

# **Парадигма развития науки**

**А. Е. Кононюк**

## **Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта**

### **Книга 3**

## **Зрительное восприятие изображений искусственным интеллектом**

### **Часть 3**

**Системы тепловидения как расширяющие  
средства зрения в СИИ**

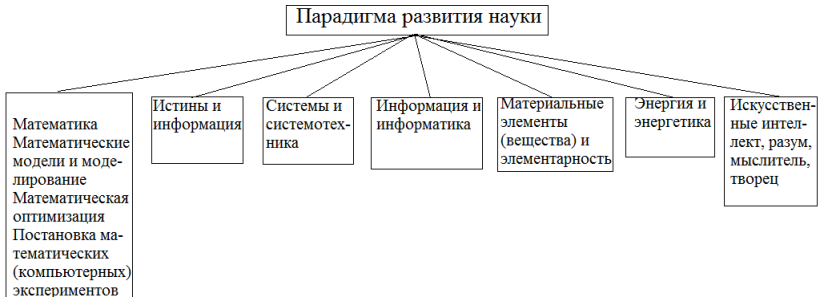
**Киев  
«Освіта України»  
2017**



**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 теория искусственного интеллекта.** — В 20-и кн. Кн.3, ч.3. — К.:Освіта України. 2017.—412 с.

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

ISBN 978-966-373-694-9 (книга 3, ч.3)

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 978-966-373-694-9 (книга 3,ч. 3)

© Кононюк А. Е., 2017

© Освіта України, 2017

# Оглавление

1. Системы тепловидения.....	9
1.1. Назначение систем тепловидения.....	9
1.2. История систем тепловидения .....	13
1.3. Основы получения теплового изображения.....	17
2. Теория теплового излучения и прохождение излучения через атмосферу.....	26
2.1. Введение.....	26
2.2. Тепловое излучение тел.....	27
2.3. Фотоэффект. Фотоны .....	34
2.4. Эффект Комптона.....	41
2.5. Волновые свойства микрочастиц. Дифракция электронов.....	45
2.6. Лучистая энергия.....	55
2.7. Распространение излучения .....	59
2.8. Пропускание излучения атмосферой.....	63
3. Теория линейной фильтрации.....	75
3.1. Области применения.....	75
3.2. Интеграл свертки.....	77
3.3. Преобразование Фурье.....	86
3.4. Теорема свертки и оптическая передаточная функция.....	89
3.5. Применение операции свертки к процессам воспроизведения изображения .....	94
3.6. Сокращенная система обозначений в фурье-анализе.....	96
3.7. Оптические передаточные функции типичных элементов.....	99
3.8. Ухудшение модуляционной передаточной функции .....	108
3.9. Эквивалентная полоса частот, эквивалентное разрешение и центральная предельная теорема.....	110
4. Физиология зрительного восприятия.....	115
4.1. Введение.....	115
4.2. Основные характеристики зрительного аппарата человека...116	
4.3. Восприятие света.....	122
4.4. Глаз.....	126
4.5. Зрительные явления.....	131
4.6. Модель одноцветного зрения .....	139
4.7. Модель цветового зрения.....	148
4.8. Пространственно-частотная характеристика глаза.....	154
4.9. Влияние увеличения.....	163

4.10. Визуальная чувствительность к пространственной частоте случайного шума .....	166
4.11. Пространственные и временные интегрирующие свойства глаза.....	171
4.12. Влияние кадровой развертки на восприятие изображения.....	175
4.13. Обнаружение объектов на фоне случайных шумов.....	189
4.14. Субъективное восприятие резкости изображения и соответствующие ей объективные характеристики.....	201
5. Обобщенные критерии.....	211
5.1. Эквивалентная шуму разность температур.....	211
5.2. Вывод выражения для пороговой разности температур $\Delta T_{\text{пор}}$ .....	213
5.3. Минимальная разрешаемая разность температур.....	219
5.4. Параметры эффективности работы.....	225
6. Оптика.....	230
6.1. Элементы оптических систем.....	230
6.2. Основные законы геометрической оптики .....	237
6.3. Глаз как оптическая система.....	245
6.4. Оптические материалы для тепловизионных систем.....	252
7. Сканирующие устройства.....	259
7.1. Плоское качающееся зеркало.....	260
7.2. Сканирующие системы в сходящемся пучке лучей.....	261
7.3. Сканирующие системы в параллельном пучке лучей .....	268
7.4. Сканирующие устройства и траектории сканирования.....	272
7.5. Вращающиеся преломляющие клинья.....	288
7.6. Другие системы сканирования.....	293
7.7. Эффекты затемнения.....	297
8. Типы тепловизионных систем .....	301
8.1. Классификация тепловизоров и получение ими изображения.. ..	301
8.2. Последовательное и параллельное разложение картины.....	310
8.3. Сравнение характеристик систем FLIR.....	313
с параллельным и последовательным сканированием	
8.4. Эвапорографы .....	316
8.5. Пироэлектрические видиконы .....	319
8.6. Инфракрасные квантовые счетчики.....	325
9. Выборка .....	329
9.1. Введение .....	329
9.2. Выборка в системах с параллельным сканированием.....	336
9.3. Выборка в двумерных мозаиках приемных устройств, непрерывно визирующих картину.....	340

9.4. Выборка в системах с коммутацией.....	343
9.5. Практические последствия выборки.....	346
10. Визуальное восприятие объектов.....	349
10.1. Основные положения.....	349
10.2. Движения глаза во время визуального поиска.....	351
10.3. Теории свободного поиска .....	355
10.4. Разрешение эквивалентных штриховых мир.....	360
10.5. Вероятность обнаружения.....	364
10.6. Вероятности классификации и различения.....	365
10.7. Вероятность опознавания .....	370
10.8. Эксперименты с обработкой на ЭВМ изображений, полученных системой FLIR .....	376
11. Измерение характеристик систем.....	392
11.1. Передаточная функция сигнала и динамический диапазон.....	392
11.2. Измерение оптической передаточной функции .....	394
11.3. Измерение минимальной разрешаемой разности температур.....	400
11.4. Измерение эквивалентной шуму разности температур.....	402
Литература.....	404

## 1. Системы тепловидения

### 1.1. Назначение систем тепловидения

Системы тепловидения расширяют возможности зрения в СИИ, делая видимым естественное излучение нагретых объектов в диапазоне от коротковолновых красных лучей до дальней инфракрасной области спектра. За пределами области видимого света (0,4—0,7 мкм) глаз нечувствителен, поэтому **необходим прибор, который будет создавать изображение, используя излучаемую ночью энергию, подобно тому, как глаз делает это днем. Такой «ночной глаз» должен быть чувствителен главным образом к фотонам, испускаемым телами, поскольку в отсутствие отраженного солнечного света доминирующим становится тепловое излучение тел. Точнее, «ночной глаз» должен иметь спектральную чувствительность на длинах волн, на которых наиболее существенным образом проявляются различия в излучательной способности и температуре, а также в отражательной способности различных элементов рассматриваемой картины.** Необходимо также, чтобы получаемое изображение в достаточной мере соответствовало видимой картине, обусловленной различием в отражательной способности в видимой области спектра. Это обеспечит возможность визуального восприятия преобразованного изображения (для сравнения укажем, что на диапазон 8—14 мкм приходится только 0,08% солнечной энергии.). Кроме того, **спектральный рабочий диапазон** должен быть согласован с «окнами» пропускания атмосферы, в которых излучение поглощается не столь сильно.

Принимая во внимание совершенство, с которым глаз воспроизводит видимое изображение, можно в достаточной мере оценить трудности получения тепловых изображений. Глаз является оптимальным приемником видимого излучения с трех точек зрения. Во-первых, спектральный рабочий диапазон глаза (0,4—0,7 мкм) совпадает с максимумом спектральной кривой излучения солнца. На этот диапазон приходится приблизительно 38% энергии солнечного излучения, и земные материалы обычно хорошо отражают излучение в этой области спектра. Во-вторых, глаз является идеальным приемником, возможности которого ограничены квантовыми шумами, поскольку чувствительные элементы сетчатки имеют низкие



**собственные шумы.** В-третьих, чувствительность элементов сетчатки к фотонам, испускаемым телами за счет собственной температуры, пренебрежимо мала, так что эта длинноволновая тепловая энергия не мешает воспринимать излучение в рабочем диапазоне. Перечисленные оптимальные свойства позволяют **глазу осуществлять свои основные функции, которые заключаются в обнаружении различий в отражательной способности объектов, освещенных излучением с длинами волн 0,4—0,7 мкм, в распознавании изображений, возникающих за счет таких различий, и в оценке их на основе предшествовавшего опыта, накопленного в процессе восприятия окружающего мира при помощи зрения и других органов чувств.** Чтобы быть столь же эффективной, тепловизионная система, как и человеческий глаз, должна **создавать изображение, используя доминирующее излучение, ее чувствительность должна быть ограничена квантовыми шумами, а влияние постороннего света должно быть устранено.**

В то время как **изображения в области видимого спектра образуются прежде всего за счет отражения и различий в отражательной способности, тепловые изображения создаются главным образом за счет собственного излучения и различий в излучательной способности.** Таким образом, при получении теплового изображения для нас представляют интерес **картины, создаваемые за счет энергии собственного теплового излучения.** Обычно возможности тепловых систем оцениваются не по излучению, а **по температуре отдельных элементов картины.** Это требует некоторых пояснений. Совместное действие температуры и отражательной и излучательной способности в некоторой точке картины может быть представлено **эффективной температурой** в этой точке. При такой температуре достигалась бы измеренная поверхностная плотность потока излучения в районе рассматриваемой точки, если бы точка была идеальным **абсолютно черным телом,** т. е. **если бы она испускала максимальное, теоретически возможное излучение при эффективной температуре.** Аналогично поверхностную плотность потока излучения, измеренную через ослабляющий слой атмосферы, можно представить себе как **результат излучения при кажущейся температуре, меньшей, чем эффективная температура.**

Подобное упрощение возможно, поскольку большинство систем

тепловидения имеет широкий спектральный рабочий диапазон и **воспринимает излучение независимо от его поляризации**. Следовательно, они не чувствительны к механизму, определяющему разность температур. Изменения эффективной температуры картины в определенной мере соответствуют деталям визуально наблюдаемой картины, и таким образом **тепловизионная система создает видимый аналог теплового изображения**, обеспечивая эффективную передачу полезной информации из одного спектрального диапазона в другой. Преимущества систем тепловидения и принципы работы обычных тепловизоров описаны Уормсером. **Тепловизор** является электронным прибором, выходной сигнал которого можно характеризовать как электрическими, так и температурными единицами измерения

Данная работа посвящена главным образом таким **устройствам с механическими системами сканирования, которые преобразуют излучение дальней инфракрасной области в видимое излучение в реальном масштабе времени при скорости смены информации (или частоте кадров), сравнимой с применяемой в телевидении**. Широко распространенным сокращенным обозначением в области тепловидения является FLIR (аналогично, например, сокращению TV в телевидении). FLIR — первые буквы английского термина «Forward Looking Infra-Red» — **инфракрасная система переднего обзора**. Этим термином обозначаются системы тепловидения с быстрой кадровой разверткой в отличие от направленных вниз одноканальных систем для получения тепловых карт местности и одноканальных термографических камер. Хотя первоначально сокращенное обозначение FLIR относилось к самолетным инфракрасным системам переднего обзора, в настоящее время оно широко **используется для обозначения любой системы тепловидения с быстрой кадровой разверткой**. Тепловое изображение в системе FLIR получается следующим образом. **Оптическая система собирает инфракрасное излучение картины, осуществляет спектральную фильтрацию и фокусирует его на многоэлементную мозаику чувствительных площадок приемника излучения, которая сканирует пространство. Чувствительные элементы приемника излучения преобразуют оптические сигналы в соответствующие электрические сигналы, которые затем**

**усиливаются и воспроизводятся в виде изображения на видеоконтрольном устройстве**. Внешне система FLIR подобна телевизионной системе; конечное изображение часто получают на мониторе телевизионного типа, работающем с кадровой частотой, применяемой в телевидении. **Контраст (видеоусиление) и яркость (уровень фона)** регулируются таким образом, чтобы **изображение тепловой картины походило на соответствующее видимое изображение**.

Большинство применений **инфракрасных систем тепловидения** в реальном масштабе времени относится к области военной техники. По имеющимся публикациям можно судить, что вооруженные силы используют тепловые стрелковые и артиллерийские прицелы, тепловые прицелы для наведения управляемых снарядов и авиационные системы FLIR. **Функции этих систем включают обзор, разведку и сбор информации, поиск и захват целей, управление огнем, аэронавигацию**. Область невоенных применений систем тепловидения все время расширяется. Сюда относятся тепловой обзор местности в интересах охраны окружающей среды, раннее обнаружение рака молочной железы и другая медицинская диагностика, обнаружение лесных пожаров, поиск при различных спасательных работах, контроль качества продукции в промышленности, обнаружение трещин и осыпей в угольных шахтах, профилактическое обследование электроэнергетического оборудования, разведка земных ресурсов. Если учесть тенденции расширения области применения систем тепловидения, этот список можно продолжить. В частности, системы тепловидения могут найти применение в качестве вспомогательных средств при посадке самолетов, в криминалистике и горном деле, а также использоваться как средства наблюдения сквозь дым для пожарных.

**Преимуществом систем тепловидения по сравнению с другими пассивными электронно-оптическими и оптико-электронными изображающими системами является их способность работать в любое время суток в неблагоприятных погодных условиях. Основная причина такого преимущества — эффективная передача контраста и работа в оптимальных окнах прозрачности атмосферы**. Для получения изображения в электронно-оптических преобразователях и системах низкоуровневого телевидения используются главным образом различия в отражательных свойствах объекта и фона. В видимом спектральном диапазоне наблюдается тенденция к уменьшению разности в отражении между характерными объектами и фонами

при воспроизведении их черно-белого (нецветного) изображения, особенно когда применяются специальные меры маскировки объектов.

