо, так как на третьей фазе Φ_3 (так же, как и на первой) потенциал низкий.

*Термины согласно ГОСТ 25532—82

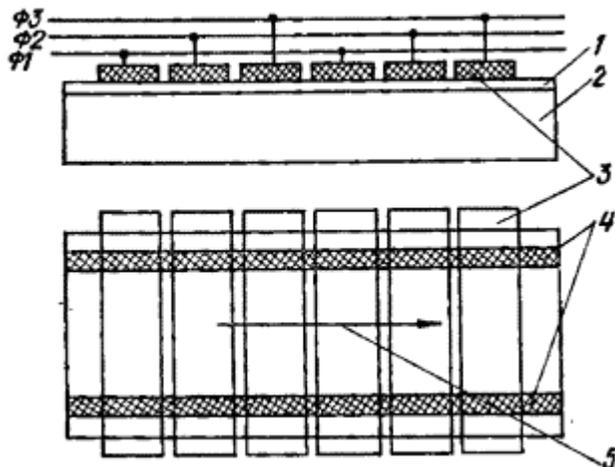


Рис. 1. Трехтактный регистр переноса:
1 — окисел; 2 — кремний («-тип); 3 — электроды; 4 — области стог-диффузии (гс-тип); 5 — канал переноса

После накопления зарядов под электродами второй фазы Ф2 высокий потенциал с нее снимается и подается на третью. Заряды перетекут в пустые ямы справа; налево они двигаться не будут, так как на электродах первой фазы заряд остается низким.

Направленность переноса зарядов обеспечивается также стоп-каналами, которые не позволяют зарядовым пакетам растекаться в стороны и направляют их строго вдоль регистра.

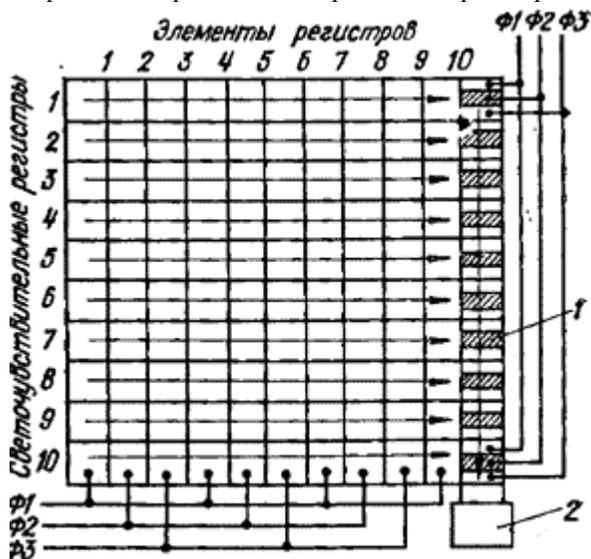


Рис. 2. Матричный ФППЗ (л = τ = 10):
1 — выходной регистр; 2 — выходное устройство

Стоп-каналы представляют собой области, легированные сильнее, чем кремний в самом канале переноса. При приложении к электродам напряжения смещения потенциальные ямы образуются только в канале переноса (чем выше концентрация примеси в кремнии, тем меньше глубина потенциальной ямы). Зарядовые пакеты под электродами сдвигаются (благодаря переключению потенциалов фазы к выходу регистра). Здесь они преобразуются в импульсы напряжения или тока, которые после усиления подаются на видеоконтрольное устройство. Световая инжекция неосновных носителей может происходить не только при попадании в кремний фотонов с энергией, достаточной для переброса носителя через запрещенную зону, но и в результате термогенерации. В кремнии всегда генерируются пары электрон—

дырка и, если существует электрическое поле, то под соответствующими электродами эти пары будут разделяться на основные и неосновные носители. Темп накопления последних определяется температурой, качеством кристалла кремния и свойствами поверхности раздела кремний-диэлектрик. Накопление в потенциальных ямах термогенерированных носителей является паразитным процессом; отношение заряда этих носителей к времени накопления названо тем-новым током.

Для того чтобы сформировать видеосигнал от двумерного изображения, применяют матричный фоточувствительный прибор с переносом заряда (матричный ФППЗ,) содержащий n линейных светочувствительных регистров по m элементов (рис. 2). Каждый светочувствительный регистр соединен с элементом регистра переноса, служащего только для вывода зарядовых пакетов из матрицы. Выходной регистр закрыт непрозрачным экраном. Если изображение наблюдаемого объекта спроецировать на матрицу, в элементах светочувствительных регистров накапливаются зарядовые пакеты, которые переносятся в подготовленные потенциальные ямы регистра переноса (например, под электроды второй фазы). Приняв зарядовые пакеты регистр переноса передвигает их к выходу, пока полностью не очистится затем в регистр переноса перетекут из светочувствительных регистров следующие заряды и цикл переноса их к выходу будет повторяться до тех пор, пока не очистятся все светочувствительные регистры и матрица окажется готовой к новому такту накопления. В действительности, работа матричного ФППЗ гораздо сложнее и более подробно рассмотрена в специальной литературе.

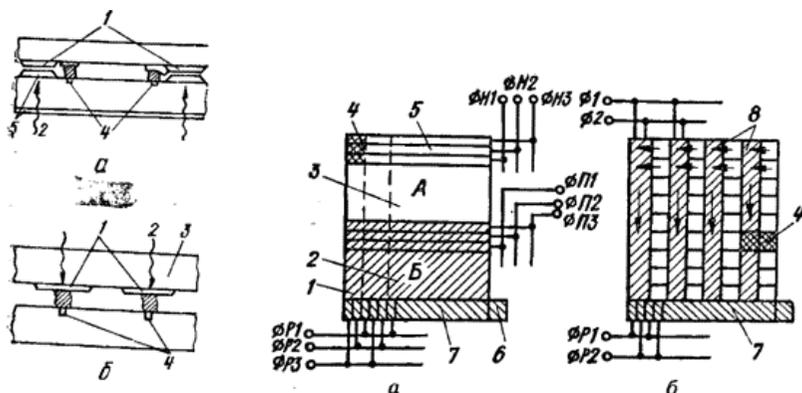


Рис. 3. Схема соединения чувствительных элементов матрицы со

входом ПЗС при прозрачной (а) и непрозрачной (б) для ИК излучения подложке: 1 — чувствительный элемент; 2 — ИК излучение; 3 — прозрачная для ИК излучения подложка; 4 — вход ПЗС; 5 — просветляющее покрытие

Рис. 4. Матричные ФППЗ с переносом кадра (а) и со строчно-кадровым переносом (б):

1 — стоп-каналы; 2 — секция хранения; 3 — приемная секция (накопления); 4 — чувствительный элемент матрицы; 5 — электроды; 6 — выходное устройство; 7 — выходной регистр переноса; 8 — регистры переноса, защищенные от излучения

Инфракрасные матричные ФППЗ подразделяются на два основных класса: гибридной и монокристаллической структуры. В матричных приборах гибридной структуры преобразование оптического сигнала в электрический и последующая обработка последнего происходят раздельно в двух разных частях приемника. В матрице фоточувствительных элементов производится детектирование оптического сигнала, а в кремниевых ПЗС-структурах — обработка выходных сигналов отдельных элементов матрицы. Это позволяет раздельно оптимизировать детектирующие и считывающие структуры. В матрице чувствительных элементов используются узкозонные полупроводники (InSb, Cdx Hg, jTe, PbSnTe, PbS, PbSe и др.), легированный кремний (Si : In, Si : Ga и др.) либо пироэлектрики. Выбор того или иного материала определяется необходимой областью спектральной чувствительности, эксплуатационными требованиями по рабочей температуре, геометрией фоточувствительных элементов и т. п.

Подложки, на которые наносят фоточувствительный материал, могут быть прозрачными и непрозрачными для ИК излучения (рис. 6.3). В случае непрозрачной подложки излучение попадает на фоточувствительные элементы через окна в кремниевом кристалле. Для этого в кремниевой ПЗС-структуре должна быть удалена металлизация из окон, а их поверхности должны быть оптически отполированы и просветлены. Оптические перекрестные помехи, возникающие из-за большого числа отражающих поверхностей, несущественны при тонких слоях фоточувствительного материала. Оптимальная толщина фоточувствительного слоя порядка 10 мкм.

После преобразования в ПЗС сигнала ИК чувствительного элемента в зарядовый пакет работа многоэлементного гибридного приемника ИК излучения ничем не отличается от работы многоэлементных преобразователей видимого излучения и определяется теми же

параметрами и характеристиками.

Характерной особенностью матричных ФППЗ гибридной структуры является наличие секции хранения или памяти, равной по площади приемной секции и используемой следующим образом. В приемной секции А (рис. 4,а) происходит накопление информации (в течение полукадра). По окончании периода накопления зарядовое изображение кадра быстро сдвигается из приемной секции в секцию памяти Б, экранированную от воздействия излучения. (Для уменьшения смазывания изображения при сдвиге время переноса должно быть значительно меньше периода накопления). После этого в приемной секции начинается накопление следующего кадра, а зарядовые пакеты из секции хранения построчно переводятся в выходной регистр переноса и далее — в выходное устройство.

Наряду с матрицами с переносом кадра в область хранения применяют матрицы со строчно-кадровым переносом, в которых область накопления состоит из вертикальных столбцов, между которыми вставлены защищенные от излучения вертикальные регистры переноса (рис. 4,б). Заряды в фоточувствительных элементах накапливаются в течение кадра и затем параллельно переносятся в соседние ячейки регистров переноса. В период накопления зарядов следующего кадра в ЧЭ зарядовые пакеты из регистров переноса переводятся в выходной регистр и далее — в выходное устройство.