**В системах тепловидения средняя величина яркости картины (постоянная составляющая или фон) обычно подавляется, так что на индикатор передаются только изменения яркости относительно среднего уровня.** Благодаря этому достигаются высокие значения контраста изображения, особенно если учесть, что маскировку разностей температур произвести очень трудно. В работе будет показано, что **способность наблюдателя эффективно воспринимать картину в очень сильной степени зависит от контраста, поэтому тепловые системы в этом отношении имеют преимущество по сравнению с большинством приборов видимого диапазона.**

Небольшой недостаток систем тепловидения заключается в том, что тепловое изображение в отличие от видимого практически не имеет теней, поэтому пространственное восприятие объектов в тепловых системах хуже. Этот недостаток несколько возмещается тем, что **мы видим все фронтальные поверхности объекта, поскольку все поверхности излучают тепловую энергию.** Другой не очень существенный недостаток связан с тем, что тепловые излучатели не обязательно хорошо отражают видимый свет, так что яркие участки видимого изображения могут оказаться темными в тепловом изображении и наоборот. Тем не менее тепловое изображение обычно дает значительную информацию. Тепловые системы позволяют, например, определять уровень жидкости в цистерне и производить обнаружение кильватерного следа судов, недавно выключенных двигателей автотранспортных средств, промышленных предприятий (по излучению горячих газов или нагретых площадей), а также **опознавание объектов по картине нагрева поверхностей.**

## **1.2. История систем тепловидения**

Первым тепловизионным прибором теплового изображения был появившийся в конце 20-х годов XXв. эвапорограф — сравнительно малочувствительное устройство без сканирования. Эвапорограф не мог удовлетворить требованиям большинства задач получения теплового изображения из-за присущих ему ограничений в таких характеристиках, как контрастность, чувствительность и постоянная времени. Два различных пути получения тепловых изображений

наметились в 40-е годы. **Один из них — разработка систем, аналогичных телевизионным, с использованием дискретных приемников излучения и механических систем сканирования.** Другой путь — **развитие инфракрасных видиконов или других приборов без механического сканирования.** Первый путь оказался чрезвычайно плодотворным, тогда как на втором пути к настоящему времени достигнуты сравнительно незначительные результаты.

Первые сканирующие приборы получили название **термографических камер**. Это системы с одноэлементным приемником излучения, двумерной малокадровой разверткой и регистрацией изображения на фотографической пленке, в связи с чем изображение получается не в реальном масштабе времени. В 1952 г. для Армии США была создана первая термографическая камера с двумерным сканированием, использующая прожектор с 16-дюймовым (около 40 см) отражателем и болометр в качестве приемника излучения. В период 1956—1960 гг. при поддержке вооруженных сил началось довольно быстрое развитие термографических камер, которые затем стали применяться почти исключительно в мирных целях.

До конца 50-х годов разработка тепловизоров с быстрой кадровой разверткой была практически невозможна из-за отсутствия приемников излучения с малой постоянной времени. Достижимая полоса электрических частот была ограничена несколькими сотнями герц, поскольку малая чувствительность приемников излучения при более высоких частотах приводила к очень низким отношениям сигнала к шуму в изображении. Разработка охлаждаемых малоинерционных приемников на основе антимонида индия InSb и легированного ртутью германия Ge : Hg сделала возможным создание приемных устройств с быстрой кадровой разверткой.

Первая система FLIR в реальном масштабе времени была создана на основе самолетного, смотрящего вниз устройства для получения тепловых карт местности со сканированием в горизонтальном направлении. В таких устройствах, представляющих собой по существу термографические камеры, развертка по вертикали обеспечивается перемещением самолета относительно поверхности земли; наиболее интенсивно они применяются Армией и ВВС США для разведки.

Первый образец **длинноволновой системы FLIR** был создан в Чикагском университете в 1956 г. при поддержке ВВС. Он представлял собой модификацию системы для получения тепловых карт AN/AAS-3

и был обозначен ХА-1. Модификация заключалась в добавлении к вращающемуся с переменной направлением оптическому клину в сканирующей системе AN/AAS-3 качающегося по углу места зеркала, и в результате одноэлементный приемник сканировал пространство, образуя двумерный растр.

Насколько известно, следующим прибором с разверткой в реальном масштабе времени была наземная система FLIR, созданная фирмой «Перкин — Элмер» для сухопутных войск в 1960 г. В сканирующей системе использовались две вращающиеся преломляющие призмы (клины) для получения спиральной развертки с одноэлементным приемником излучения на основе антимолибдита индия. Мгновенное поле составляло 1 мрад при круглом поле обзора 0,087 рад ( $5^\circ$ ), кадровая частота 0,2 кадр/с, чувствительность — около  $1^\circ\text{C}$ ; в качестве индикатора использовалась электронно-лучевая трубка с длительным послесвечением экрана. С этой системы началось развитие наземных приемных устройств для военных и гражданских применений; возможности дальнейшего сокращения габаритов систем.

Интерес к самолетным системам FLIR был возрожден в двух независимых программах начала 60-х годов: ВВС совместно с фирмой «Тексес инструменте» и ВМС совместно с фирмой «Хьюз эйркрафт». Опытные образцы были созданы и прошли летные испытания в 1965 г. Результаты были столь успешными, что вызвали расширение производства самолетных FLIR и сферы их применения. С этого момента начался расцвет систем FLIR, и в период 1960—1974 гг. было разработано по меньшей мере 60 различных систем FLIR и несколько сот таких систем изготовлено. Наземные и самолетные FLIR стали функционально подобными, а во многих случаях одинаковыми, так что **термин FLIR теперь практически означает любую систему тепловидения в реальном масштабе времени.**

**Техника создания FLIR достигла полной силы с разработкой многоэлементных приемников излучения с чувствительностью, близкой к теоретическому пределу, и с достаточно малой**

**инерционностью, обеспечивающей широкую полосу, необходимую для получения высокого отношения общего поля зрения к мгновенному полю зрения.** Малогабаритные и эффективные криогенные системы охлаждения для приемников излучения сделали возможным создание FLIR с приемлемым потреблением мощности, а постоянный прогресс в миниатюризации электроники обеспечил уменьшение габаритов блоков обработки сигнала и дальнейшее

снижение потребления мощности. Техника создания FLIR быстро развивается в направлении уменьшения габаритов и потребляемой мощности и достижения умеренной стоимости, что необходимо для превращения FLIR в оптико-электронную систему широкого применения.

Для первых систем FLIR анализ и оценка качества теплового изображения базировались на таких же полуэмпирических принципах, что и конструирование самих систем. **Качество изображения определялось пространственным разрешением двух точек и входной облученностью, обеспечивающей получение отношения сигнала к шуму на выходе приемного устройства, равного единице.**

Эти параметры обычно измерялись на выходе предусилителя, а не на индикаторном устройстве. Разрешение и тепловая чувствительность определялись низкими характеристиками приемников излучения того времени, так что качество изображения действительно неплохо соответствовало результатам измерений на выходе предусилителя. Однако с усовершенствованием технологии и разработкой малошумящих элементов с высоким разрешением качество изображения существенно не улучшилось. Причина этого заключается в том, что не был использован опыт построения аналогичных оптико-электронных систем. Проблемы качества изображения и применение к FLIR идей, уже развитых применительно к другим устройствам, в значительной мере определяют предмет данной работы. Мы увидим, что весьма выжным является опыт современной оптики, фотографии, телевидения и физиологии зрительного восприятия. **На основе этого опыта можно получить совокупность основных параметров, определяющих качество изображения, которые применимы для FLIR и позволяют провести анализ, необходимый для получения качества изображения современных FLIR, сравнимого с качеством телевидения.**

**Тепловидение — весьма сложная область техники. Для успешного проектирования приборов тепловидения нужны знания следующих дисциплин:**

теории излучения и характеристик излучения объектов;  
пропускания атмосферой теплового излучения;  
прикладной оптики;  
приемников излучения и работы систем охлаждения приемников;  
электронной обработки сигналов;  
визуальных индикаторов изображения;  
процессов зрительного поиска и зрительного восприятия при использовании FLIR.

В следующем разделе содержится минимум основных сведений,

необходимых для понимания более подробной информации, приведенной в последующих главах.

### 1.3. Основы получения теплового изображения

Основные составляющие процесса получения теплового изображения показаны схематически на рис. 1.1.

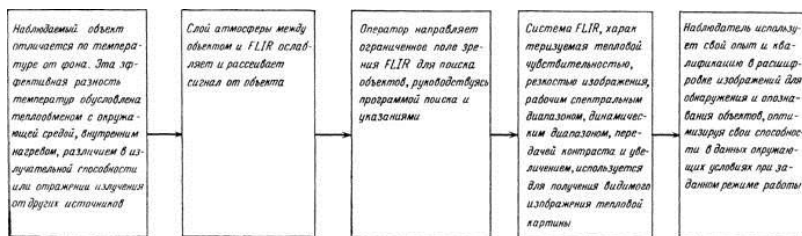


Рис. 1.1. Процесс получения теплового изображения.

Эти составляющие очевидны, но недостаточно точный анализ их влияния на процесс в целом может привести к серьезным ошибкам при проектировании, поэтому вкратце остановимся на них.

Чтобы обнаружить, а затем и опознать объект, он должен **отличаться по температуре от фона на достаточную величину, которая позволила бы отделить его от других вариаций фона**. Слой атмосферы, через который ведется наблюдение, не должен сильно рассеивать и ослаблять этот сигнал. Оператор должен иметь возможность осуществлять эффективный поиск, знать, что он должен искать, и ориентировать приемное устройство в соответствующем направлении. **Приемное устройство должно собирать излучение с помощью оптической системы и преобразовывать его в электрический сигнал с достаточно высоким отношением сигнала к шуму с помощью приемника излучения, работающего в соответствующем спектральном диапазоне. Этот электрический сигнал должен затем вновь преобразовываться в оптический сигнал на индикаторном устройстве.**

**На заключительной стадии оператор должен иметь возможность оптимизировать извлечение визуальной информации, регулируя**



**видеоусиление и яркость.** Весь процесс преобразования инфракрасного изображения в видимое изображение должен происходить таким образом, чтобы восприятие контуров, ориентации, контраста и деталей объекта было сохранено или улучшено и чтобы не появлялись ложные сигналы и дополнительные шумы.

На рис. 1.2 приведена блок-схема типичной сканирующей системы тепловидения, показывающая основные функции ее элементов. В конкретных системах отдельные функции могут быть объединены или исключены, причем существует много различных способов реализации этих функций.

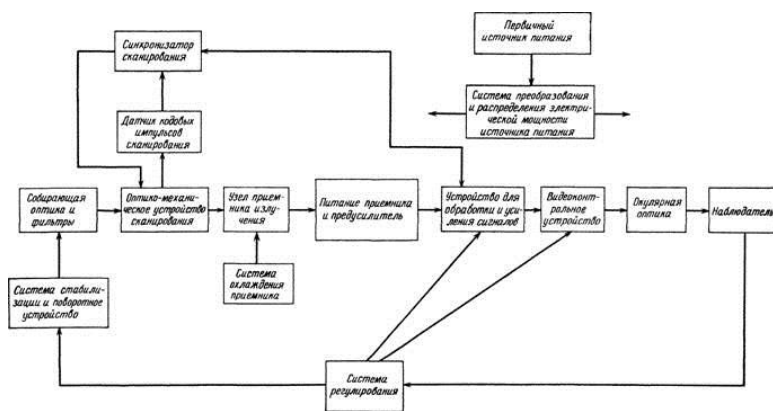


Рис. 1.2. Блок-схема сканирующей системы тепловидения

На рис. 1.3 показан один из возможных вариантов сканирующей системы FLIR.

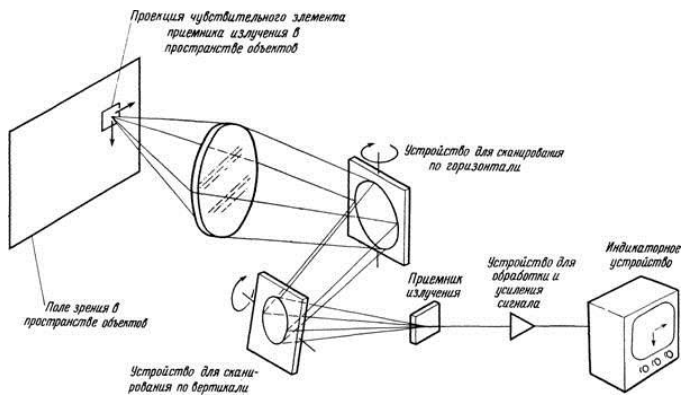


Рис. 1.3. Упрощенная система сканирования по двум осям с одноэлементным приемником излучения.

Оптическая система собирает **излучение картины** и осуществляет спектральную и пространственную фильтрацию и фокусировку излучения, создавая изображение картины в фокальной плоскости, где расположен небольшой чувствительный элемент одноэлементного приемника излучения. Оптико-механическая система сканирования, состоящая из двух зеркал, одно из которых качается вокруг вертикальной оси, а другое — вокруг горизонтальной оси, расположена между объективом и приемником излучения. Пучок лучей от объекта, падающий на приемник, перемещается при прокачивании зеркал, образуя в пространстве объектов растр телевизионного типа, как показано на рис. 1.3. Этот процесс **последовательного сканирования называется разложением картины**.

**Поступающее от наблюдаемой картины электромагнитное излучение оказывает на приемник возмущающее воздействие, которое обычно пропорционально энергии излучения.** Характер возмущения зависит от типа приемника и может проявляться в **разделении носителей заряда, появлении фототока или изменении сопротивления**. Обычно падающее излучение вызывает появление напряжения на нагрузке, и **двумерное распределение яркости в пространстве объектов в результате сканирования преобразуется в одномерное распределение напряжения**. Приемник инфракрасного излучения в определенной совокупности рабочих условий характеризуется двумя параметрами — **чувствительностью R и удельной обнаружительной способностью**. **Чувствительность выражается как отношение сигнала приемника на выходе в вольтах к сигналу на входе в ваттах. Удельная обнаружительная способность представляет собой приведенное к единичной площади приемника излучения и единичной полосе частот отношение сигнала к шуму на выходе приемника для сигнала на входе, равного 1 Вт.**

Эти два параметра зависят от частоты электрического сигнала  $f$ , Гц; длины волны оптического излучения  $X$ , мкм; площади приемника излучения  $A_d$ , см<sup>2</sup>; эквивалентной шумовой полосы  $D$ , Гц; среднеквадратичной величины напряжения шумов в полосе  $D$  /  $F_n$ , В; сигнала приемника в функции длины волны оптического излучения и частоты электрического сигнала  $V_s(X, f)$ , В; спектрального распределения освещенности на приемнике  $H$ , Вт/(см<sup>2</sup>\*мкм). Чувствительность и удельная обнаружительная способность определяются по формулам

$$R(\lambda, f) = \frac{V_s(\lambda, f)}{H_\lambda A_d}, \quad (1.1)$$

$$D^*(\lambda, f) = \frac{(A_d \Delta f)^{1/2} V_s(\lambda, f)}{H_\lambda A_d V_n} = \frac{R(\lambda, f) (A_d \Delta f)^{1/2}}{V_n}. \quad (1.2)$$

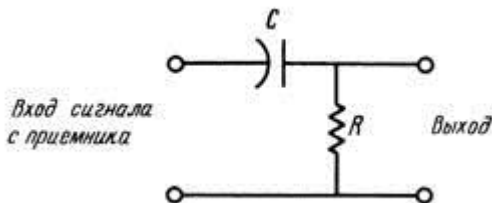


Рис. 1.4. Схема связи по переменной составляющей сигнала.

Если наблюдение ведется на земных фонах, то, как будет показано в последующих разделах, радиационные контрасты очень малы. Соответствующие контрасты, выраженные в напряжении сигнала, также малы, так что, если эти напряжения линейно преобразуются в оптические сигналы на индикаторе, наблюдатели будут испытывать трудности в обнаружении и опознавании объектов из-за низких значений контраста в изображении. Обычно контраст повышается за счет передачи от приемника излучения к предусилителю только переменной составляющей сигнала. Этим устраняется постоянная составляющая сигнала от фона. Простейшая возможная схема связи по переменной составляющей сигнала показана на рис. 1.4. Эта схема не пропускает постоянную составляющую сигнала, т. е. через нее проходят только изменения сигнала относительно его среднего значения.

Сканирование в индикаторном устройстве должно быть строго синхронизировано со сканированием картины, так что индикатор и зеркала сканирующей системы управляются одним синхронизатором. Например, если индикатор — электронно-лучевая трубка, то синхронизирующие импульсы управляют схемами горизонтального и вертикального отклонений электронного луча.

**Любую сканирующую систему тепловидения можно описать при помощи нескольких основных параметров.** Фоточувствительный элемент приемника обычно имеет прямоугольную форму с размерами  $a$  по горизонтали и  $b$  по вертикали (в сантиметрах). Угловые размеры

фоточувствительного элемента приемника, работающего с оптикой, имеющей эффективное фокусное расстояние  $g$  / (в сантиметрах), при небольших размерах приемника равны  $a = a/f$  и  $P = blf$  (в радианах). Угловые размеры обычно выражаются в миллирадианах (10~3 рад). Угловые размеры области в пространстве объектов, в пределах которой объекты изображаются системой, называются полем зрения приемного устройства. Системы FLIR обычно имеют **прямоугольное общее поле зрения с размерами А (град) по азимуту и В (град) по углу места**. Различие между фокусным расстоянием и частотой, одинаково обозначенными буквой  $f$ , ясно из контекста.

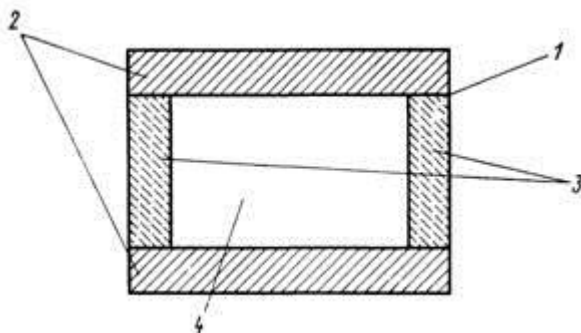


Рис. 1.5. Эффективность сканирования.

1 — возможная площадь, если все время  $T_u$  используется для сканирования пространства; 2 — площадь потерь на обратный ход вертикальной развертки; 3 — площадь потерь на обратный ход горизонтальной развертки или на автоматическое выравнивание каналов; 4 — полезная площадь, соответствующая времени  $n8CTf$

Время кадра  $T_j$  — это время (в секундах) между моментом, когда система сканирования визирует первую точку поля зрения, и моментом, когда система, завершив сканирование всех остальных точек поля зрения, возвращается к первой точке. Частота, с которой система формирует полную картину, называется частотой кадров  $F$  ( $F = 1/T_j$ ).

Приемник (или приемники) излучения в системе не образуют информативного видеосигнала в течение полного времени кадра  $T_j$ , поскольку некоторое время требуется для автоматической регулировки усиления, восстановления постоянной составляющей и обратного хода сканирующего механизма. Соответствие между временем активного

сканирования и пространственным перекрытием показано на рис. 1.5. Большой прямоугольник на рис. 1.5 соответствует перекрытию пространства при сканировании, если все время кадра  $T$  используется для сканирования картины. Сплошной штриховкой показана площадь потерь, обусловленных затратой времени на обратный ход вертикальной развертки. В этом случае имеют в виду, что система при сканировании по вертикали имеет коэффициент использования развертки  $\gamma/v < 1$ . Пунктирной штриховкой показана площадь потерь, вызванных затратой времени на обратный ход горизонтальной развертки или на автоматическое выравнивание каналов. Эти потери учитываются коэффициентом использования развертки по горизонтали  $\gamma/n$ . Внутренний, незаштрихованный прямоугольник определяет активную площадь сканирования; соответствующее этой площади время равно  $\gamma/vnTf$ . Полный коэффициент использования развертки  $\gamma/sc$  равен произведению  $\gamma/ug]n$

Другой полезный параметр, который характеризует процесс сканирования, — время элемента разложения  $id$  (в секундах).

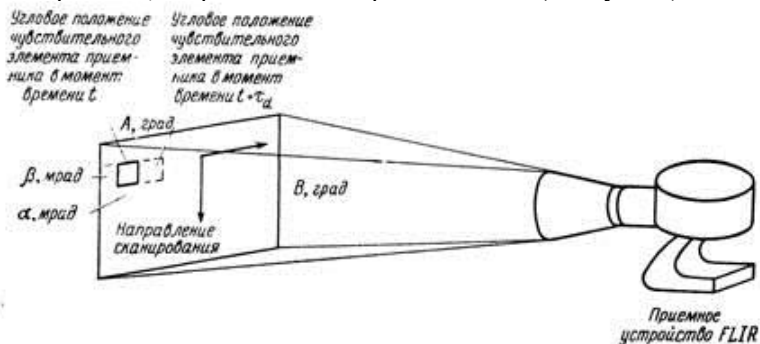


Рис. 1.6. Время элемента разложения  $Td$  и угловой размер  $a$  чувствительного элемента приемника излучения в направлении сканирования.

Эту величину можно себе представить, рассматривая точечный источник тепловой энергии на пути сканирования пространства приемником излучения. Время между моментами, когда передний и задний края чувствительного элемента приемника пересекают этот точечный источник при сканировании, равно  $Td$ . Если угловая скорость сканирования в пространстве объектов постоянна, то величина  $Td$  будет постоянна по всему полю зрения; в противном случае она будет разной в различных точках поля зрения.

Например, если сканирование линейно, то система с одноэлементным приемником излучения, с коэффициентом использования развертки, равным единице, и с соприкасающимися строками сканирования будет характеризоваться постоянной величиной  $\%d =$

$= \alpha\beta/AB\dot{F}$ . Если коэффициент использования развертки отличен от единицы, то величина та будет равна

$$\tau_d = \frac{\alpha\beta\eta_{sc}}{AB\dot{F}}. \quad (1.3)$$

Это иллюстрируется схемой, представленной на рис. 1.6. В последующих главах анализируется процесс получения теплового изображения в соответствии со схемой рис. 1.1 и рассматривается дальнейшее развитие простых систем, упомянутых выше. Состояние элементной базы меняется так быстро, что подробное обсуждение, из каких элементов состоят отдельные компоненты систем, не имеет смысла. Цель данной работы заключается скорее в том, чтобы дать такое введение в предмет, что читатель мог бы без затруднения отвечать на простые вопросы типа «чем определяется поле зрения?» или «зачем нужно восстановление постоянной составляющей?».

## **Пример системы**

Для ясности в последующих главах будет использован пример определенной системы, чтобы проиллюстрировать применение основных выводов теоретического рассмотрения. Это чисто гипотетический прибор, относящийся к типу систем, получивших наибольшее развитие и применение,— FLIR со схемой сканирования в параллельном ходе лучей и возможностью замены телескопической оптики в зависимости от применения. Этот тип FLIR описан под названием «Универсальный прибор наблюдения» и Лакмана под названием «Система тепловидения». Для нашего примера мы предположим, что система FLIR работает в спектральном диапазоне 8—12 мкм, имеет поле зрения с отношением сторон 4 : 3 и сканирование с частотой 30 кадров в секунду и 60 полей в секунду. Основные функциональные компоненты системы показаны на рис. 1.7.

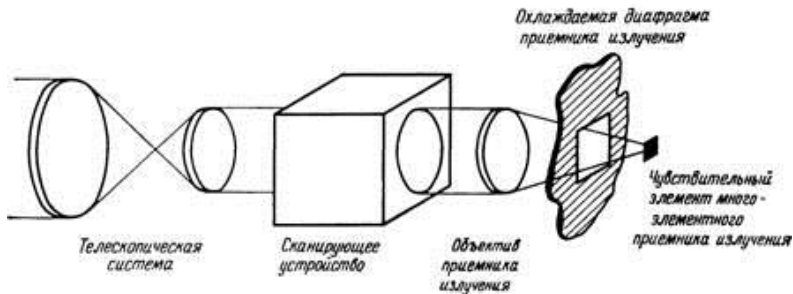


Рис. 1.7. Основные функциональные компоненты системы.

Мы не будем уточнять тип телескопической системы, сканирующего устройства, объектива приемника, числа и расположения его фоточувствительных элементов и размера охлаждаемой диафрагмы.

Определим только минимум необходимых параметров:

размер фоточувствительного элемента  $a - b - 0,05 \text{ мм}$ ; фокусное расстояние объектива приемника  $f_d = 50 \text{ мм}$ ;

световой диаметр объектива приемника  $D_d = 20 \text{ мм}$ ;

число строк сканирования 300;

число элементов в строке 400;

кратность

чересстрочной развертки 2:1.

Эти параметры в дальнейшем будут дополнены размером поля зрения  $400 \times 300 \text{ мрад}$  ( $22,9 \times 17,2^\circ$ ) и угловым размером фоточувствительного элемента  $1 \times 1 \text{ мрад}$  для типичной сканирующей системы и объектива приемника без телескопа. В последующих главах мы будем по мере необходимости конкретизировать расположение фоточувствительных элементов приемника, тип телескопа и сканирующего механизма, схему обработки сигнала и рассматривать их взаимосвязь.



## 2. Теория теплового излучения и прохождение излучения через атмосферу

### 2.1. Введение

Каждый объект с температурой, отличной от абсолютного нуля, испускает излучение, которое называется тепловым. Мы будем рассматривать тепловое излучение только в диапазоне длин волн 3—14 мкм по следующим причинам. Во-первых, большая часть энергии излучения, испускаемого объектами при земных температурах, приходится именно на этот диапазон. Во-вторых, именно в этом же диапазоне находятся окна прозрачности атмосферы, которые позволяют обнаруживать оптические сигналы на сравнительно больших расстояниях. Тепловое излучение при земных температурах состоит главным образом из собственного излучения, обусловленного переходами между колебательными и вращательными энергетическими уровнями молекул, а также из отраженного излучения от других нагретых источников. В СИИ, связанных с получением изображения, действительный механизм излучения не играет роли, важно лишь наличие обнаруживаемой разницы температур. Фундаментальным соотношением в теории теплового излучения является формула Планка излучения абсолютно черного тела. Вывод этой формулы основан на представлении, что тепловое излучение генерируется в процессе простого гармонического

колебания линейных атомных осцилляторов не непрерывным образом, а дискретными квантами, энергия  $E$  которых является функцией частоты излучения  $\nu$ :  $E = h\nu$ , где  $h$  — постоянная Планка. Теоретический вывод формулы Планка приведен в литературе. Характеризуя эффективность излучения тепловых источников, рассматривают три вида излучателей: черные тела, серые тела и селективные излучатели. Количественно эффективность излучения описывается спектральной излучательной способностью  $\epsilon(\lambda)$ , определяющей эффективность излучения на данной длине волны  $\lambda$ . Абсолютно черное тело — это идеализированное понятие. При данной температуре оно испускает и поглощает теоретически возможный максимум излучения. Черное

тело имеет излучательную

способность  $\varepsilon = 1$  во всем диапазоне длин волн; для серого тела в определенном диапазоне длин волн  $\varepsilon = \text{const} < 1$ . Излучательная способность селективного излучателя  $0 \leq \varepsilon(\lambda) \leq 1$  и может быть однозначной функцией  $\lambda$  того или иного вида 1). Излучательная способность зависит также от угла зрения, однако в дальнейшем мы будем рассматривать сравнительно малые углы и излучательную способность будем полагать в среднем одинаковой для всех углов.

## 2.2. Тепловое излучение тел

Испускаемый источником свет уносит с собой энергию. Существует много различных механизмов подвода энергии к источнику света. В тех случаях, когда необходимая энергия сообщается нагреванием, т. е. подводом тепла, излучение называется **тепловым или температурным**. Этот вид излучения для физиков конца XIX века представлял особый интерес, так как в отличие от всех других видов люминесценции, тепловое излучение может находиться в состоянии термодинамического равновесия с нагретыми телами.

Изучая закономерности теплового излучения тел, физики надеялись установить взаимосвязь между термодинамикой и оптикой.