Фирмой «Хьюз Эркафт» разработан многоэлементный ПИ в виде линейки 2 x 32 фоторезисторов на основе Cd* HgI для диапазона 8...12 мкм по технологии краевой металлизации. Применение такого приемника в тепловизоре с оптико-механическим сканированием и последовательным съемом информации позволило получить изображение, сравнимое с телевизионным изображением, имеющим 350 X 600 элементов разложения.

В 1979 г. изготовлена матрица 32 X 32 фотовольтаических приемников на основе InSb для тепловизора с самосканированием. Соединение фоточувствительной матрицы с ПЗС регистром осуществлялось с помощью индиевых столбиков с прямой инжекцией фототока в ПЗС. Фирмой «Хонейвелл» создан гибридный приемник с матрицей ЧЭ на основе Cd HgI— *Te и кремниевого ПЗС мультиплексора. Последний состоит из 32 x 32 ячеек размером 100 X 100 мкм. Фотодиоды формируются на поверхности ПЗС мультиплексора с помощью фотолитографии. На входе каждого канала мультиплексора предусмотрены схемы вычитания фонового заряда, защиты от переполнения потенциальной ямы сигналом от интенсивного-точечного источника излучения, а также накопления сигнального заряда за время кадра. В конце каждого кадра накопленный заряд

инжектируется на вход мультиплексора и считывается за время следующего кадра.

Практика показала, что параметры гибридных многоэлементных приемников ИК излучения можно оценивать по параметрам собственной матрицы ПЗС, так как ввод сигнала от ЧЭ вызывает ухудшение отношения сигнал/шум считывающей схемы в пределах 10...20 % [2].

Французская-фирма «Томсон» создала гибридный приемник с фоточувствительными элементами на основе - $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ для диапазона длин волн 8...12 мкм. Фотодиоды с приемной площадкой 100 X 85 мкм формировались, методом жидкофазной эпитаксии на кремниевой подложке с ПЗС структурой. Обнаружительная способность на длине волны 10 мкм и частотах 2 и 10 кГц составляет $2 \cdot 10^{10}$ и $3 \cdot 10^{10}$ см² Вт⁻¹ Гц^{1/2} соответственно [13-1].

Специалистами фирмы «Аэроджет электросистемз» (США) разработан многоэлементный приемник ИК излучения на основе PbS с числом элементов 592 X 64 = 12 888 для диапазона длин волн 2,5...3,5 мкм. Общий размер матрицы 3,65 x 19,05 мм; размеры отдельного фоточувствительного элемента 100 X 100 мкм. При рабочей температуре 156 К получены следующие параметры: средняя по матрице мощность, эквивалентная шуму (NEP), $2,1 \cdot 10^{-14}$ Вт; дисперсия NEP $1,2 \cdot 10^{-14}$ Вт; среднеквадратичная величина шума $2,5 \cdot 10^{-9}$ А; дисперсия шума $1,4 \cdot 10^{-9}$ А; средняя чувствительность $1,2 \cdot 10^5$ А/Вт; дисперсия чувствительности $2,9 \cdot 10^4$ А/Вт; число фоточувствительных элементов с неудовлетворительными параметрами 296 (2,4 %).

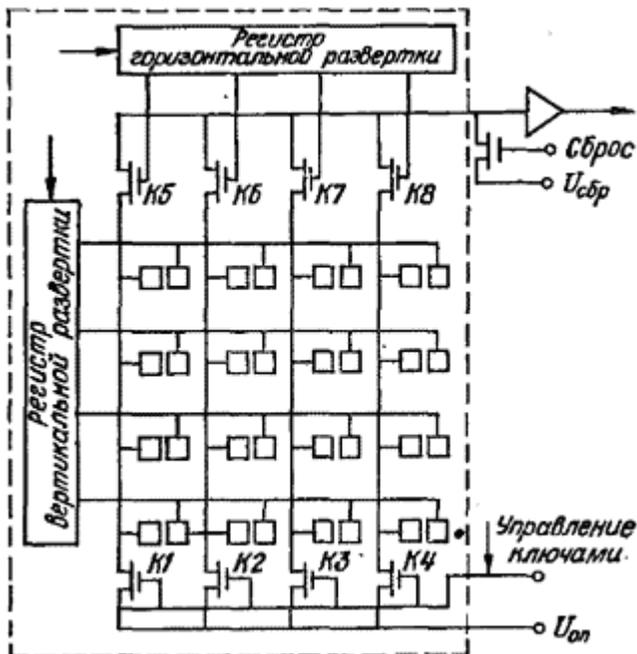


Рис. 5. Матричный ФПЗИ монокристаллической структуры

В фоточувствительных приборах с зарядовой инжекцией (ФПЗИ) монокристаллической структуры перенос заряда происходит лишь между электродами в каждой отдельной их паре без сдвига всех зарядовых пакетов к одному общему выходу. Элемент такого ФПЗИ состоит из двух смежных МОП-конденсаторов, расположенных в непосредственной близости друг от друга (рис. 5). Один из них присоединен к горизонтальной (строчной) шине, а другой — к вертикальной (столбцовой). Шины управляются двумя сдвиговыми регистрами горизонтальной и вертикальной разверток.

Матричный ФПЗИ работает по принципу координатной выборки. За период накопления неосновные носители собираются в ячейках строчных шин, на которые подано напряжение обедняющего смещения U_{CM} . Перед началом считывания столбцовые шины и связанные с ними электроды заряжаются от источника опорного напряжения $U_{оп}$ и отключаются от него ключами $K1$ – $K4$, до начала считывания $U_{CM} > U_{оп}$.

Снимая с помощью регистра вертикальной развертки напряжение U_{CM} со строки, выбранной для считывания, вызывают переход зарядов во

всех ячейках строки под электроды, связанные со столбцовыми шинами. Потенциалы последних изменяются в зависимости от величины перешедших зарядовых пакетов. Эти изменения потенциалов считываются поочередно регистром горизонтальной развертки, который подключает поочередно столбцовые шины к выходному устройству посредством ключей К5...К8.

Для подготовки прибора к следующему аналогичному такту работы одновременно на оба электрода подается нулевое смещение, и неосновные носители инжектируются в подложку.

Возможен также режим неразрушающего считывания, когда пакеты «снова возвращаются в МОП-конденсаторы строчных шин. Это позволяет получить высокую чувствительность прибора при малых освещенностях.

Каждый чувствительный элемент ФПЗИ окружен стоп-канальной областью, благодаря чему подавляется растекание зарядов, и ПЗИ может нормально функционировать при 1000-кратных локальных увеличениях падающего потока излучения [84].

В табл. 1 приведены основные параметры многоэлементных ФПЗИ иностранного производства.

В отличие от ФПЗИ структур, в которых общее число подводящих контактов увеличивается с ростом числа ЧЭ, в ФПЗИ-структурах число подводящих контактов не зависит от числа элементов. Кроме того, в таких приемниках можно обеспечить большую чувствительность, чем в ПЗИ-структурах и осуществить режим накопления сигнала непосредственно в фотоприемной матрице, а не во внешней схеме, как это имеет место в ФПЗИ-структурах.

1. Параметры многоэлементных ФПЗИ

Фирма	Число ЧЭ	Размеры элемента (зазор между элементами), мм	Фотоприемник		
			Материал	Рабочая температура, К	Спектральный диапазон чувствительности, мкм
«Дженерал Электрик»	32 64	0,1 X 0,1 0,025x 0,025	In Sb	77	3... 5
«Тексас Инструмент»	16x2 4 8x8	0,05x0,05 (0,025; 0,015) 0,025X	InSb CdHgTe	77	3 ... 5 3 ... 5

		0,025 (0,025)			
«Дженерал Электрик»	32 64 64 32x3 2	1,3-ю-2* 0,043 x0,056 (0,020; 0.015)	In Sb In Sb	77 67 77 77	3,7 ... 4,8 3,7 ... 4,8 4,85** 4,12**
«Хонейвелл »	8x20 0	-	Cd Hg Te	77	3 ... 5

* Площадь элемента, мм².

** Длина волны, соответствующая максимуму чувствительности.

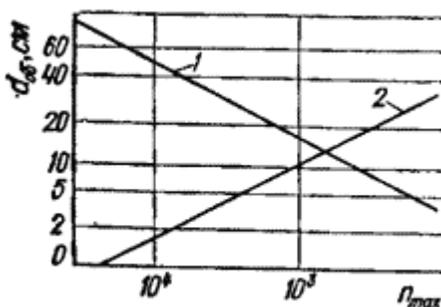


Рис. 6 Зависимость диаметра объектива от максимального числа ЧЭ в матрице

С другой стороны, на минимальное значение диаметра объектива d_{obj}^* существуют ограничения, связанные с числом элементов в матрице и с дифракционными явлениями на входной апертуре.

*См. ГОСТ 26.201—80, ГОСТ 26.204-83, ОСТ 16.0.684.043-78,

Использование монокристаллических структур на узкозонных полупроводниках (InSb или CdHgTe) ограничивается областью 3...5 мкм, так как в инверсных слоях фоточувствительных материалов, для диапазона 8...12 мкм возникают интенсивные туннельные электронные переходы типа валентная зона — зона проводимости, сильно зависящие от ширины запрещенной зоны.