Если в замкнутую полость с зеркально отражающими стенками поместить несколько тел, нагретых до различной температуры, то, как показывает опыт, такая система с течением времени приходит в состояние теплового равновесия, при котором все тела приобретают одинаковую температуру. **Тела обмениваются энергией только путем испускания и поглощения лучистой энергии.** В состоянии равновесия процессы испускания и поглощения энергии каждым телом в среднем компенсируют друг друга, и в пространстве между телами плотность энергии излучения достигает определенного значения, зависящего только от установившейся температуры тел. **Это излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с телами, имеющими определенную температуру, называется равновесным или черным излучением. Плотность энергии равновесного излучения и его спектральный состав зависят только от температуры.**

Если через малое отверстие заглянуть внутрь полости, в которой

установилось термодинамическое равновесие между излучением и нагретыми телами, то глаз не различит очертаний тел и зафиксирует лишь однородное свечение всей полости в целом.

Пусть одно из тел в полости обладает свойством поглощать всю падающую на его поверхность лучистую энергию любого спектрального состава. Такое тело называют **абсолютно черным**. При заданной температуре собственное тепловое излучение абсолютно черного тела, находящегося в состоянии теплового равновесия с излучением, должно иметь тот же спектральный состав, что и окружающее это тело равновесное излучение. В противном случае равновесие между абсолютно черным телом и окружающим его излучением не могло бы установиться. Поэтому задача сводится к изучению спектрального состава излучения абсолютно черного тела. Решить эту задачу классическая физика оказалась не в состоянии.

**Для установления равновесия в полости необходимо, чтобы каждое тело испускало ровно столько лучистой энергии, сколько оно поглощает. Это одна из важнейших закономерностей теплового излучения.** Отсюда следует, что при заданной температуре абсолютно черное тело испускает с поверхности единичной площади в единицу времени больше лучистой энергии, чем любое другое тело.

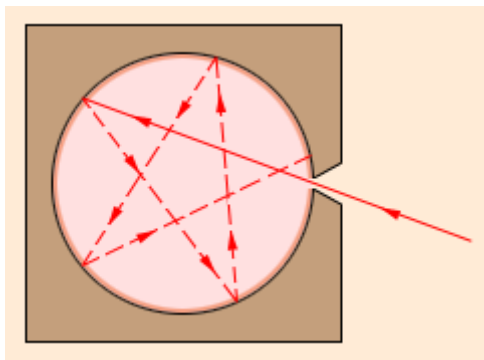


Рисунок 2.2.1.  
Модель абсолютно черного тела

Абсолютно черных тел в природе не бывает. Хорошей моделью такого тела является небольшое отверстие в замкнутой полости (рис. 2.2.1). Свет, падающий через отверстие внутрь полости, после многочисленных отражений будет практически полностью поглощен стенками, и снаружи отверстие будет казаться

совершенно черным. Но если полость нагрета до определенной температуры  $T$ , и внутри установилось тепловое равновесие, то

собственное излучение полости, выходящее через отверстие, будет излучением абсолютно черного тела. **Именно таким образом во всех экспериментах по исследованию теплового излучения моделируется абсолютно черное тело.**

С увеличением температуры внутри полости будет возрастать энергия выходящего из отверстия излучения и изменяться его спектральный состав.

Распределение энергии по длинам волн в излучении абсолютно черного тела при заданной температуре  $T$  характеризуется **излучательной способностью**  $r(\lambda, T)$ , равной мощности излучения с единицы поверхности тела в единичном интервале длин волн.

**Произведение  $r(\lambda, T) \Delta\lambda$  равно мощности излучения, испускаемого единичной площадкой поверхности по всем направлениям в интервале  $\Delta\lambda$  длин волн.** Аналогично можно ввести распределение энергии по **частотам**  $r(\nu, T)$ . Функцию  $r(\lambda, T)$  (или  $r(\nu, T)$ ) часто называют **спектральной светимостью**, а полный поток  $R(T)$  излучения всех длин волн, равный

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\lambda, T) d\lambda = \int_0^{\infty} r(\nu, T) d\nu,$$

называют **интегральной светимостью тела.**

К концу XIX века излучение абсолютно черного тела было хорошо изучено экспериментально.

В 1879 году Йозеф Стефан на основе анализа экспериментальных данных пришел к заключению, что интегральная светимость  $R(T)$  абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры  $T$ :

$$R(T) = \sigma T^4.$$

Несколько позднее, в 1884 году, Л. Больцман вывел эту зависимость теоретически, исходя из термодинамических соображений. Этот закон получил название закона Стефана–Больцмана. Числовое значение постоянной  $\sigma$ , по современным измерениям, составляет

$$\sigma = 5,671 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

К концу 90-х годов XIX века были выполнены тщательные экспериментальные измерения спектрального распределения излучения абсолютно черного тела, которые показали, что при каждом значении температуры  $T$  зависимость  $r(\lambda, T)$  имеет ярко

выраженный максимум (рис. 2.2.2).

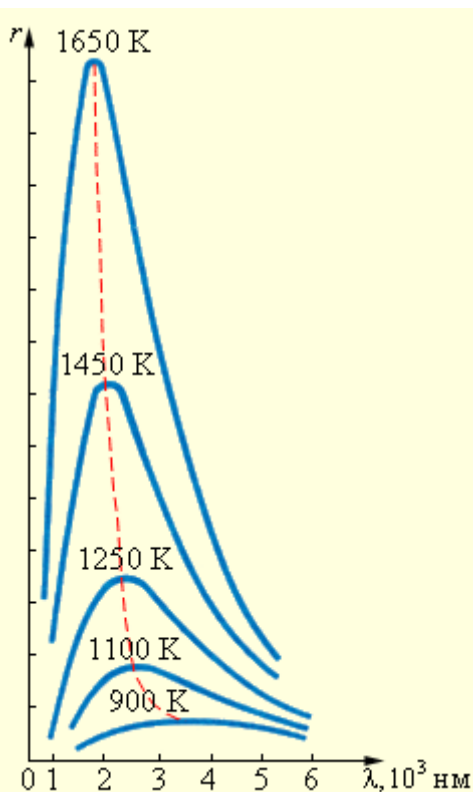


Рисунок 2.2.2.  
Спектральное распределение  $r(\lambda, T)$   
излучения черного тела при различных  
температурах

С увеличением температуры максимум смещается в область коротких длин волн, причем произведение температуры  $T$  на длину волны  $\lambda_m$ , соответствующую максимуму, остается постоянным:

$$\lambda_m T = b \text{ или } \lambda_m = b / T.$$

Это соотношение ранее было получено Вином из термодинамики. Оно выражает так называемый **закон смещения Вина**: длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно

черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре  $T$ . Значение постоянной Вина

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

При практически достижимых в лабораторных условиях **температурах максимум излучательной способности  $r(\lambda, T)$**  лежит в инфракрасной области. **Только при  $T \geq 5 \cdot 10^3 \text{ К}$  максимум попадает в видимую область спектра.** Максимум энергии излучения Солнца приходится примерно на 470 нм (зеленая область спектра), что соответствует температуре наружных слоев Солнца около 6200 К (если рассматривать Солнце как абсолютно черное тело).

Успехи термодинамики, позволившие вывести законы Стефана–Больцмана и Вина теоретически, вселяли надежду, что, исходя из термодинамических соображений, удастся получить всю кривую спектрального распределения излучения черного тела  $r(\lambda, T)$ . В 1900 году эту проблему пытался решить знаменитый английский физик Д. Релей, который в основу своих рассуждений положил **теорему классической статистической механики о равномерном распределении энергии по степеням свободы в состоянии термодинамического равновесия.** Эта теорема была применена Релеем к равновесному излучению в полости. Несколько позже эту идею подробно развил Джинс. Таким путем удалось получить зависимость излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны  $\lambda$  и температуры  $T$ :

$$r(\lambda, T) = 8\pi k T \lambda^{-4}.$$

Это соотношение называют формулой Релея–Джинса. Оно согласуется с экспериментальными данными только в области достаточно длинных волн (рис. 2.2.3.). Кроме того, из нее следует абсурдный вывод о том, что интегральная светимость  $R(T)$  черного тела должна обращаться в бесконечность, а, следовательно, равновесие между нагретым телом и излучением в замкнутой полости может установиться только при абсолютном нуле температуры.

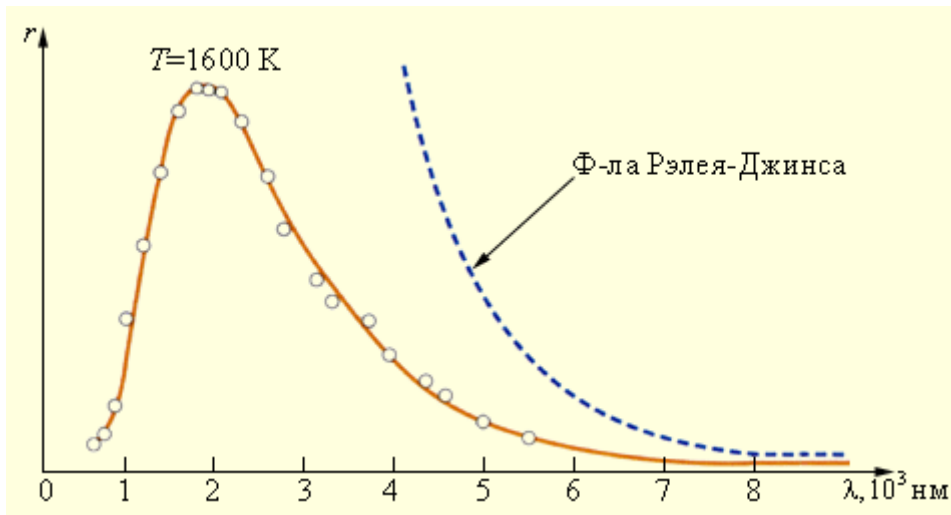


Рисунок 2.2.3.

Сравнение закона распределения энергии по длинам волн  $r(\lambda, T)$  в излучении абсолютно черного тела с формулой Релея–Джинса при  $T = 1600$  К

Таким образом, безупречный с точки зрения классической физики вывод приводит к формуле, которая находится в резком противоречии с опытом. Стало ясно, что решить задачу о спектральном распределении излучения абсолютно черного тела в рамках существующих теорий невозможно. Эта задача была успешно решена М. Планком на основе новой идеи, чуждой классической физике.

Планк пришел к выводу, что **процессы излучения и поглощения электромагнитной энергии нагретым телом происходят не непрерывно, как это принимала классическая физика, а конечными порциями – квантами. Квант – это минимальная порция энергии, излучаемой или поглощаемой телом.** По теории Планка, энергия кванта  $E$  прямо пропорциональна частоте света:

$$E = h\nu,$$

где  $h$  – так называемая постоянная Планка.  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Постоянная Планка – это универсальная константа, которая в квантовой физике играет ту же роль, что и скорость света в СТО.

На основе гипотезы о прерывистом характере процессов излучения и поглощения телами электромагнитного излучения Планк получил формулу для спектральной светимости абсолютно черного тела. Формулу Планка удобно записывать в форме, выражающей распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела по частотам  $\nu$ , а не по длинам волн  $\lambda$ .

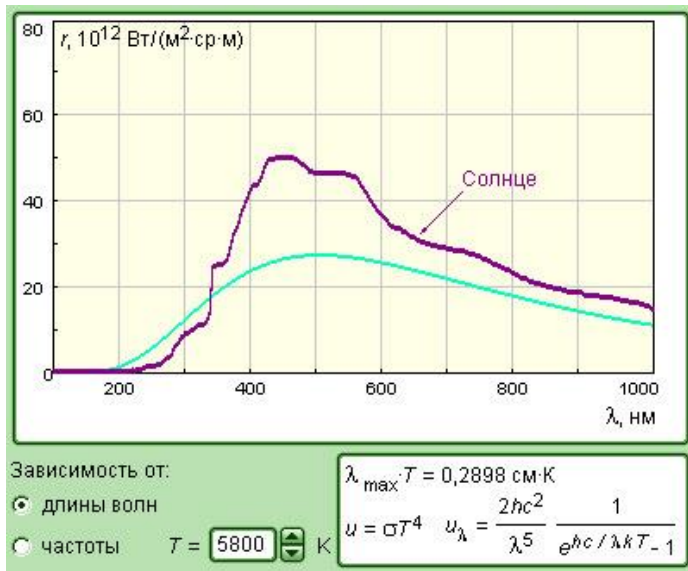
$$r(\nu, T) = \frac{2\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Здесь  $c$  – скорость света,  $h$  – постоянная Планка,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.

Формула Планка хорошо описывает спектральное распределение излучения черного тела при любых частотах. Она согласуется с экспериментальными данными. Из формулы Планка можно вывести законы Стефана–Больцмана и Вина. При  $h\nu \ll kT$  формула Планка переходит в формулу Релея–Джинса.

Решение проблемы излучения черного тела ознаменовало начало новой эры в физике. Нелегко было примириться с отказом от классических представлений, и сам Планк, совершив великое открытие, в течение нескольких лет безуспешно пытался понять квантование энергии с позиции классической физики.





Модель. Излучение абсолютно черного тела

### 2.3. Фотоэффект. Фотон

Фотоэлектрический эффект был открыт в 1887 году немецким физиком Г. Герцем и в 1888–1890 годах экспериментально исследован А. Г. Столетовым. Наиболее полное исследование явления фотоэффекта было выполнено Ф. Ленардом в 1900 г. К этому времени уже был открыт электрон (1897 г., Дж. Томсон), и стало ясно, что **фотоэффект (или точнее – внешний фотоэффект) состоит в вырывании электронов из вещества под действием падающего на него света.**

Схема экспериментальной установки для исследования фотоэффекта изображена на рис. 2.3.1.

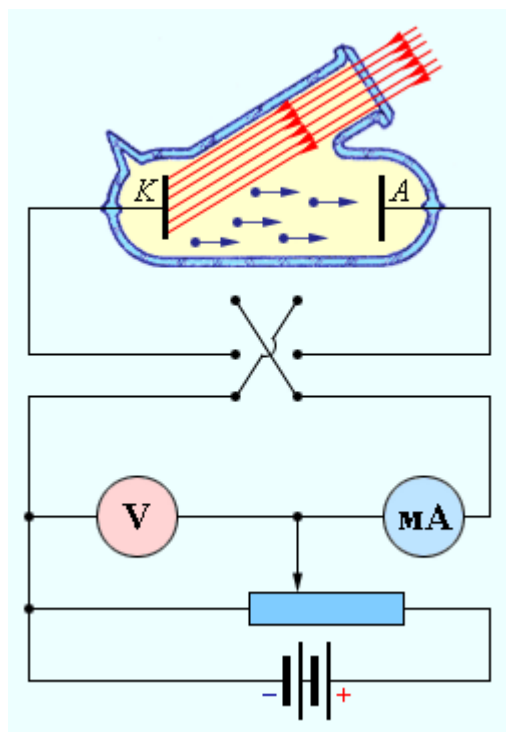


Рисунок 2.3.1.  
Схема экспериментальной установки для изучения фотоэффекта

В экспериментах использовался стеклянный вакуумный баллон с двумя металлическими электродами, поверхность которых была тщательно очищена. К электродам прикладывалось некоторое напряжение  $U$ , полярность которого можно было изменять с помощью двойного ключа. Один из электродов (катод К) через кварцевое окошко освещался монохроматическим светом некоторой длины волны  $\lambda$ . При неизменном световом потоке снималась зависимость силы фототока  $I$  от приложенного напряжения. На рис. 2.3.2 изображены типичные кривые такой зависимости, полученные при двух значениях интенсивности светового потока, падающего на катод.

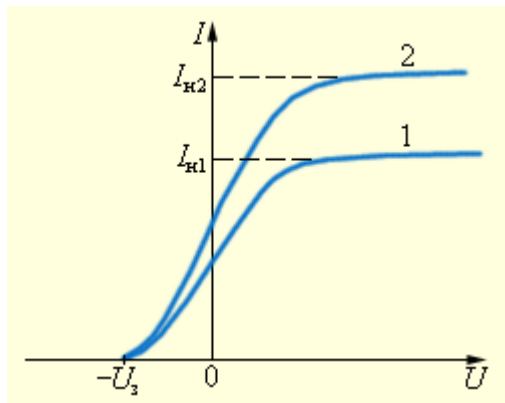


Рисунок 2.3.2.

Зависимость силы фототока от приложенного напряжения. Кривая 2 соответствует большей интенсивности светового потока.  $I_{н1}$  и  $I_{н2}$  – токи насыщения,  $U_3$  – запирающий потенциал

Кривые показывают, что при достаточно больших положительных напряжениях на аноде **А фототок достигает насыщения, так как все электроны, вырванные светом из катода, достигают анода.** Тщательные измерения показали, что ток насыщения  $I_n$  прямо пропорционален интенсивности падающего света. Когда напряжение на аноде отрицательно, электрическое поле между катодом и анодом тормозит электроны. **Анода могут достичь только те электроны, кинетическая энергия которых превышает  $|eU|$ .** Если напряжение на аноде меньше, чем  $-U_3$ , фототок прекращается. Измеряя  $U_3$ , можно определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$\left( \frac{mv^2}{2} \right)_{\max} = eU_3$$

К удивлению ученых, величина  $U_3$  оказалась независимой от интенсивности падающего светового потока. Тщательные измерения показали, что запирающий потенциал линейно возрастает с увеличением частоты  $\nu$  света (рис. 2.3.3).

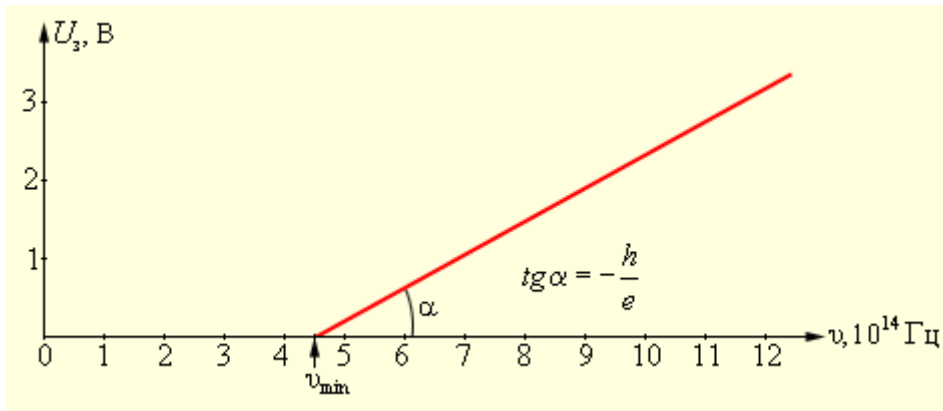


Рисунок 2.3.3.

Зависимость запирающего потенциала  $U_3$  от частоты  $\nu$  падающего света

Многочисленными экспериментаторами были установлены следующие основные закономерности фотоэффекта:

1. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты света  $\nu$  и не зависит от его интенсивности.
2. Для каждого вещества существует так называемая **красная граница фотоэффекта**, т. е. наименьшая частота  $\nu_{\min}$ , при которой еще возможен внешний фотоэффект.
3. Число фотоэлектронов, вырываемых светом из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света.
4. Фотоэффект практически **безынерционен**, фототок возникает мгновенно после начала освещения катода при условии, что частота света  $\nu > \nu_{\min}$ .

Все эти закономерности фотоэффекта в корне противоречили представлениям классической физики о взаимодействии света с веществом. Согласно волновым представлениям при взаимодействии с электромагнитной световой волной электрон должен был бы постепенно накапливать энергию, и потребовалось бы значительное время, зависящее от интенсивности света, чтобы электрон накопил достаточно энергии для того, чтобы вылететь из катода. Как показывают расчеты, это время должно было бы исчисляться минутами или часами. Однако, опыт показывает, что фотоэлектроны

появляются немедленно после начала освещения катода. В этой модели также было невозможно понять существование красной границы фотоэффекта. Волновая теория света не могла объяснить независимость энергии фотоэлектронов от интенсивности светового потока и пропорциональность максимальной кинетической энергии частоте света.

Таким образом, электромагнитная теория света оказалась неспособной объяснить эти закономерности.

Выход был найден А. Эйнштейном в 1905 г. Теоретическое объяснение наблюдаемых закономерностей фотоэффекта было дано Эйнштейном на основе гипотезы М. Планка о том, что **свет излучается и поглощается определенными порциями, причем энергия каждой такой порции определяется формулой  $E = h\nu$ , где  $h$  – постоянная Планка.** Эйнштейн сделал следующий шаг в развитии квантовых представлений. Он пришел к выводу, что **свет имеет прерывистую (дискретную) структуру. Электромагнитная волна состоит из отдельных порций – квантов, впоследствии названных фотонами.** При взаимодействии с веществом **фотон целиком передает всю свою энергию  $h\nu$  одному электрону.** Часть этой энергии электрон может рассеять при столкновениях с атомами вещества. Кроме того, часть энергии электрона затрачивается на преодоление потенциального барьера на границе металл–вакуум. Для этого электрон должен совершить работу выхода  $A$ , зависящую от свойств материала катода. Наибольшая кинетическая энергия, которую может иметь вылетевший из катода фотоэлектрон, определяется законом сохранения энергии:

$$\left( \frac{mv^2}{2} \right)_{\max} = eU_3 = h\nu - A.$$

Эту формулу принято называть уравнением Эйнштейна для фотоэффекта.

С помощью уравнения Эйнштейна можно объяснить все закономерности внешнего фотоэффекта. Из уравнения Эйнштейна следуют линейная зависимость максимальной кинетической энергии от частоты и независимость от интенсивности света, существование красной границы, безынерционность фотоэффекта. Общее число фотоэлектронов, покидающих за 1 с поверхность катода, должно быть пропорционально числу фотонов, падающих за то же время на поверхность. Из этого следует, что ток насыщения должен быть

прямо пропорционален интенсивности светового потока.

Как следует из уравнения Эйнштейна, тангенс угла наклона прямой, выражающей зависимость запирающего потенциала  $U_3$  от частоты  $\nu$  (рис. 2.3.3), равен отношению постоянной Планка  $h$  к заряду электрона  $e$ :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{e}.$$

**Это позволяет экспериментально определить значение постоянной Планка.** Такие измерения были выполнены в 1914 г. Р. Милликенем и дали хорошее согласие со значением, найденным Планком. Эти измерения позволили также определить работу выхода  $A$ :

$$A = h\nu_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}},$$

где  $c$  – скорость света,  $\lambda_{\text{кр}}$  – длина волны, соответствующая красной границе фотоэффекта. У большинства металлов работа выхода  $A$  составляет несколько электрон-вольт ( $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ). **В квантовой физике электрон-вольт часто используется в качестве энергетической единицы измерения.** Значение постоянной Планка, выраженное в электрон-вольтах в секунду, равно

$$h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}.$$

Среди металлов наименьшей работой выхода обладают щелочные элементы. Например, у натрия  $A = 1,9 \text{ эВ}$ , что соответствует красной границе фотоэффекта  $\lambda_{\text{кр}} \approx 680 \text{ нм}$ . Поэтому **соединения щелочных металлов используют для создания катодов в фотоэлементах, предназначенных для регистрации видимого света.**

Итак, законы фотоэффекта свидетельствуют, что **свет при испускании и поглощении ведет себя подобно потоку частиц, получивших название фотонов или световых квантов.**

Энергия фотонов равна

$$E = h\nu.$$

Фотон движется в вакууме со скоростью  $c$ . **Фотон не имеет массы,  $m = 0$ .** Из общего соотношения специальной теории относительности, **связывающего энергию, импульс и массу любой частицы,**

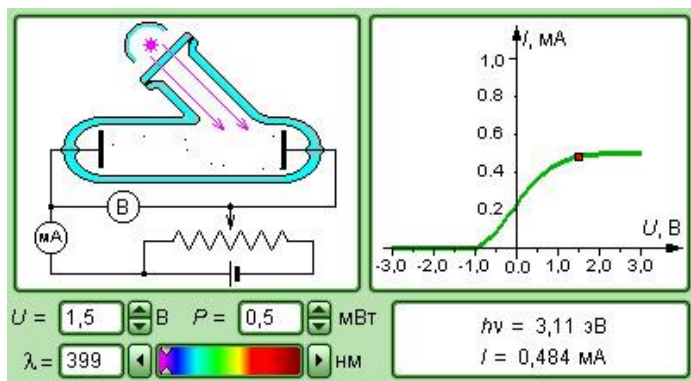
$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2,$$

следует, что **фотон обладает импульсом**

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}.$$

Таким образом, учение о свете, совершив виток длительностью в два столетия, **вновь возвратилось к представлениям о световых частицах – корпускулах.**

Но это не был механический возврат к **корпускулярной теории Ньютона**. В начале XX века стало ясно, что **свет обладает двойственной природой**. При распространении света проявляются его **волновые свойства (интерференция, дифракция, поляризация)**, а при взаимодействии с веществом – **корпускулярные (фотоэффект)**. Эта двойственная природа света получила название **корпускулярно-волнового дуализма**. **Позже двойственная природа была открыта у электронов и других элементарных частиц.** Классическая физика не может дать наглядной модели сочетания волновых и корпускулярных свойств у микрообъектов. **Движением микрообъектов управляют не законы классической механики Ньютона, а законы квантовой механики.** Теория излучения абсолютно черного тела, развитая М. Планком, и квантовая теория фотоэлектрического эффекта Эйнштейна лежат в основании этой современной науки.



Модель. Фотоэффект

## 2.4. Эффект Комптона

Концепция фотонов, предложенная А. Эйнштейном в 1905 г. для объяснения фотоэффекта, в 1922 г. получила экспериментальное подтверждение в опытах американского физика А. Комптона.

**Комптон исследовал упругое рассеяние коротковолнового рентгеновского излучения на свободных (или слабо связанных с атомами) электронах вещества.** Открытый им эффект увеличения длины волны рассеянного излучения, названный впоследствии эффектом Комптона, не укладывается в рамки волновой теории, согласно которой длина волны излучения не должна изменяться при рассеянии. Согласно волновой теории, электрон под действием периодического поля световой волны совершает вынужденные колебания на частоте волны и поэтому излучает рассеянные волны той же частоты.

Схема Комптона представлена на рис. 2.4.1. Монохроматическое рентгеновское излучение с длиной волны  $\lambda_0$ , исходящее из рентгеновской трубки R, проходит через свинцовые диафрагмы и в виде узкого пучка направляется на рассеивающее вещество-мишень P (графит, алюминий). Излучение, рассеянное под некоторым углом  $\theta$ , анализируется с помощью спектрографа рентгеновских лучей S, в котором роль дифракционной решетки играет кристалл K, закрепленный на поворотном столике. Опыт показал, что в рассеянном излучении наблюдается увеличение длины волны  $\Delta\lambda$ , зависящее от угла рассеяния  $\theta$ :

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = 2\Lambda \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

где  $\Lambda = 2,43 \cdot 10^{-3}$  нм – так называемая комптоновская длина волны, не зависящая от свойств рассеивающего вещества. В рассеянном излучении наряду со спектральной линией с длиной волны  $\lambda$  наблюдается несмещенная линия с длиной волны  $\lambda_0$ . Соотношение интенсивностей смещенной и несмещенной линий зависит от рода рассеивающего вещества.



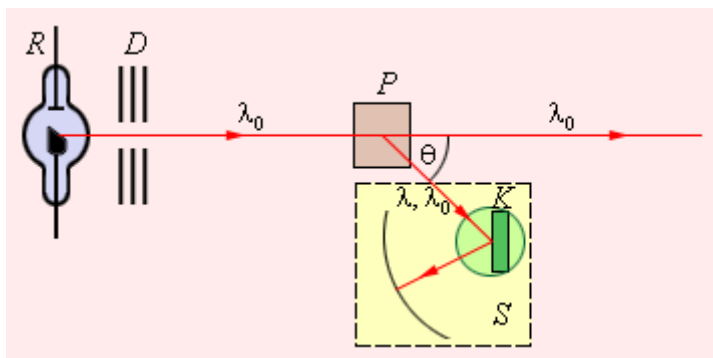


Рисунок 2.4.1.  
Схема эксперимента Комптона

На рис. 2.4.2 представлены кривые распределения интенсивности в спектре излучения, рассеянного под некоторыми углами.