Тепловизионные системы модульного типа

В тепловидении формировался обособленный подход к модульному конструированию с использованием ранее накопленного опыта в радиоэлектронной промышленности.

Собственно тепловизор представляет собой оптическую головку и электронные блоки. Для последних, с точки зрения конструктивного исполнения, целесообразно использовать модули, применяемые в конструкциях КАМАК, «БУК-6», «Еврокард», но они непригодны для построения оптической головки, совмещающей в себе элементы оптики, механики, электроники. С точки зрения структурного построения тепловизоров, для них были созданы узкоспециализированные модульные принципы построения, позволившие в несколько раз сократить стоимость и время на проектирование и изготовление новых моделей. Примером могут служить тепловизоры модульного ряда «Радуга», ежегодно пополняемого новой моделью.

Модули разбиваются на четыре группы: главные, функциональные, контрольно-проверочные. Четвертая группа может быть выделена из трех первых и относится к многорядным или перспективным модулям. Главными называются модули, обеспечивающие работоспособность тепловизора, т. е. регистрацию тепла определенным образом.

Совокупность главных модулей представляет простейший или базовый тепловизор. Исключение любого главного модуля из состава тепловизора приводит к потере его работоспособности. При замене главного модуля на главный модуль другой конструкции меняются и основные характеристики тепловизора.

Функциональными называют модули, обеспечивающие работоспособность тепловизора в соответствии с заданными функциональными характеристиками. Исключение функциональных модулей из состава тепловизора не приводит к потере его работоспособности, а сопровождается потерей части функциональных возможностей. Дополняя базовый тепловизор функциональными модулями, получают новые модели.

Контрольно-проверочными называют модули, входящие в комплект тепловизора и используемые эпизодически при изготовлении или проверке его работоспособности. Примером могут быть ИК излучатели, используемые для проверки измерительного канала тепловизора.

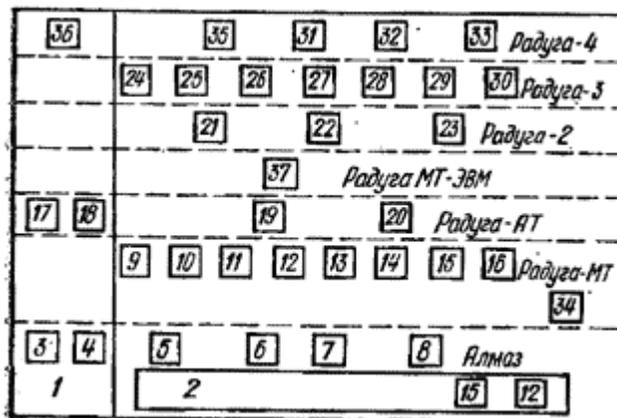


Рис. 7. Набор функциональных модулей для тепловизоров ряда «Радуга»:

- 1 — оптико-механическая головка;
 2 — блок электроники; 5 терморегулятор навесных ИК излучателей; 4 — оптический опорный канал; 5 — штатив; 6 — выносной ИК излучатель; 7 — тележка; 8 - фотоприставка; 9 — комбинированный дисплей; 10 — формирователь термопрофилей; 11 — датчик оптического клина; 12 — генератор знаков; 13 — коммутатор цветов; 14 — Генератор маркера; 15 — точечный измеритель; 16 — цифровой интегратор; 17 — механизм увеличенного заклона; 18 — защитное окно; 19 — расширитель диапазонов; 20 — множитель «параметров термографирования»; 21 — электрохимический регистратор; 22 — черно-белый телевизор; 23 — наращиваемое ЦЗУ; 24 — цветной телевизор; 25 — цифровой автокалибратор; 26 — определитель уровня отсчета; 27 — определитель диапазона; 28 — формировав ель программ ППЗУ; 29 — блок сопряжения с ЭВМ; 30 — блок доступа в память; 31 — электронная лупа; 33 — высокотемпературный ИК излучатель; 33 — одномерный ИК излучатель; 34 — зеркало; 35 — вычислитель истинной температуры; 36 — селективные фильтры; 37 — модуль сопряжения

Многорядными или перспективными называют модули, используемые для построения тепловизоров из другого модульного ряда. К многорядным могут относиться как главные, так и функциональные или контрольно-проверочные модули.

Из данной классификации модулей следует, что модульный ряд представляет собой совокупность различных моделей тепловизоров, имеющих в своем составе единые главные модули, удовлетворяющие основным характеристикам тепловизора при различии их

функционального назначения. Приведенная классификация позволяет более организованно и целенаправленно осуществлять выпуск новых моделей тепловизоров, облегчает проведение функционально-стоимостного анализа и допускает оперативно менять функциональные характеристики конкретных моделей.

На рис. 7 показан набор функциональных модулей для тепловизоров модульного ряда «Радуга», в основе которого лежит базовый тепловизор «Алмаз». В процессе разработки набор модулей для конкретной модели изменялся. Последующая модель получалась из предыдущей путем введения в ее состав новых функциональных модулей при сравнительно неизменном составе главных. В последующей модели могут отсутствовать модули, имеющиеся в предыдущей.

На рис. 8 изображен состав модульных рядов «Радуга», «Пирикон» и «Излучатель» и ряд «Излучатель», состоящий из контрольно-проверочных модулей (инфракрасных излучателей), используемых для калибровки и проверки информационно-измерительных каналов тепловизоров рядов «Радуга» и «Пирикон». Состав модулей ряда «Излучатель» показан на рис. 9, где модуль регулятора — один из главных и используется во всех типах излучателей.

Модули уровня, диапазона, перепада и разрешения предназначены соответственно для контроля уровня отсчета и диапазона регистрируемых температур, порога температурной чувствительности и геометрического разрешения, модули имитатора и фона — для создания модели теплопортретов различных объектов и фонов, на которых они располагаются (например мира со щелями на уровне температурного фона 30 °С), используемая для измерения мгновенного угла зрения).

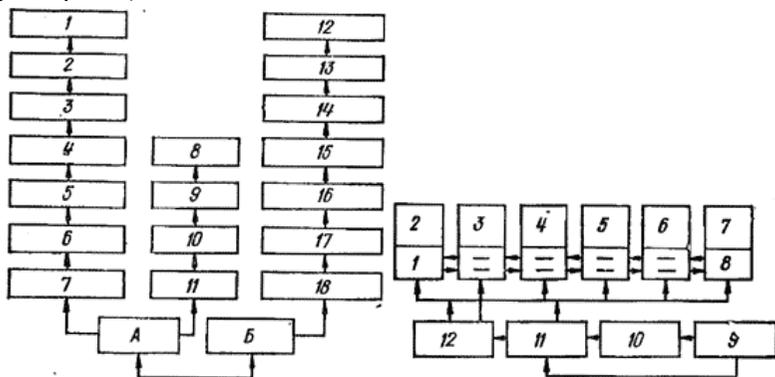


Рис. 8. Состав модульных рядов «Радуга», «Пирикон» и «Излучатель»:

А — перспективные многоярядные модули тепловизоров; Б — контрольно-проверочные модули излучателей: 1 — «Алмаз»; 2— «Радуга-МТ»; 3—«Радуга-АТ»; 4— «Радуга МТ-ЭВМ»; 5 — «Радуга-2»; 6 — «Радуга-3»; 7 — «Радуга-4»; 8— Пирикон-1; 9 — Пирикон-2; 10—Пирикон-3; //— Пирикон-4; 12 — модуль уровня; 13 — модуль диапазона; 14 — модуль медицинский; 15 — модуль перепада; 16 — модуль фона; 17 — модуль разрешения; 18 — модуль высокотемпературный

Рис. 9. Состав и сочетание модулей тепловых излучателей:

1, 8— модули тока; 2 — модуль уровня; 3—модуль диапазона; 4 — модуль перепада; 6 — модуль фона; 6 — модуль разрешения; 7 — модуль имитатора; 9 — модуль стационарный; 10 — модуль задатчика; 11 — модуль регулятора; 12 — модуль охлаждения

Модульные принципы построения стали возможны вследствие развития цифрового тепловидения. В состав цифровых тепловизоров входит цифровое запоминающее устройство (ЦЗУ), позволяющее, в частности, развязать по масштабам времени приемную и воспроизводящую части тепловизора, выполнив последнюю работающей в телевизионном стандарте, и, следовательно, использовать ее для различных моделей тепловизоров.

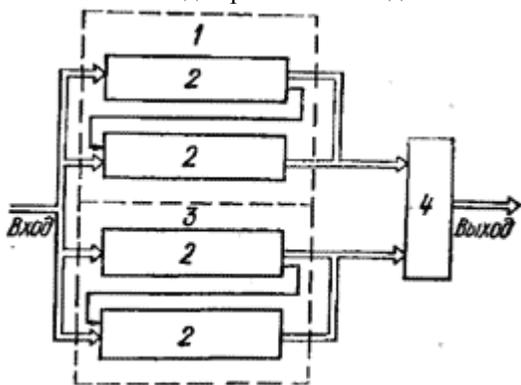


Рис. 10. Модуль цифровой памяти:

1 — накопитель нечетных строк; 2 — плата накопителя; 3 — накопитель четных строк; 4 — плата коммутатора

Для примера на рис. 10 изображена функциональная схема ЦЗУ, выполненного как модуль цифровой памяти в тепловизоре «Радуга-2», обеспечивающий преобразование сложного раstra в стандартный телевизионный. Кроме того, ЦЗУ обеспечивает запоминание, накопление и усреднение кадров сканирования с разложением 168X X

144 точки и выполнено на микросхемах типа К541РУ1А с емкостью 4096 X 1 бит, имеющих произвольную адресацию. Число разновидностей печатных плат сведено к двум — плата накопителя и плата коммутатора. Как показано на рисунке, на основе плат накопителя построены идентичные накопители четных и нечетных строк, которые объединяют по выходам с помощью платы коммутатора. Структура памяти позволяет преобразовывать параллельную информацию, поступающую на вход модуля, в строчную последовательность, удобную для регистрации и отображения.