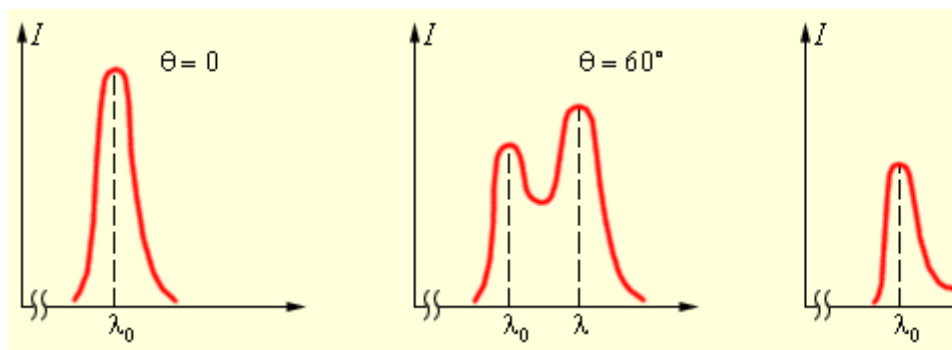


Рисунок 2.4.2.  
Спектры рассеянного излучения

Объяснение эффекта Комптона на основе квантовых представлений о природе излучения было дано в 1923 году независимо друг от друга А. Комптоном и П. Дебаем. Если **принять, что излучение представляет собой поток фотонов, то эффект Комптона есть результат упругого столкновения рентгеновских фотонов со свободными электронами вещества.** У легких атомов рассеивающих веществ электроны слабо связаны с ядрами атомов, поэтому их можно считать свободными. **В процессе столкновения фотон передает электрону часть своей энергии и импульса в**

**соответствии с законами сохранения.**

Рассмотрим упругое столкновение двух частиц – налетающего фотона, обладающего энергией  $E_0 = h\nu_0$  и импульсом  $p_0 = h\nu_0 / c$ , с

$$E_{e_0} = mc^2.$$

покоящимся электроном, энергия покоя которого равна  $mc^2$ . Фотон, столкнувшись с электроном, изменяет направление движения (рассеивается). Импульс фотона после рассеяния становится равным  $p = h\nu / c$ , а его энергия  $E = h\nu < E_0$ . **Уменьшение энергии фотона означает увеличение длины волны.** Энергия электрона после столкновения, в соответствии с релятивистской формулой,

$$E_e = \sqrt{p_e^2 c^2 + m^2 c^4},$$

становится равной  $E_e$  где  $p_e$  – приобретенный импульс электрона. Закон сохранения записывается в виде

$$E + E_{e_0} = E + E_e$$

или

$$h\nu_0 + mc^2 = h\nu + \sqrt{p_e^2 c^2 + m^2 c^4}.$$

Закон сохранения импульса

$$\vec{p}_0 = \vec{p} + \vec{p}_e$$

можно переписать в скалярной форме, если воспользоваться теоремой косинусов (см. диаграмму импульсов, рис. 2.4.3):

$$p_e^2 = \left(\frac{h\nu_0}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2}{c^2}\nu_0\nu \cos \theta.$$

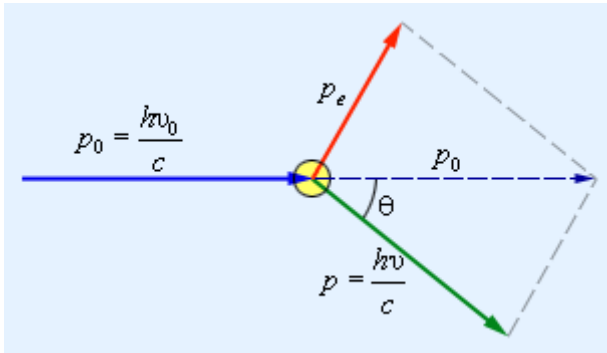


Рисунок 2.4.3.

Диаграмма импульсов при упругом рассеянии фотона на покоящемся электроне

Из двух соотношений, выражающих законы сохранения энергии и импульса, после несложных преобразований и исключения величины  $p_e$  можно получить

$$mc^2(v_0 - v) = hv_0v(1 - \cos \theta).$$

$$\left(v_0 = \frac{c}{\lambda_0}, \quad v = \frac{c}{\lambda}\right)$$

Переход от частот к длинам волн приводит к выражению, которое совпадает с формулой Комптона, полученной из эксперимента:

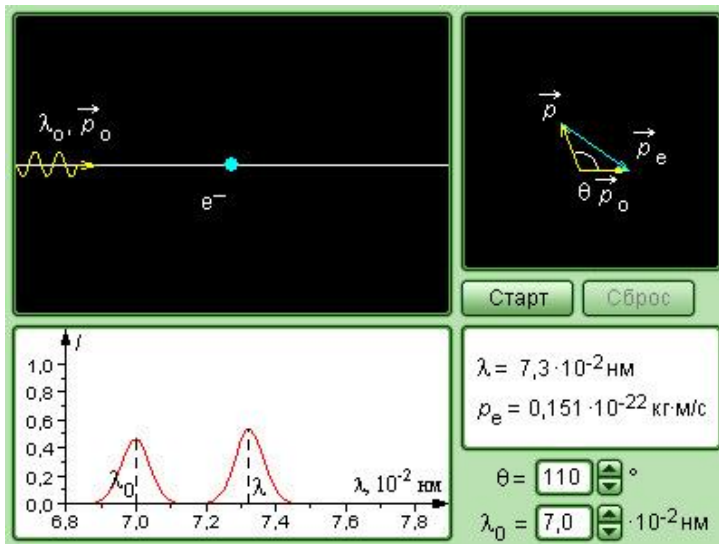
$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta) = 2\frac{h}{mc} \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

Таким образом, **теоретический расчет, выполненный на основе квантовых представлений, дал исчерпывающее объяснение эффекту Комптона и позволил выразить комптоновскую длину волны  $\Lambda$  через фундаментальные константы  $h$ ,  $c$  и  $m$ :**

$$\Lambda = \frac{h}{mc} = 2,426 \cdot 10^{-3} \text{ нм.}$$

Как показывает опыт, в рассеянном излучении наряду со смещенной линией с длиной волны  $\lambda$  наблюдается и несмещенная линия с

первоначальной длиной волны  $\lambda_0$ . Это объясняется взаимодействием части фотонов с электронами, сильно связанными с атомами. В этом случае фотон обменивается энергией и импульсом с атомом в целом. Из-за большой массы атома по сравнению с массой электрона атому передается лишь ничтожная часть энергии фотона, поэтому длина волны  $\lambda$  рассеянного излучения практически не отличается от длины волны  $\lambda_0$  падающего излучения.



Модель. Комптоновское рассеяние

## 2.5. Волновые свойства микрочастиц. Дифракция электронов

В 1923 году произошло примечательное событие, которое в значительной степени ускорило развитие квантовой физики. Французский физик Л. де Бройль выдвинул гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма. Де Бройль утверждал, что **не только фотоны, но и электроны и любые другие частицы материи наряду с корпускулярными обладают также и волновыми свойствами.**

Согласно де Бройлю, с каждым микрообъектом связаны, с одной стороны, **корпускулярные характеристики – энергия  $E$  и импульс  $p$** , а с другой стороны, **волновые характеристики – частота  $\nu$  и длина волны  $\lambda$** .

Корпускулярные и волновые характеристики микрообъектов связаны такими же количественными соотношениями, как и у фотона:

$$E = h\nu, p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Гипотеза де Бройля постулировала эти соотношения для всех микрочастиц, в том числе и для таких, которые обладают массой  $m$ . Любой частице, обладающей импульсом, сопоставлялся волновой процесс с длиной волны  $\lambda = h / p$ . Для частиц, имеющих массу,

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h\sqrt{1 - v^2/c^2}}{mv}.$$

В нерелятивистском приближении ( $v \ll c$ )

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

**Гипотеза де Бройля основывалась на соображениях симметрии свойств материи** и не имела в то время опытного подтверждения.

Но она явилась мощным революционным толчком к развитию новых представлений о природе материальных объектов. В течение нескольких лет целый ряд выдающихся физиков XX века – В. Гейзенберг, Э. Шредингер, П. Дирак, Н. Бор и другие – разработали теоретические основы новой науки, которая была названа квантовой механикой.

Первое экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля было получено в 1927 году американскими физиками К. Девиссоном и Л. Джермером. Они обнаружили, что пучок электронов, рассеивающийся на кристалле никеля, дает отчетливую дифракционную картину, подобную той, которая возникает при рассеянии на кристалле коротковолнового рентгеновского

излучения. В этих экспериментах кристалл играл роль естественной дифракционной решетки. По положению дифракционных максимумов была определена длина волны электронного пучка, которая оказалась в полном соответствии с вычисленной по формуле де Бройля.

В следующем 1928 году английский физик Г. Томсон (сын Дж. Томсона, открывшего за 30 лет до этого электрон) получил новое подтверждение гипотезы де Бройля. В своих экспериментах (рис. 2.5.1) Г. Томсон наблюдал дифракционную картину, возникающую при прохождении пучка электронов через тонкую поликристаллическую фольгу из золота.

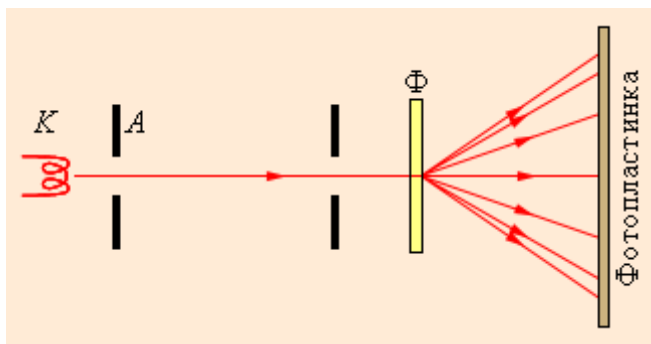


Рисунок 2.5.1.  
Упрощенная схема опытов Г. Томсона по дифракции электронов. К – накаливаемый катод, А – анод, Ф – фольга из золота

На установленной за фольгой фотопластинке отчетливо наблюдались концентрические светлые и темные кольца, радиусы которых изменялись с изменением скорости электронов (т. е. длины волны) согласно де Бройлю (рис. 2.5.2).

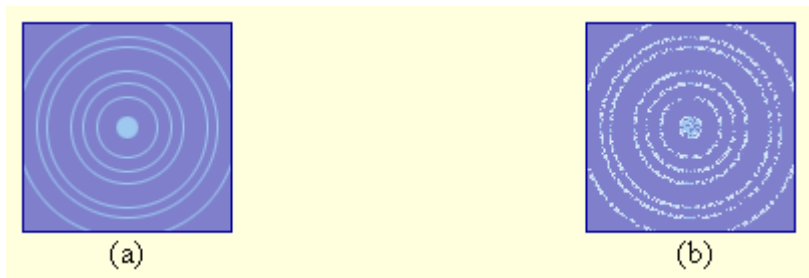


Рисунок 2.5.2.

Картина дифракции электронов на поликристаллическом образце при длительной экспозиции (а) и при короткой экспозиции (б). В случае (б) видны точки попадания отдельных электронов на фотопластинку

В последующие годы опыт Дж. Томсона был многократно повторен с неизменным результатом, в том числе при условиях, когда поток электронов был настолько слабым, что через прибор одновременно могла проходить только одна частица (В. А. Фабрикант, 1948 г.).

**Таким образом, было экспериментально доказано, что волновые свойства присущи не только большой совокупности электронов, но и каждому электрону в отдельности.**

**Впоследствии дифракционные явления были обнаружены также для нейтронов, протонов, атомных и молекулярных пучков.**

Экспериментальное доказательство наличия волновых свойств микрочастиц привело к выводу о том, что это **универсальное явление природы, общее свойство материи.** Следовательно, волновые свойства должны быть присущи и макроскопическим телам. Однако вследствие большой массы макроскопических тел их волновые свойства не могут быть обнаружены экспериментально. Например, пылинке массой  $10^{-9}$  г, движущийся со скоростью 0,5 м/с соответствует волна де Бройля с длиной волны порядка  $10^{-21}$  м, т. е. приблизительно на 11 порядков меньше размеров атомов. **Такая длина волны лежит за пределами доступной наблюдению области. Этот пример показывает, что макроскопические тела могут проявлять только корпускулярные свойства.**

Рассмотрим еще один пример. Длина волны де Бройля для электрона, ускоренного разностью потенциалов  $U = 100$  В, может быть найдена по формуле

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$$

Это нерелятивистский случай, т. к. кинетическая энергия электрона  $eU = 100$  эВ много меньше энергии покоя  $mc^2 \approx 0,5$  МэВ. Расчет дает значение  $\lambda \approx 0,1$  нм, т. е. длина волны как раз оказывается порядка размеров атомов. Для таких электронов кристаллическое вещество является хорошей дифракционной решеткой. Именно такие малоэнергичные электроны дают отчетливую дифракционную картину в опытах по дифракции электронов. В то же время такой электрон, испытавший дифракционное рассеяние на кристалле как волна, взаимодействует с атомами фотопластинки как частица, вызывая почернение фотоэмульсии в какой-то определенной точке (рис. 2.5.2).

Таким образом, подтвержденная экспериментально гипотеза де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме коренным образом изменила представления о свойствах микрообъектов.