Это преобразование осуществляется с помощью адресного узла. Объем одной платы накопителя составляет 12 288 X 4 бит. Плата накопителя содержит входной и выходной регистры, сумматор, мультиплексор и собственно элементы памяти, которые сгруппированы в три линейки посредством команд «выбор кристалла». Объем всей памяти ЦЗУ 24 576 X 8 бит. Этот модуль позволяет не только быстро выводить видеосигнал на телевизионный дисплей, но и медленно — на электрохимический регистратор, обеспечивая возможности ЦЗУ по развязке масштабов времени, отличающихся на три порядка.

В тепловизорах ряда «Радуга» используется электрохимический регистратор, выполненный из двух конструктивно объединенных модулей — модуля записи и модуля управления. Регистратор реализует возможность записи термограмм, формируемых из цифрового четырехразрядного видеосигнала. Имеется узел тестового контроля регистратора, выполненный как функционально автономный блок, пригодный для регистрации не только термограмм. Запуск протяжки электрохимического регистратора производится внешним импульсом или оператором. В регистраторе имеются синхронизирующие импульсы для опроса внешних устройств.

Пишущий электрод— замкнутая перемещающаяся лента. Плотность записи 3,3 лин/мм, скорость регистрации 15 лин/с, число различных градаций — 10.

В тепловизорах «Радуга-МТ», «Радуга-АТ» используется функционально законченный модуль — цветной дисплей. Произведена его модернизация для числа наблюдаемых черно-белых градаций до десяти и обеспечения возможности обработки «запомненных» изображений. Возможны два основных варианта отображения информации: 10 цветных и 5 черно-белых градаций, 10 черно-белых и 5 цветных. Наличие двух режимов обеспечивает просмотр одной и той же термограммы как в полутоновом, так и цветном вариантах отображения. Кроме того, возможны дополнительные варианты, например, в виде полутонового черно-белого изображения с

наложенной цветной изотермой или с гашением на изображении отдельных полутонов цветов и др.

Одним из главных модулей является объектив, который в тепловизорах со сканированием потока излучения перед объективом практически невозможно заменить на другой для изменения угла обзора. В тепловизорах, созданных на базе пировидиконов, такая возможность имеется, поэтому разработан параметрический ряд из четырех объективов, в том числе ОБ-699 на базе оптической керамики ZnSe и бескислородных стекол с высоким разрешением, а также ряд асферических объективов из германия с большой светосилой и относительным отверстием до 1...0.7. Асферические объективы практически по всем параметрам превосходят объективы со сферической оптикой, но более сложны в изготовлении.

При разработке тепловизоров на базе пировидиконов используются модульный принцип построения и цифровая форма представления видеосигнала, которые позволяют создавать гибкие унифицированные тепловизионные системы. При построении новых моделей тепловизоров, например АТП-44М, «Радуга-4», «Радуга-3», как правило, используют модульные принципы. Широко применяют модули типа КАМАК. При этом к уже существующим разрабатываются новые, устанавливаемые в едином креплении. Заменяя или дополняя серийные тепловизоры, например, АТП-44М, «Радуга-МТ», ТВ-03 новыми модулями, им придают новые качества.

Примером модульной конструкции является также тепловизор «Термовижн-780» фирмы АGЕМА. Он представляет собой систему широкого назначения, которая основывается на модулях, объединяемых в зависимости от конкретных требований.

Система «Термовижн-780» состоит из шести основных узлов: сканирующего и видеоконтрольного устройства, фотоприставок, аналогового и цифрового блоков, вспомогательных устройств.

Сканирующее устройство выполнено в двух вариантах: одноканальное и двухканальное. Первое может быть укомплектовано приемником InSb или HgCdTe, а второе — одновременно двумя такими приемниками. Охлаждают приемники жидким азотом. Параметры сканирующих устройств: частота строк и кадров 2500 Гц и 25 Гц соответственно; температурный режим — 15...+55 °С; масса одноканального устройства (без объектива) 1,6 кг, двухканального — 3,2. В комплект сканирующего устройства входят пять легко-заменяемых объективов, которые определяют угол зрения и разрешающую способность системы (табл. 2.)

Каждое сканирующее устройство снабжено кассетой для оптических

фильтров, в которую можно устанавливать шесть фильтров для коротковолнового и длинноволнового участков спектра.

2. Параметры объективов сканирующих устройств

Объектив	Угол зрения.	Фокусное стояние, мм	Разрешающая способность, мрад.	Размеры, мм	Масса, кг
1	3,5	191	1 0,5	142 300	2,8
2	7	99	1,1	78 152	0,7
3	12	53	1,9	64 86	0,3
4	20	33	3,4	64 47	0,2
5	40	17	5,8	64 47	0,2

Примечание. В числителе дроби указан диаметр, в знаменателе — длина объектива.

Черно-белое видеоконтрольное устройств обеспечивает размер видеозображения 50 X 50 мм и смонтировано в корпусе, в который можно вставить до четырех различных блоков, позволяющих приспособить систему к конкретным условиям. Этими блоками являются:

селектор зоны измерения (SAS), обеспечивающий определение и идентификацию зон измерения на термоизображении;
термоамплитудный анализатор (TAM), анализирующий амплитуду видеосигнала в пределах желаемой зоны измерений. С помощью этого блока можно измерять максимальный, минимальный и средний уровни сигнала (температуры) в зависимости от выбранного изотермического диапазона;

анализатор температурной зоны (TAR), выявляющий ту часть объекта, которая имеет определенную температуру;

индикатор считываемого сигнала (SRI), служащий для цифрового отсчета выходного сигнала анализатора температурной зоны или термоамплитудного авализатора;

оконечное устройство (IDT), являющееся альтернативным средством

для получения отсчета значений из термоамплитудного анализатора или анализатора температурной зоны. Эти данные автоматически отображаются на экране видеоконтрольного устройства по мере выполнения измерений.

Для аналоговой регистрации и обработки термоизображений возможны следующие комбинации описанных блоков: SAS—TAM—SRI; SAS—TAM—IDT; SAS—TAR—SRI"; SAS—TAR—IDT; SAS—TAM—TAR—SRI; SAS—TAM—TAR—IDT.

В полный комплект тепловизора АГА-780 входит также блок OSCAR для цифровой обработки и записи данных. Этот блок не является независимым и играет роль промежуточного звена между тепловизором и ЭВМ. В состав блока OSCAR входят аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с полупроводниковой памятью, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). Для расширения емкости памяти введена цифровая ленточная система.

В таком составе OSCAR выполняет следующие функции: запоминает любой требуемый кадр и сохраняет его в течение длительного времени на экране ВКУ, запоминает в цифровом виде на ленточном устройстве тепловизионное изображение; служит промежуточным звеном для преобразования тепловизионного изображения в цифровую форму и передачи ее в ЭВМ и обратно.

Вспомогательные устройства модульной системы «Термовижн-780» составляют цветное видеоконтрольное устройство, обеспечивающее количественное измерение температуры объекта к 1.0 выбираемых цветах, две камеры для фотографирования экрана черно-белого видеоконтрольного устройства, камеру для съемки осциллограмм и автоматическую цветную приставку для получения цветных изображений с экрана черно-белого видеоконтрольного устройства, треноги, баллоны для жидкого азота емкостью 0,5 и 10 л, аналоговый и цифровой магнитофоны и пр.

Тепловизоры с ЭВМ

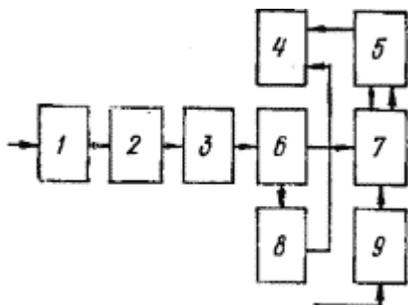


Рис. 11. Структурная схема устройства сопряжения тепловизора «Рубин-2» с ЭВМ

В процессе совершенствования тепловизоров, расширения объема их выпуска и, следовательно, сфер применения в ряде случаев появляется необходимость в обработке тепловизионной информации с помощью ЭВМ. Такая задача возникает в медицине при автоматизированной обработке термограмм, проводимой для предварительной диагностики различных заболеваний, при тепловом неразрушающем контроле, для определения качества различных объектов, нахождения местоположения дефектов, особенно, когда объект подвижен, и в ряде других областей. Обработка термограмм на ЭВМ позволяет также улучшить такие параметры тепловизоров, как порог температурной чувствительности и геометрическое разрешение, осуществлять автокалибровку измерительного канала, устранять геометрический шум ЧЭ многоэлементного приемник, автоматизировать процесс управления тепловизором, в особенности выбор оптимальных значений уровня отсчета и диапазона регистрируемых температур. В настоящее время в тепловидении применение даже малых ЭВМ целесообразно лишь на этапе отработки алгоритмов и программ. Состояние элементной базы позволяет создавать встроенные микропроцессоры для решения определенного круга тепловизионных задач.