**Всем микрообъектам присущи и волновые, и корпускулярные свойства, однако, они не являются ни волной, ни частицей в классическом понимании. Разные свойства микрообъектов не проявляются одновременно; они дополняют друг друга, и только их совокупность характеризует микрообъект полностью.** В этом заключается сформулированный знаменитым датским физиком Н. Бором **принцип дополнительности**. Можно условно сказать, что **микрообъекты распространяются как волны, а обмениваются энергией как частицы.**

С точки зрения волновой теории, максимумы в картине дифракции электронов соответствуют наибольшей интенсивности волн де Бройля. В области максимумов, зарегистрированных на фотопластинке, попадает большее число электронов. Но процесс попадания электронов в различные места на фотопластинке не индивидуален. Принципиально невозможно предсказать, куда попадет очередной электрон после рассеяния, существует лишь определенная вероятность попадания электрона в то или иное место. Таким образом, **описание состояния микрообъекта и его поведения может быть дано только на основе понятия вероятности.**

**Необходимость вероятностного подхода к описанию микрообъектов является важнейшей особенностью квантовой теории. В квантовой механике для характеристики состояний**



объектов в микромире вводится понятие **волновой функции  $\Psi$  (пси-функции)**. Квадрат модуля волновой функции  $|\Psi|^2$  пропорционален вероятности нахождения микрочастицы в единичном объеме пространства. Конкретный вид волновой функции определяется внешними условиями, в которых находится микрочастица. Математический аппарат квантовой механики позволяет находить волновую функцию частицы, находящейся в заданных силовых полях. **Безграничная монохроматическая волна де Бройля есть волновая функция свободной частицы, на которую не действуют никакие силовые поля.**

Наиболее отчетливо дифракционные явления проявляются в тех случаях, когда размеры препятствия, на котором происходит дифракция волн, соизмеримы с длиной волны. Это относится к волнам любой физической природы и, в частности, к **электронным волнам**. Для волн де Бройля естественной дифракционной решеткой является **упорядоченная структура кристалла с пространственным периодом порядка размеров атома (приблизительно 0,1 нм)**. Препятствие таких размеров (например, отверстие в непрозрачном экране) невозможно создать искусственно, но для уяснения природы волн де Бройля можно ставить мысленные эксперименты.

Рассмотрим, например, дифракцию электронов на одиночной щели ширины  $D$  (рис. 2.5.3).

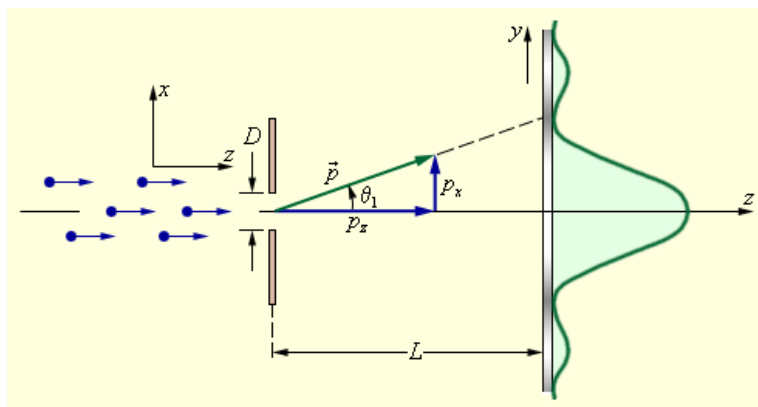


Рисунок 2.5.3.

Дифракция электронов на щели. График справа – распределение электронов на фотопластинке

Более 85 % всех электронов, прошедших через щель, попадут в **центральный дифракционный максимум**. Угловая полуширина  $\theta_1$  этого максимума находится из условия

$$D \sin \theta_1 = \lambda.$$

**Это формула волновой теории.** С корпускулярной точки зрения можно считать, что при пролете через щель электрон приобретает дополнительный импульс в перпендикулярном направлении. Пренебрегая 15 % электронов, которые попадают на фотопластинку за пределами центрального максимума, можно считать, что максимальное значение  $p_y$  поперечного импульса равно

$$p_y = p \sin \theta_1 = \frac{h}{\lambda} \sin \theta_1,$$

где  $p$  – модуль полного импульса электрона, равный, согласно де Бройлю,  $h / \lambda$ . Величина  $p$  при прохождении электрона через щель не меняется, т. к. остается неизменной длина волны  $\lambda$ . Из этих соотношений следует

$$p_y = \frac{h}{D}.$$

Квантовая механика вкладывает в это простое на вид соотношение, являющееся следствием волновых свойств микрочастицы, чрезвычайно глубокий смысл. Прохождение электронов через щель является экспериментом, в котором  $y$  – координата электрона – определяется с точностью  $\Delta y = D$ . **Величину  $\Delta y$  называют неопределенностью измерения координаты.** В то же время точность определения  $y$  – составляющей импульса электрона в момент прохождения через щель – равна  $p_y$  или даже больше, если учесть побочные максимумы дифракционной картины. **Эту величину называют неопределенностью проекции импульса и обозначают  $\Delta p_y$ .** Таким образом, величины  $\Delta y$  и  $\Delta p_y$  связаны соотношением

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq h,$$

которое называется **соотношением неопределенностей Гейзенберга.** Величины  $\Delta y$  и  $\Delta p_y$  нужно понимать в том смысле, что микрочастицы в принципе не имеют одновременно точного значения координаты и соответствующей проекции импульса. Соотношение неопределенностей не связано с несовершенством применяемых приборов для одновременного измерения координаты

и импульса микрочастицы. Оно является проявлением двойственной корпускулярно-волновой природы материальных микрообъектов. Соотношение неопределенностей позволяет оценить, в какой мере можно применять к микрочастицам понятия классической механики. Оно показывает, в частности, что **к микрообъектам неприменимо классическое понятие траектории, так как движение по траектории характеризуется в любой момент времени определенными значениями координат и скорости.** Принципиально невозможно указать траекторию, по которой в рассмотренном мысленном эксперименте двигался какой-то конкретный электрон после прохождения щели до фотопластинки.

Однако, при определенных условиях соотношение неопределенностей не противоречит классическому описанию движения тел, в том числе и микрочастиц. Например, электронный пучок в кинескопе телевизора при вылете из электронной пушки имеет диаметр  $D$  порядка  $10^{-3}$  см. В современном телевизоре ускоряющее напряжение  $U \approx 15$  кВ. Легко подсчитать импульс

$$p = \sqrt{2meU} \approx 6,6 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

электрона: Этот импульс направлен вдоль оси трубки. Из соотношения неопределенностей следует, что электронам при формировании пучка сообщается неконтролируемый импульс  $\Delta p$ , перпендикулярный оси пучка:  $\Delta p \approx h / D \approx 6,6 \cdot 10^{-29} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ .

Пусть до экрана кинескопа электроны пролетают расстояние  $L \approx 0,5$  м. Тогда размытие  $\Delta l$  пятна на экране, обусловленное волновыми свойствами электрона, составит

$$\Delta l \approx \frac{\Delta p}{p} L \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}.$$

Поскольку  $\Delta l \ll D$ , движение электронов в кинескопе телевизора можно рассматривать с помощью законов классической механики. Таким образом, **с помощью соотношения неопределенностей можно выяснить, справедливы или нет законы классической физики в тех или иных случаях.**

Рассмотрим еще один мысленный эксперимент – дифракцию электронного пучка на двух щелях (рис. 2.5.4). Схема этого эксперимента совпадает со схемой оптического интерференционного опыта Юнга.

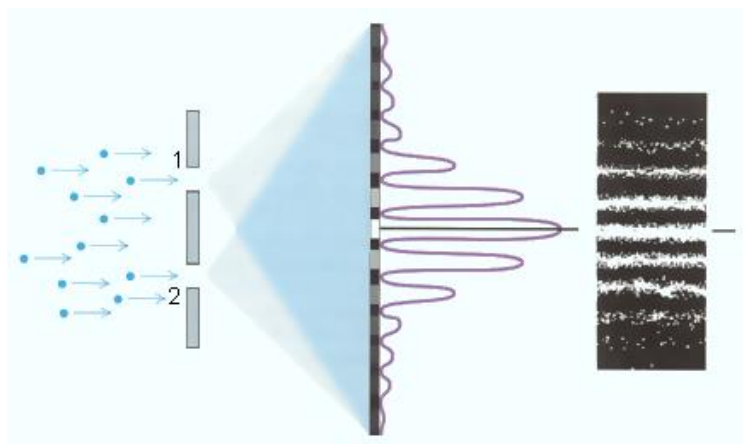


Рисунок 2.5.4.  
Дифракция электронов на двух щелях

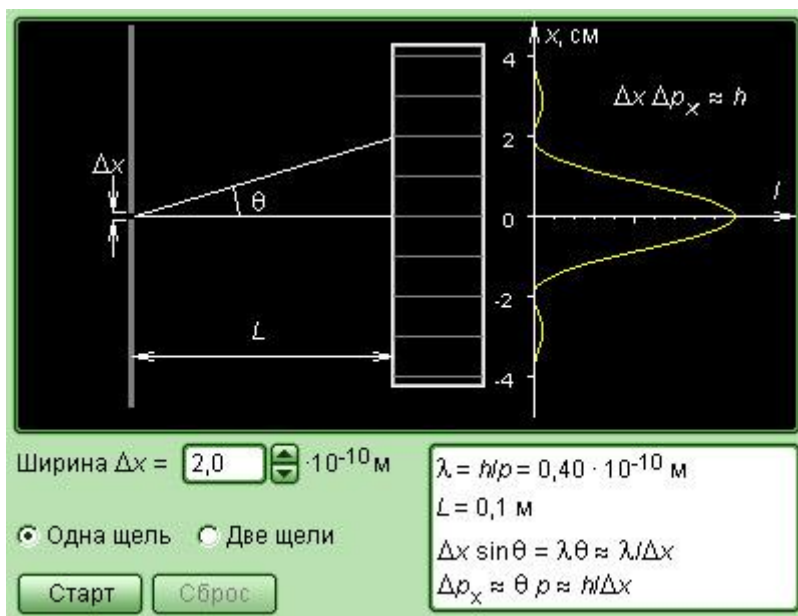
Анализ этого эксперимента позволяет проиллюстрировать логические трудности, возникающие в квантовой теории. Те же проблемы возникают при объяснении оптического опыта Юнга, исходя из концепции фотонов.

Если в опыте по наблюдению дифракции электронов на двух щелях закрыть одну из щелей, то интерференционные полосы исчезнут, и фотопластинка зарегистрирует распределение электронов, продифрагировавших на одной щели (рис. 2.5.3). В этом случае все электроны, долетающие до фотопластинки, проходят через единственную открытую щель. Если же открыты обе щели, то появляются интерференционные полосы, и тогда возникает вопрос, через какую из щелей пролетает тот или иной электрон?

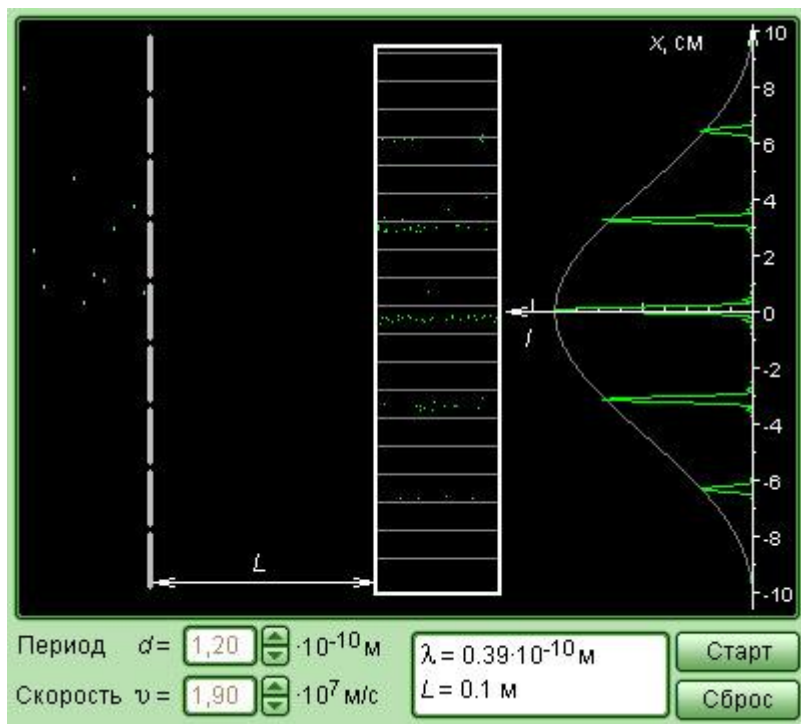
Психологически очень трудно смириться с тем, что ответ на этот вопрос может быть только один: электрон пролетает через обе щели. Мы интуитивно представляем себе поток микрочастиц как направленное движение маленьких шариков и применяем для описания этого движения законы классической физики. Но электрон (и любая другая микрочастица) обладает не только корпускулярными, но и волновыми свойствами. Легко представить, как электромагнитная световая волна проходит через две щели в оптическом опыте Юнга, т. к. волна не локализована в пространстве. Но если принять концепцию фотонов, то мы должны признать, что

каждый фотон тоже не локализован. Невозможно указать, через какую из щелей пролетел фотон, как невозможно проследить за траекторией движения фотона до фотопластины и указать точку, в которую он попадет. Опыт показывает, что даже в том случае, когда фотоны пролетают через интерферометр поштучно, интерференционная картина после пролета многих независимых фотонов все равно возникает. Поэтому в квантовой физике делается вывод: **фотон интерферирует сам с собой**.

Все вышесказанное относится и к опыту по дифракции электронов на двух щелях. Вся совокупность известных экспериментальных фактов может найти объяснение, если принять, что дебройлевская волна каждого отдельного электрона проходит одновременно через оба отверстия, в результате чего и возникает интерференция. Поштучный поток электронов тоже дает интерференцию при длительной экспозиции, т. е. **электрон, как и фотон, интерферирует сам с собой**.



Модель. Волновые свойства частиц



Модель. Дифракция электронов

## 2.6. Лучистая энергия

Свечение тел при их нагревании называется температурным или тепловым излучением. В этом случае энергия внутренних хаотических тепловых движений частиц тела (при  $T > 0^\circ \text{ K}$ ) непрерывно переходит в энергию испускаемого электромагнитного излучения. Основной количественной характеристикой теплового излучения тела является его

лучеиспускательная способность ( $e_T$ ), т.е. лучистая энергия, испускаемая единицей поверхности тела за единицу времени ( $\text{эрг}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$  или  $\text{Дж}/\text{м}^2 \cdot \text{сек} = \text{Вт}/\text{м}^2$ ) при температуре тела  $T$ . Эта энергия переносится электромагнитными волнами различной длины  $0 \leq \lambda \leq \infty$  и при изучении излучения полная лучеиспускательная способность тела ( $e_T$ ) анализируется в **различных диапазонах длин волн**. Энергия электромагнитных волн с длиной от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ , испускаемая единицей поверхности излучающего тела за единицу времени, пропорциональна величине выделенного интервала длин волн:

$$de_T = e_{\lambda,T} d\lambda$$

Коэффициент пропорциональности  $e_{\lambda,T}$  есть лучеиспускательная способность тела при данной температуре  $T$  для данной длины волны  $\lambda$ , и имеет размерность  $\text{Вт}/\text{м}^3$ . Полная лучеиспускательная способность тела ( $e_T$ ) складывается из элементарных интервалов  $de_T$ , т.е.

$$e_T = \int de_T = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} e_{\lambda,T} d\lambda$$

где интеграл распространен на весь бесконечный интервал всевозможных длин волн (Зисман, Тодес, 1970; Ландсберг, 1973, 2000; Сивухин, 2002).