Обработка тепловизионной информации на ЭВМ является одним из разделов иконики, под которой понимается научное направление, изучающее общие свойства изображений и определяющее цели и задачи их преобразований, отработки и воспроизведения на основе всех возможных методов и средств. Ниже рассмотрены устройства и методы обработки термограмм с помощью ЭВМ и процессоров. В аналоговых и цифровых термограммах каждый элемент разложения

представляется определенным значением оптической плотности или цветом при геометрическом подобии объекта и его изображения. У числовых термограмм каждый элемент разложения представлен числом на любом носителе информации, например на ленте цифropечатающего устройства, перфоленте, магнитном диске. Числовые термограммы обычно получают в комплексах типа тепловизор— ЭВМ. Одним из первых были созданы комплексы на базе медленно сканирующих тепловизоров, сопряженных с ЭВМ через промежуточный носитель информации — перфоленту, позволяющие производить развязку процессов термографирования и обработки во времени и пространстве. Основным элементом такого комплекса является устройство сопряжения (рис. 11).

Видеосигнал от тепловизора «Рубин-2» поступает на усилитель видеосигнала 1, где усиливается до уровня, необходимого для нормальной работы квантователя уровня 2. Квантователь преобразует входной аналоговый сигнал в переменный код, который поступает на формирователь машинного кода 3, преобразующий его в стандартный машинный параллельный 8-разрядный код, который поступает в блок памяти 6. Время хранения записанной информации регламентируется перфоратором 5 (типа ПЛ-80 или ПЛ-150), т. е. после записи строки информации на перфоленте с перфоратора поступает сигнал нового кода в блок памяти. Так как на перфоленте каждая строка должна содержать нечетное количество пробивок, то для контроля сигнала, записанного в память, в устройство сопряжения введена схема проверки четности 8.

Для того чтобы в момент записи информации в память не произошла смена кода, т. е. не был записан переходный процесс, выраженный числом с четным количеством пробивок в строке, предусмотрена схема проверки четности 8. С выхода схемы снимается импульс, который, пройдя через схему управления памятью 4, запишет информацию, и на перфоленту будет выведена истинная информация. Сигнал с блока 6 поступает на схему управления перфоратором 7, гарантирующую нормальную работу перфоратора 5. В определенные моменты времени на перфоленту выводится служебная информация от схемы формирования 9 по командам оператора или от датчиков тепловизора, указывающих параметры термографирования — уровень отсчета и диапазон регистрируемых температур. В момент записи служебной информации производится блокировка сигналов, поступающих с памяти 6 и служебная информация транзитом через схему управления поступает на перфоратор 5. Вывод информации осуществляется на 8-дорожковую перфоленту, позволяющую на алфавитно-цифровом печатающем устройстве (АЦПУ) получать 128 символов в строке при

неограниченном их числе.

Обработка термограмм на ЭВМ проведена в онкологическом научном центре МЗ, где устройство сопряжения тепловизоров «Рубин-2» и «М-1» (фирмы «Барнес») выполнено в основном из стандартных блоков, таких как аналого-цифровой преобразователь Ф4-207-1, усилитель Ф-301, перфоратор ПЛ-150-Л или накопитель ЕС-9002 на магнитной ленте, где можно поместить 300 числовых термограмм.

После обработки ЭВМ на АЦПУ получают числовую термограмму, состоящую из 36 строк по 44 двухзначных числа, получаемых после усреднения выборок по каждому 10 точкам, т. е. 16 000 элементов разложения аналоговой термограммы превращают в $36 \times 44 = 1584$ чисел. Программа для ЭВМ основана на сравнении симметричных точек термограмм. Для привязки видеосигнала к температурной шкале в поле зрения тепловизора помещают 10-элементный ИК излучатель с линейно-ступенчатым распределением температур в диапазоне 28...38 °С.

Для составления различных алгоритмов и программ с целью машинной обработки термограмм при массовых медицинских исследованиях на базе тепловизора «Рубин-2» и ЭВМ также создан тепловизионный комплекс. Связь осуществляется посредством блока согласования через стандартный интерфейс этой машины. Видеосигнал снимается с нагрузочного регистра ПИ и подается на специально разработанный информационно-измерительный тракт. В оптический канал тепловизора также вводится опорный сигнал от ИК излучателя.

Комплекс имеет универсальный дисплей для оперативного контроля процесса обработки термоинформации, графопостроитель и АЦПУ. Диапазон измеряемых температур 20...40 °С, объем оперативной памяти 64 Кбайт, объем памяти сменного магнитного диска $2,45 \cdot 10^6$ байт, число элементов разложения термограммы 170×140 .

Программное обеспечение состоит из ввода исходной информации и формирования базы данных, процедуры работы с файлами, обработки данных и выдачи результатов. Программа ввода написана на языке Макро-П. Запись на магнитные диски производится на уровне запросов WRITE, READ. Ввод данных ведется в диалоговом режиме. На дисплей выводятся системные сообщения, результаты обработки и инструкция, определяющая действия оператора [9]. Впоследствии ЭВМ была заменена на СМ-4 АРМ. Время ввода кадра в память ЭВМ 1 мин, число отсчетов в кадре — $2,5 \cdot 10^4$.

Имеется комплекс «Рубин-2» и микроЭВМ «Электроника С5-12», где для привязки к шкале температур используют два ИК излучателя, код — шестиразрядный, обеспечивающий шаг квантования $0,1^\circ$, кадр представляется 55 строками по 70 элементов. Тепловизор «Рубин-МТ»

подсоединен к ЭВМ, при этом за строку делается 128 выборок видеосигнала, которые за время обратного хода сканера с буферной памяти считываются в матрицу изображения. Содержимое соседних строк усредняется так, что получается изображение из 128 x 75 элементов при 150 строках сканирования в тепловизоре. Созданы специализированные комплексы для теплового неразрушающего контроля электрорадиоэлементов, где получаемая с 50-элементного приемника информация обрабатывается ЭВМ. ЭВМ может вычислить истинную температуру элементов микросхемы, которую предварительно термографируют после прогрева. Для этих целей выпущена серия микрорадиометров ИКР-3, ИКР-4, ИКР-5 и ИКАР-1, имеющих блок связи с ЭВМ.

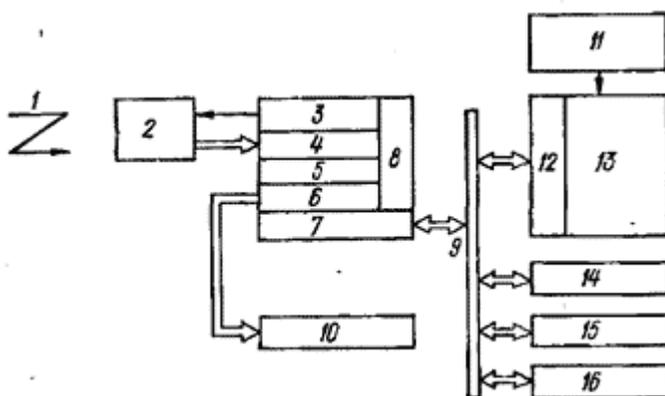


Рис. 12. Структурная схема комплекса «Радуга-ЭВМ»: 1 — ИК излучение; 2 — сканирующее устройство тепловизора; 3 — модуль управления; 4 — модуль ввода; 5 — АЦП; 6 — модуль ТВ; 7 — контроллер; 8 — магистраль; 9 — устройство сопряжения; 10 — телевизор; 11 — программное обеспечение тепловизора; 12 — магистраль; 13 — ЭВМ; 14 — цифропечать; 15 — дисплей; 16 — НМД, НМЛ

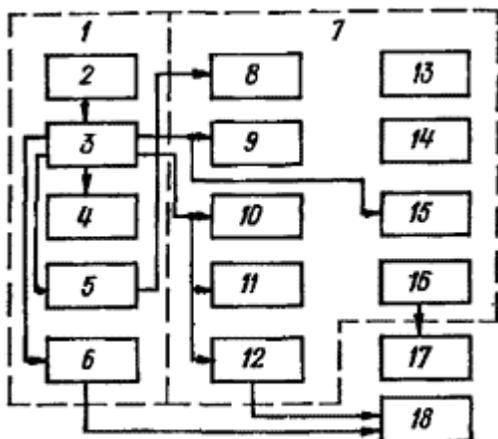


Рис. 13. Структурная схема комплекса «Радуга-3»:

1 — тепловизор «Радуга-МТ»; 2 — оптическая головка; 3 — блок преобразования стандартов разложения; 4 — блок отображения информации; 5 — устройство сопряжения; — крейт-контроллер СМЗ; 7 — крейт контроллер Э 60; 8 — модуль входного регистра; 9—формирователь сигналов ввода-вывода; 10 — модуль привода телевизора; 11 — монитор

В современных системах организована интерактивная обработка тепловизионных изображений, например, с использованием ЭВМ, цифрового ЗУ типа 15ИЗ100 X 100-01 с организацией 3 X 256 X 256 X 8 бит и цветовым кодированием. В комплексе «Радуга—ЭВМ» (рис. 12), представляющем собой промежуточную, опытную модель в развиваемом ряде «Радуга», цифровой видеосигнал получают из аналогового с помощью дополнительного АЦП, подключаемого к выходу оптико-механической головки тепловизора «Алмаз». Особенностью схемы «Радуга—ЭВМ» является применение модульно-магистральной структуры устройства сопряжения, соответствующего требованиям системы КАМАК.

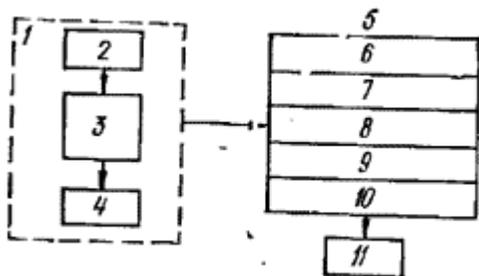


Рис. 14. Структурная схема комплекса «Радуга-4»:

1 — тепловизор «Радуга-2»; 2 — оптическая головка; 3 — блок электроники; 4 — блок электрохимической записи; 5 — черно-белое ВПУ; 6 — формирователь сигналов RGB; 7 — крейт КАМАК; 8 — модуль привода телевизора; 9 — формирователь сигналов ввода; 10 — модуль выходного регистра; 11 — формирователь сигналов ввода; 12 — формирователь сигналов RGB; 13 — крейт-контроллер СМ-3; 14 — крейт-контроллер Э-60; 15 — модуль входного регистра; 16 — модуль управления накопителем; 17 — накопитель; 18 — цветной дисплей

Термограммы для визуального контроля выводят на черно-белый телевизор (с помощью соответствующего модуля сопряжения), на АЦПУ, магнитную ленту или диск. Комплекс работает с ЭВМ. Синхронизация съема данных и их запись в ЭВМ реализуется модулем ввода, позволяющим произвести запись одного стоп-кадра за 1,76 с

120 элементов разложения изображения. При выводе на АЦПУ формат кадра изображения имеет размеры 88 X 100 элементов. Вводя в состав модернизированного тепловизора «Радуга-МТ» устройство сопряжения (УСО), также выполненное в стандарте КАМАК, получен комплекс «Радуга-3» (рис. 13). УСО позволяет при использовании стандартных модулей добиться функциональной гибкости комплекса. Например, при смене крейт-контроллера УСО может работать с различными ЭВМ. В состав УСО, выполненного в виде крейта КАМАК, входят три модуля и два крейт-контроллера: модуль формирователя сигналов ввода-вывода (ФСВВ), модуль входного регистра (МВР), модуль привода черно-белого телевизора (МПТ), крейт-контроллер СМ ЭВМ (ККСМ), крейт-контроллер Э-60 (КК Э-60). Модуль ФСВВ синхронизирует процесс вывода термоизображения из оперативного запоминающего устройства тепловизора на магистраль КАМАК. МВР принимает цифровую информацию и передает ее в ЭВМ. МПТ обеспечивает вывод графической и буквенно-цифровой информации от ЭВМ через

магистраль КАМАК на экран черно-белого телевизора. ККСМ управляет работой всех модулей под действием команд мини-ЭВМ серии СМ. КК Э-60 управляет работой модулей КАМАК по командам микроЭВМ типа «Электроника- 60». При работе УСО цифровая информация в виде четырех битовых слов, с темпом 1 мкс выводится из оперативного запоминающего устройства тепловизора на ФСВВ, преобразующего синхронизирующие сигналы тепловизора в сигналы КАМАК, и передает информацию на МВР, откуда она считывается» крейт-контроллером в оперативную память ЭВМ. Крейт-контроллер дешифрирует команды и синхросигналы ЭВМ в сигналы и команды стандарта КАМАК. Процесс ввода одного кадра термоизображения в ЭВМ длится 6 е.. Процесс ввода управляется по сигналу от кнопки «Пуск», расположенной на) модуле ФСВ. На время ввода термограммы загорается индикатор, что позволяет визуальнo контролировать процесс. При этом ввод происходит независимо от того, в каком режиме находится ОЗУ тепловизора.

В связи с тем что серийно выпускаемый тепловизор «Радуга-2» превосходит тепловизор «Радуга-МТ» по разрядности цифрового кода (шесть против: четырех), был создан комплекс «Радуга-4» (рис. 14), объединяющий «Радугу-2», УСО и ряд периферийных устройств. УСО в этом комплексе также выполнено из набора модулей магистрально-модульной системы КАМАК и состоит из двух крейт-контроллеров, модуля входного регистра (МВР), модуля управления накопителем (МУН), модуля привода телевизора (МПТ),. формирователей сигналов ввода-вывода (ФСВВ), модуля входного регистра (МВР) и формирователя сигналов RGB — для получения цветных изображений на дисплее. «Радуга-2», входящая в состав комплекса «Радуга-4», также дополнена формирователем сигналов RGB. В состав комплекса введен: и накопитель на магнитной ленте типа «Изот», позволяющий получение и обработку термограмм разнести во времени. С помощью МВР и ФСВВ организован двухсторонний обмен информацией, содержащейся в оперативной памяти тепловизора и ЭВМ. Поэтому имеется возможность обрабатывать на ЭВМ термограммы и результаты обработки наблюдать на цветном дисплее где также наблюдаются и необработанные термограммы непосредственно с тепловизора. Формирователь сигналов RGB позволяет получать цветные черно-белые и комбинированные изображения с числом градаций до 64. Модуль привода телевизора формирует на экране черно-белую буквенно- цифровую и графическую информацию, получаемую в результате обработки, термограмм на ЭВМ. Предусмотрена постановка потребителю комплекса. «Радуга-4» с различным набором модулей, определяющих ее функциональные

возможности.

Рассмотренные комплексы типа «Тепловизор-ЭВМ» являются переходными моделями на пути создания комплексов «теповизор-микропроцессор». Особенно важно использование ЭВМ и микропроцессоров при тепловом неразрушающем контроле, где объект наблюдения подвижен. При этом возможно улучшение порога температурной чувствительности за счет накопления сигнала от участков объекта, сканируемых многократно за время их пребывания в поле зрения тепловизора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для вузов [Текст] / Ю.Г. Якушенков. – Изд. 4-е, перераб. и дополн. – М.: ЛОГОС, 1999. – 360 с.
2. Мирошников, М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов [Текст] / М.М. Мирошников. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.
3. Елизаренко, А.С. и др. Оптико-электронные системы в исследованиях природных ресурсов [Текст] / А.С. Елизаренко, В.А. Соломатин, Ю.Г. Якушенков. – М.: Недра, 1984. – 215 с.
4. Лазарев, Л.П. Оптико-электронные приборы наведения летательных аппаратов [Текст] / Л.П. Лазарев. – М.: Машиностроение, 1984. – 478 с.
5. Джемисон Дж. Э. Физика и техника инфракрасного излучения [Текст] / Дж. Э. Джемисон. – М.: Сов. радио, 1965. – 642 с.
6. Сухопаров, С.А. Дальность действия приборов ночного видения пассивного типа [Текст] / С.А. Сухопаров, Б.А. Пизюта // Сб. «Точность и надежность оптико-механ. приборов» / ЛИТМО. – 1973. – № 1. – С. 16 – 21.
7. Сухопаров, С.А. К вопросу дальности действия приборов ночного видения [Текст] / С.А. Сухопаров, Б.А. Пизюта // Труды НИИГАиК / НИИГАиК, 1974. – Т. 32 – С. 25 – 32.
8. Аксютлов, Л.Н. Зеркальная сфера как эталон при фотометрических измерениях [Текст] / Л.Н. Аксютлов, В.М. Тымкул, Г.К. Холопов, Ю.А. Шуба // ОМП. – 1974. – № 41. – С. 45 – 48.
9. Тымкул, В.М. Рассеяние света диффузными квадратичными поверхностями в фотометрическом представлении [Текст] / В.М. Тымкул, Ю.А. Шуба // ОМП. – 1978. – № 11. – С. 11 – 13.
10. Зуев, В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере [Текст] / В.Е. Зуев. – М.: Сов. радио, 1970. – 496 с.

11. Ллойд, Дж. Системы тепловидения [Текст] / Дж. Ллойд / Пер. с англ. М.В. Васильченко; под ред. А.И. Горячева. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
12. Криксунов, Л.З. Справочник по основам ИК техники [Текст] / Л.З. Криксунов. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.
13. Изнар, А.Н. Оптико-электронные приборы космических аппаратов [Текст] / А.Н. Изнар, А.В. Павлов, Б.Ф. Федоров. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.
14. Тымкул, В.М. Теория температурной чувствительности тепловизионных систем по неравномерному объектному полю теплового излучения [Текст] / В.М. Тымкул // Тез. докл. всесоюз. конф. «Тепловизионная медицинская аппаратура и практика ее применения. "ТЕМП-88"». – Л., 1988. – С. 89 – 90.
15. Климов, Ю.М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами [Текст] / Ю.М. Климов. – М.: Сов. радио, 1978. – С. 264.
16. Тымкул, В.М. Энергетический критерий проектирования тепловизионных систем [Текст] / В.М. Тымкул, М.А. Ахметьев // Тез. докл. всесоюз. конф. «Оптико-электронные измерительные устройства и системы». Ч. 1. – Томск, 1989. – С. 1 – 3.
17. Тевяшов, В.И. Оптические характеристики отражения объемных тел в поляризованном свете [Текст] / В.И. Тевяшов, В.М. Тымкул, Ю.А. Шуба // ОМП. – 1979. – № 10. – С. 8 – 11.
18. Тевяшов, В.И. Измерение матриц рассеяния тел с использованием зеркальной сферы в качестве образца отражения [Текст] / В.И. Тевяшов, В.М. Тымкул, Ю.А. Шуба // ОМП. – 1979. – № 8. – С. 11 – 12.
19. Быкадорова, Н.Н. Характеристики отражения объемных тел в поляризованном свете [Текст] / Н.Н. Быкадорова, В.М. Тымкул, Ю.А. Шуба // Тез. докл. III всесоюз. научно-техн. конфер. «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение». – М., 1979.
20. Тымкул, В.М. Обратное отраженное излучение объемных тел при освещении лазерным пучком с гауссовым распределением энергии в

поперечном сечении [Текст] / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул // Межвуз. сб. «Оптико-механические и электронно-оптические приборы» / НИИГАиК. – 1985. – С. 99 – 112.

21. Холопов, Г.К. Коэффициент габаритной яркости как количественный параметр для описания свойств отражения объемных тел [Текст] / Г.К. Холопов, Ю.А. Шуба // ОМП. – 1974. – № 1. – С. 8.

22. Порфирьев, Л.Ф. Теория оптико-электронных систем [Текст] / Л.Ф. Порфирьев. – Л.: Машиностроение, 1900. – 272 с.

23. Жуков, А.Г. Тепловизионные приборы и их применение [Текст] / А.Г. Жуков, А.Н. Горюнова, А.А. Кальфа. – М.: Радио и связь, 1983. – 168 с.

24. Тымкул, Л.В. Методика уточненного энергетического расчета оптико-электронных координаторов [Текст] / Л.В. Тымкул // Тез. докл. междунар. научно-техн. конф. «Современные проблемы геодезии и оптики». – Новосибирск, 1998. – 200 с.

25. Тымкул, О.В. Методика расчета температурной чувствительности космических тепловизионных систем при работе по неоднородному полю теплового излучения [Текст] / О.В. Тымкул, В.М. Тымкул // Исследование Земли из космоса. – 1997. – № 6. – С. 20 – 24.

26. Волф, У. Справочник по ИК технике в 4-х т. Т. 1. Физика ИК излучения: пер.с. англ. [Текст] / У. Волф, Г. Цисис. – М.: Мир, 1999. – 606 с.

27. Тымкул, В.М. Энергетический расчет оптико-электронных приборов и систем. Теория и методы: Учеб. пособие [Текст] / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул. – Новосибирск: НИИГАиК, 1993. – 59 с.

28. Тымкул, В.М. Методы энергетического расчета оптико-электронных приборов и систем: Учеб. пособие [Текст] / В.М. Тымкул. – Новосибирск: НИИГАиК, 1993. – 48 с.

29. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

30. Горчаков, Г.И. Матрицы рассеяния света приземным воздухом [Текст] / Г.И. Горчаков // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. – 1966, 2. – № 6. – С. 595 – 605.
31. Кондратьев, К.Я. Тепловое излучение планет [Текст] / К.Я. Кондратьев, Н.И. Москаленко. – Л.: Гидрометеоздат, 1977. – 263 с.
32. Тымкул, В.М. Оптико-математическая модель поляризационных тепловизионных изображений объектов. Ч. 1. Теория моделирования [Текст] / В.М. Тымкул, М.И. Ананич // Изв. вузов. Приборостроение. – 1993. – № 1.
33. Тымкул, В.М. Оптико-математическая модель поляризационных тепловизионных изображений объектов. Ч. 2. Алгоритм и результаты моделирования [Текст] / В.М. Тымкул, М.И. Ананич // Изв. вузов. Приборостроение. – 1993. – № 3.
34. Тымкул, О.В. Методика определения объемной формы объектов на основе поляризационной комбинированной термограммы [Текст] / О.В. Тымкул, В.М. Тымкул, О.К. Ушаков // Оптический журнал. – 1999. – Т. 66. – № 2. – С. 54 – 59.
35. А.С. №166727 СССР, МКИ Н 04 №5/33. Способ тепловизионного распознавания формы объектов [Текст] / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, М.И. Ананич, П.Т. Голубев, С.Г. Смагин /СССР/. – № 4738971/09; заяв. 06.06.89; опубл. 30.07.91, Бюл. № 28.
36. Пат. 2024212, РФ. МКИ Н 04 № 5/33, Способ распознавания форм объектов [Текст] /А.Б. Гринев, Т.Б. Куроптева, В.М. Тымкул /РФ/. – № 4925084 /09/ 028136, заяв. 3.04.91; опубл. 10.05.94, Бюл. № 22.
37. Пат. 2141735 РФ МКИ Н 04 № 5/33. G 01 В 11/24. Способ тепловизионного распознавания формы объектов [Текст] / В.М. Тымкул, О.В. Тымкул, Л.В. Тымкул, М.И. Ананич /РФ/. – № 95111870; заяв. 11.02.95; опубл. 20.11.99, Бюл. № 32.
38. Пат. 2099759 РФ МКИ G 02 В 27/18. Тепловизионный способ распознавания формы объекта и устройство для его осуществления [Текст] / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, М.И. Ананич, С.Г. Смагин /РФ/. – № 93037825/09; заявл 23.07.93; опубл. 20.13.97, Бюл. № 35.

39. Тымкул, О.В. Аналитическая модель температурно-частотной характеристики тепловизоров [Текст] / О.В. Тымкул, Л.В. Тымкул, В.М. Тымкул // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69. – № 10. – С. 73 – 75.
40. Свет, Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур [Текст] / Д.Я. Свет. – М.: Наука, 1982. – 296 с.

Дополнительная литература

1. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Математическая логика. Кн.9. Ч.1 Киев: «Освіта України», 2017. 464с.
2. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Математическая логика. Кн.9. Ч.2 Киев: «Освіта України», 2017. 564с.
3. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Математическая логика. Кн.9. Ч.3 Киев: «Освіта України», 2017. 424с.
4. А.Е. Кононюк. Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта. Кн. 1. Киев: «Освіта України», 2017. 730с
5. А.Е. Кононюк. Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта. Кн. 2. Киев: «Освіта України», 2017. 668 с
6. А.Е. Кононюк. Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта. Кн. 3, ч.1. Киев: «Освіта України», 2017. 608 с
7. А.Е. Кононюк. Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта. Кн. 3, ч.2. Киев: «Освіта України», 2017. 645 с
8. А.Е. Кононюк. Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта. Кн. 3, ч.3. Киев: «Освіта України», 2017. 645 с
9. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Алгоритмы. Кн.10. Ч.1 Киев: «Освіта України», 2017. 588с
10. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Автоматы. Кн.11. Ч.1 Киев: «Освіта України», 2017. 658с
11. Дж. Ллойд. Системы тепловидения. Москва, 1978
12. А.Е. Кононюк. Общая теория познания и созидания. Кн.1. Киев: «Освіта України», 2013. 648 с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
13. А.Е. Кононюк. Общая теория познания и созидания. Кн.2, ч.1. Киев: «Освіта України», 2013. 544 с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
14. А.Е. Кононюк. Общая теория познания и созидания. Кн.2, ч.2. Киев: «Освіта України», 2013. 644 с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

15. А.Е. Кононюк. Информациология. Общая теория информации. Кн.1. Киев: «Освіта України», 2011. 476 с.
ecat.diiit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
16. А.Е. Кононюк. Информациология. Общая теория информации. Кн.2. Киев: «Освіта України», 2011. 476 с.
ecat.diiit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
17. А.Е. Кононюк. Информациология. Общая теория информации. Кн.3. Киев: «Освіта України», 2011. 412 с.
ecat.diiit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
18. А.Е. Кононюк. Информациология. Общая теория информации. Кн.4. Киев: «Освіта України», 2011. 488 с.
ecat.diiit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
19. А.Е. Кононюк. Общая теория понятий. Кн.1. Киев: «Освіта України», 2014. 514с.
20. А.Е. Кононюк. Общая теория понятий. Кн.2. Киев: «Освіта України», 2014. 544с.
21. А.Е. Кононюк. Общая теория понятий. Кн.3. Киев: «Освіта України», 2014. 614с.
22. А.Е. Кононюк. Системология. Общая теория систем. Кн.1. Киев: «Освіта України», 2012. 564с. ecat.diiit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
23. А.Е. Кононюк. Системология. Общая теория систем. Кн.2. Ч.1. Киев: «Освіта України», 2014. 558с. ecat.diiit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
24. А.Е. Кононюк. Системология. Общая теория систем. Кн.2. Ч.2. Киев: «Освіта України», 2014. 658с. ecat.diiit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
25. А.Е. Кононюк. Системология. Общая теория систем. Кн.2. Ч.1. Киев: «Освіта України», 2014. 558с. ecat.diiit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
26. А.Е. Кононюк. Общая теория распознавания. Кн.1. Киев: «Освіта України», 2012. 584 с. ecat.diiit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
27. А.Е. Кононюк. Общая теория распознавания. Кн.2. Киев: «Освіта України», 2012. 588 с. ecat.diiit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
28. А.Е. Кононюк. Консалтология. Общая теория консалтинга. Кн.1. Киев: «Освіта України», 2013. 448 с. ecat.diiit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
29. А.Е. Кононюк. Консалтология. Общая теория консалтинга. Кн.2. Киев: «Освіта України», 2013. 412 с. ecat.diiit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
30. А.Е. Кононюк. Консалтология. Общая теория консалтинга. Кн.3. Киев: «Освіта України», 2013. 520 с. ecat.diiit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

31. А.Е. Кононюк. Консалтология. Общая теория консалтинга. Кн.4. Киев: «Освіта України», 2013. 508 с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
32. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Начала. Кн.1. Киев: «Освіта України», 2012. 652с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
33. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Множества. Кн.2. Ч.1. Киев: «Освіта України», 2012. 452с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
34. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Множества. Кн.2. Ч.2. Киев: «Освіта України», 2013. 536 с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
35. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Отношения. Кн.3. Ч. 1. Киев: «Освіта України», 2013. 552с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
36. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Отношения. Кн.3. Ч. 2. Киев: «Освіта України», 2013. 548 с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
37. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Алгебры. Кн.4. Ч.1. Киев: «Освіта України», 2011. 452с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
38. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Алгебры. Кн.4. Ч.2. Киев: «Освіта України», 2011. 668 с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
39. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Алгебры. Кн.4. Ч.3. Киев: «Освіта України», 2015. 488 с. http://lib.sumdu.edu.ua/library/DocDescription?doc_id=640902
40. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Алгебры. Кн.4. Ч.4. Киев: «Освіта України», 2015. 548 с.
41. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Алгебры. Кн.4. Ч.5. Киев: «Освіта України», 2015. 528 с.
42. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Алгебры. Кн.4. Ч.6. Киев: «Освіта України», 2015. 608 с.
43. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Матрицы. Кн.5. Ч.1. Киев: «Освіта України», 2013. 612 с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
44. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Матрицы.

Кн.5. Ч.2. Киев: «Освіта України», 2013. 500 с.
ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

45. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Матрицы. Кн.5. Ч.3. Киев: «Освіта України», 2013. 520 с.
ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

46. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Матрицы. Кн.5. Ч.4. Киев: «Освіта України», 2013. 508 с.
ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

47. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Матрицы. Кн.5. Ч.5. Киев: «Освіта України», 2013. 672 с.
ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

48. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Поверхности. Кн.6. Ч.1. Киев: «Освіта України», 2012. 652с.
ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

49. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Графы. Кн.7. Ч.1 Киев: «Освіта України», 2014. 652с.
ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

50. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Графы. Кн.7. Ч.2 Киев: «Освіта України», 2014. 552с.
ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

51. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Графы. Кн.7. Ч.3 Киев: «Освіта України», 2015. 512с.
ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

52. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Графы. Кн.7. Ч.4 Киев: «Освіта України», 2015. 552с.
ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

53. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Графы. Кн.7. Ч.5 Киев: «Освіта України», 2015. 660с.

54. А.Е. Кононюк. Обобщенная теория моделирования. Кн.1. Ч.1 Киев: «Освіта України», 2012. 602с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

55. А.Е. Кононюк. Обобщенная теория моделирования. Кн.1. Ч.2 Киев: «Освіта України», 2012. 708с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

56. А.Е. Кононюк. Обобщенная теория моделирования. Кн.1. Ч.3 Киев: «Освіта України», 2012. 568с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

57. А.Е. Кононюк. Обобщенная теория моделирования. Кн.2. Киев: «Освіта України», 2012. 548с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

58. А.Е. Кононюк. Обобщенная теория моделирования. Кн.3. Ч.1 Киев: «Освіта України», 2012. 636с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

59. А.Е. Кононюк. Обобщенная теория моделирования. Кн.3. Ч.2. Киев: «Освіта України», 2012. 448с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
60. А.Е. Кононюк. Обобщенная теория моделирования. Кн.3. Ч.3. Киев: «Освіта України», 2013. 588с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
61. А.Е. Кононюк. Основы теории оптимизации. Кн.1. Киев: «Освіта України», 2011. 602с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
62. А.Е. Кононюк. Основы теории оптимизации. Кн.2. Ч.1. Киев: «Освіта України», 2011. 552с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
63. А.Е. Кононюк. Основы теории оптимизации. Кн.2. Ч.2. Киев: «Освіта України», 2011. 616с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
64. А.Е. Кононюк. Основы теории оптимизации. Кн.2. Ч.3. Киев: «Освіта України», 2012. 456с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
65. А.Е. Кононюк. Основы теории оптимизации. Кн.2. Ч.4. Киев: «Освіта України», 2012. 512с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
66. А.Е. Кононюк. Основы научных исследований. Кн.1. Киев: «Освіта України», 2011. 508с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
67. А.Е. Кононюк. Основы научных исследований. Кн.2. Киев: «Освіта України», 2011. 452с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
68. А.Е. Кононюк. Основы научных исследований. Кн.3. Киев: «Освіта України», 2011. 456с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
69. А.Е. Кононюк. Основы научных исследований. Кн.4. Киев: «Освіта України», 2011. 456с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
70. А.Е. Кононюк. Общая теория коммуникаций. Кн.1. Киев: «Освіта України», 2014. 488с.
71. А.Е. Кононюк. Нейроні мережі і генетичні алгоритми. Киев: «Корнійчук», 2010. 448с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
72. Кононюк А. Е. Обобщенная теория познания и созидания. [В 2 кн.] Кн. 1 : Начала / А. Е. Кононюк. — Киев : Освіта України, 2013. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
73. Кононюк А. Е. Обобщенная теория познания и созидания. [В 2 кн.] Кн. 2 : Теория познания. Ч. 1 / А. Е. Кононюк. — Киев : Освіта України, 2013 ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html
74. Кононюк А. Ю. Вища математика. (Модульна технологія навчання) : навчальний посібник : в 2 кн. / А. Ю. Кононюк. — Київ : КНТ, 2009 — Кн. 1. — 2009. — 702 с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

75. Кононюк А. Ю. Вища математика. (Модульна технологія навчання) : навчальний посібник : в 2 кн. / А. Ю. Кононюк. — Київ : КНТ, 2009 Кн. 2. — 2009. — 790 с. ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html

76. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Поверхности. Кн.6. Ч.2. Киев: «Освіта України», 2012. 652с. <http://www.dut.edu.ua/ua/lib/127/category/96/view/1297>

77. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Пространства. Кн.8. Ч.1. Киев: «Освіта України», 2016. 748 с. <http://www.dut.edu.ua/ua/lib/1/category/96/view/1439>

78. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Пространства. Кн.8. Ч.2. Киев: «Освіта України», 2016. 480с. http://lib.sumdu.edu.ua/library/DocDescription?doc_id=640775

79. А.Е. Кононюк. Истины и информация (фундаментальная теория представления истин и информации). К.1. Киев: «Освіта України», 2016. 568с.

80. А.Е. Кононюк. Истины и информация (фундаментальная теория представления истин и информации). К.2. Киев: «Освіта України», 2016. 558с.

81. А.Е. Кононюк. Истины и информация (фундаментальная теория представления истин и информации). К.3. Киев: «Освіта України», 2016. 588с.

82. А.Е. Кононюк. Истины и информация (фундаментальная теория представления истин и информации). К.4. Киев: «Освіта України», 2016. 552с

83. А.Е. Кононюк. Истины и информация (фундаментальная теория представления истин и информации). К.5. Киев: «Освіта України», 2016. 836 с

84. А.Е. Кононюк. Истины и информация (фундаментальная теория представления истин и информации). К.6. Киев: «Освіта України», 2016. 576 с

85. Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. Теория сплайнов и ее приложения.—М.: Мир, 1972 (Ahlberg J.H., Nilson E.N., Walsh J.L. The Theory of Splines and their Applications.—New York: Academic Press, 1967).

86. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. Т. 1,2.—М.: Наука, 1962, 1966.
87. Гардан П., Люка М. Машинная графика и автоматизация конструирования.— М.: Мир, 1987 (Techniques Graphiques Interactives et C.A.O./par Michel Lucas et Yvon Gar dan.—Prance: Hermes Publishing, 1983).
88. Гильберт Д., Кон-Фоссен С. Наглядная геометрия.—М.: Наука, 1981 (Hilbert D., Cohn-Vossen S. Anschauliche Geometrie.—Berlin: 1932).
89. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам.—М.: Радио и связь, 1985 (De Boor C. A Practical Guide to Splines.—Berlin: Springer, 1879).
90. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики.—М.: Наука, 1970.
91. Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Т. Современная геометрия.— М.: Наука, 1986.
92. Ильин В. А., Позняк Э.Г. Аналитическая геометрия.—М.: Наука, 1981.
93. Ильин В. А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра.—М.: Наука, 1984.
94. Калиткин Н.Н. Численные методы.—М.: Наука, 1978.
95. Ласло М. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++ К—М.: Бином, 1997 (Laszlo M. J. Computational Geometry and Computer Graphics in C++.—Prentice Hall, 1996).
96. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия.—М.: Мир, 1989 (Preparata F. P., Sham os M. Computational Geometry: An Introduction.— New York, Berlin, Tokyo: Springer-Verlag, 1985).
97. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики.—М.: Машиностроение, 1980 (Rogers D.F., Adams J. A. Mathematical Elements for Computer Graphics.—McGrow-Hill, 1976).

98. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Математическая логика. Кн.9. Ч.1 Киев: «Освіта України», 2017. 464с.
99. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Математическая логика. Кн.9. Ч.2 Киев: «Освіта України», 2017. 564с.
100. А.Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. Математическая логика. Кн.9. Ч.3 Киев: «Освіта України», 2017. 424с.
101. А.Е. Кононюк. Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта. Кн. 1. Киев: «Освіта України», 2017. 730с
102. А.Е. Кононюк. Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта. Кн. 2. Киев: «Освіта України», 2017. 668 с
103. А.Е. Кононюк. Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта. Кн. 3, ч.1. Киев: «Освіта України», 2017. 608 с
104. А.Е. Кононюк. Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта. Кн. 3, ч.2. Киев: «Освіта України», 2017. 645 с

—