С ростом температуры увеличивается интенсивность теплового движения частиц и, возрастает энергия, излучаемая телом во всем диапазоне излучаемых электромагнитных волн. При абсолютном нуле температуры  $T > 0^\circ \text{K}$  тепловое излучение отсутствует и  $e_{\lambda,0} \equiv 0$ .

При тепловом излучении энергия теплового движения в теле переходит в энергию испускаемых электромагнитных волн. При поглощении света происходит обратный процесс перехода лучистой энергии в тепловую энергию тела. **В обоих случаях взаимные превращения тепловой и лучистой энергии протекают через**

промежуточную стадию колебания электрических зарядов в теле. Поэтому лучеиспускательная и лучепоглощательная способности тела обусловлены одними и теми же деталями его строения и тесно связаны между собой. При этом отношение полной лучеиспускательной способности любого тела к его же поглощательной способности при данной температуре есть величина постоянная, равная испускательной способности абсолютно черного тела при той же самой температуре. Это соотношение было найдено в 1860 году Г. Кирхгофом (Kirchhoff). Закон, названный его именем, формулируется следующим образом. Отношение лучеиспускательной и поглощательной способности для любых тел при одинаковой их температуре  $T$  и для одной и той же длины волны  $\lambda$  одинаково и не зависит от природы этих тел. Это отношение является универсальной функцией длины волны и температуры и равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела  $E_{\lambda,T}$

$$\frac{e_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = E_{\lambda,T}$$

Поскольку для абсолютно черного тела лучепоглощение  $a = 1$  (поглощает все падающие на него лучи), а для других тел  $a_{\lambda,T} < 1$ , то из закона Кирхгофа следует весьма важное утверждение. Излучение, которое тело сильнее поглощает, сильнее и испускается. При данной температуре

$$e_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} \cdot E_{\lambda,T} < E_{\lambda,T}$$

т.е. тепловое излучение абсолютно черного тела во всех частях спектра интенсивнее, чем для нечерного тела, нагретого до той же самой температуры.

В 1878 году Й. Стефаном (Stefan), а в 1884 году Л. Больцманом (Boltzmann) была доказана пропорциональность полной лучеиспускательной способности абсолютно черного тела четвертой степени его абсолютной температуры т.е.

$$E_T = \sigma T^4$$



Это соотношение получило название закона Стефана – Больцмана.

Исследуя спектральное распределение излучения В. Вин (Wien) показал, что максимум лучеиспускательной способности находится на некоторой длине волны  $\lambda_{max}$ , которая связано с абсолютной температурой  $T$  соотношением

$$\lambda_{max} \cdot T = \text{const}$$

Таким образом, с ростом температуры максимум лучеиспускательной способности абсолютно черного тела смещается в сторону более коротких волн. Это соотношение получило название закона смещения Вина (Кондратьев, Филипович, 1960; Зисман, Годес, 1970; Ландсберг, 1973, 2000; Сивухин, 2002).

**Это законы волновой электромагнитной теории света.** Однако, физики столкнулись с проблемами при изучении излучения с короткими длинами волн («ультрафиолетовая катастрофа»), что указало на теоретические дефекты и необходимость пересмотра принципиальных положений этой теории. В 1901 году М. Планк высказал предположение о том, что **излучение испускается телами не непрерывно, но в виде отдельных порций (дискретно).** Энергия каждой такой порции – кванта излучения – пропорциональна его частоте:

$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ , где  $h$  - универсальная постоянная, одинаковая по всему спектру и получившая впоследствии название постоянной Планка ( $6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж · сек). В результате Планк получил выражение для лучеиспускательной способности абсолютно черного тела (формула Планка):

$$E_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}.$$

Согласно формуле Планка для каждой данной длины волны  $\lambda$  с

ростом температуры показатель  $\frac{hc}{\lambda kT}$  и величина, стоящая в знаменателе,  $e^{\frac{hc}{\lambda kT}}$ , убывают, а сама дробь возрастает. Следовательно, с ростом температуры возрастает и лучеиспускательная способность во всех участках спектра, но в различной степени. Из формулы Планка вытекают также законы теплового излучения Стефана – Больцмана и Вина (Кондратьев, Филипович, 1960; Кондратьев, 1954, 1965; Бакулин и др., 1966, 1983; Хргиан, 1986; Зисман, Тодес, 1970; Ландсберг, 2000; Сивухин, 2002).

## 2.7. Распространение излучения

Для пространственных задач распространения излучения существенно понятие о **телесном угле** (Перрен де Бришамбо, 1966; Зисман, Тодес, 1970; Ландсберг, 1973). Мерой телесного угла является отношение площади  $dS_0$  участка, вырезаемого конусом на поверхности сферы к квадрату ее радиуса  $r$ , т.е.  $d\omega = \frac{dS_0}{r^2}$  (рис. 1). За единицу телесного угла принят телесный угол, опирающийся на участок поверхности сферы, площадь которого равна квадрату ее радиуса ( $dS_0 = r^2$ ). Эта единица называется стерадиан (стер). Наибольший телесный угол равен, очевидно,  $4\pi$  стер (площадь всей поверхности сферы  $4\pi r^2$ ).

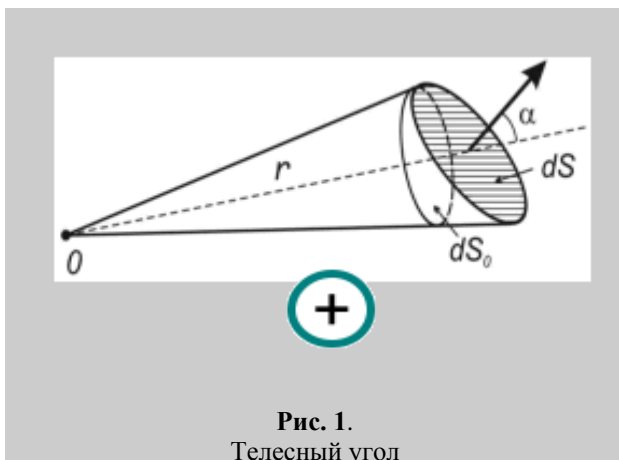


Рис. 1.  
Телесный угол

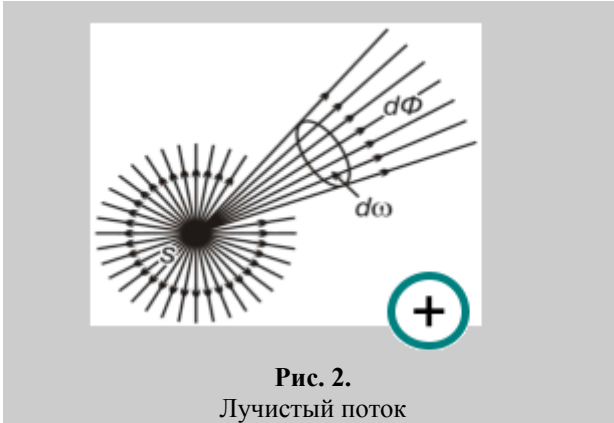


Рис. 2.  
Лучистый поток

Как видно из рисунка 1 площадка  $dS$ , нормаль к которой  $\mathbf{n}$  составляет угол  $\alpha$  с радиусом  $\mathbf{r}$ , проведенным из точки наблюдения  $O$ , видна из этой точки  $O$ , под телесным углом

$$d\omega = \frac{dS_0}{r^2} = \frac{dS \cos\alpha}{r^2} \quad (1)$$

Основной энергетической величиной излучения является лучистый поток  $\Phi$  (Миланкович, 1939; Кондратьев, 1965; Зисман, Тодес, 1970; Ландсберг, 2000) Эта величина характеризует энергию, проходящую через данную поверхность за единицу времени, и измеряется соответственно в единицах мощности (Вт, эрг/сек).

На рис. 2 изображен точечный источник  $S$  и, выделен телесный угол  $d\omega$  с вершиной в точке  $S$ .

Если обозначить лучистый поток, заключенный в телесном угле  $d\omega$ , через  $d\Phi$ , тогда соотношение  $I = \frac{d\Phi}{d\omega}$  является силой излучения точечного источника в данном направлении. Из этого соотношения следует, что сила излучения характеризуется величиной потока, заключенного в единице телесного угла, и измеряется соответственно в Вт/стер или эрг/сек · стер. Если поток, испускаемый точечным источником, равномерный во всех

направлениях, то 
$$I = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{\Phi}{4\pi} \text{ и } \Phi = 4\pi I, \quad (2)$$

где  $\Phi$  - полный лучистый поток, испускаемый источником по всем направлениям, т.е. во всем телесном угле  $\omega = 4\pi$ . Если же поток неравномерен, то формула (2) определяет среднюю силу излучения источника.

**Интенсивность излучения протяженного источника характеризуется его лучистостью.** Она численно равна силе излучения в данном направлении, создаваемой единицей площади видимой поверхности источника (измеряется в Вт/м<sup>2</sup> · стер или эрг/сек · см<sup>2</sup> · стер). Лучистость протяженного источника может быть различной в разных направлениях. Однако, для таких источников, как Солнце величина лучистости не зависит от направления наблюдения. Т.е. сила излучения (света) такого источника пропорциональна косинусу угла с нормалью (закон Ламберта) и максимальна в направлении нормали. Если поверхность испускает лучистый поток  $\Phi$  по всем направлениям (в телесном угле  $2\pi$ ), то  $\frac{\Phi}{S} = R$  лучистый поток, испускаемый единицей площади, характеризует плотность излучения (светимость) источника и измеряется в Вт/м<sup>2</sup> или эрг/см<sup>2</sup> · сек.

Понятие **облученности (освещенности)  $E$**  относится уже не к источникам излучения (света), а **характеризует интенсивность лучистой энергии, падающей на освещаемую поверхность.** Величина  $E$  численно равна величине потока, падающего на единицу освещаемой поверхности, т.е.  $E = \frac{d\Phi}{dS}$  (измеряется в Вт/м<sup>2</sup> или эрг/сек · см<sup>2</sup>).

Если произвольно ориентированная в пространстве площадка  $dS$  освещается точечным источником  $O$  (рис 1.), то согласно формуле

(1) 
$$dS = \frac{r^2}{\cos \alpha},$$
 где  $r$  – расстояние от источника до площадки,  $dS$  - угол между направлением лучей и нормалью к площадке, а  $d\omega$  - телесный угол, под которым видна площадка  $dS$  из точечного источника  $O$ . Освещенность этой поверхности

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{d\Phi \cos\alpha}{d\omega \cdot r^2} = \frac{I \cos\alpha}{r^2} \quad (3)$$

так как  $\frac{d\Phi}{dS}$  есть сила света источника  $I$ .

**Формула (3) выражает два закона освещенности:**

1. Освещенность площадки обратно пропорциональна квадрату расстояния от точечного источника (закон обратных квадратов)
2. Освещенность площадки прямо пропорциональна косинусу угла между направлением лучистого потока и нормалью к площадке (закон косинуса).

## **2.8. Пропускание излучения атмосферой**

Тепловое излучение ослабляется при прохождении через земную атмосферу вследствие поглощения и рассеяния молекулами газа, скоплениями молекул (аэрозолями), дождем, снегом, а также дымом, туманом, дымкой, смогом. Следующие молекулы (перечисленные ниже в порядке важности) поглощают инфракрасное излучение в широких полосах с центрами, соответствующими указанным длинам волн: воды (2,7; 3,2; 6,3 мкм), углекислого газа (2,7; 4,3; 15 мкм), озона (4,8; 9,6; 14,2 мкм), закиси азота (4,7; 7,8 мкм), окиси углерода (4,8 мкм) и метана (3,2; 7,8 мкм). Не считая ослабления в плотных дисперсных средах, **молекулярное поглощение является главной причиной ослабления излучения, причем наиболее сильно излучение поглощается парами воды, углекислым газом и озоном.** В нижних слоях атмосферы поглощением закисью азота и окисью углерода обычно можно пренебречь. Полосы поглощения водяного пара с центром 6,3 мкм и углекислого газа с центрами 2,7 и 15 мкм ограничивают пропускание излучения атмосферой в диапазоне длин волн 2—20 мкм, определяя положение двух окон прозрачности: 3,5—5 и 8—14 мкм.

На данной длине волны при определенном состоянии атмосферы коэффициент пропускания атмосферы определяется законом Бугера — Ламберта — Бэра

$$\tau_a(\lambda) = \exp(-\gamma(\lambda)R), \quad (2.16)$$

где  $R$  — расстояние или длина пути, а  $\gamma(\lambda)$  — показатель ослабления [10]. Показатель ослабления равен сумме показателей рассеяния  $\sigma(\lambda)$  и поглощения  $k(\lambda)$ :

$$\gamma(\lambda) = \sigma(\lambda) + k(\lambda). \quad (2.17)$$

Показатели рассеяния и поглощения в свою очередь состоят из молекулярной и аэрозольной компонент

$$\sigma(\lambda) = \sigma_m(\lambda) + \sigma_a(\lambda), \quad (2.18)$$

и

$$k(\lambda) = k_m(\lambda) + k_a(\lambda). \quad (2.19)$$

Показатель ослабления является сложной функцией  $\lambda$ , поэтому задача определения пропускания атмосферы в широком спектральном диапазоне состоит в интегрировании по всем длинам волн и по накоплению поглотителей на трассе. Средний коэффициент пропускания атмосферы в определенном диапазоне  $\lambda_1 - \lambda_2$  равен

$$\tau_a = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \exp(-\gamma(\lambda)R) d\lambda. \quad (2.20)$$

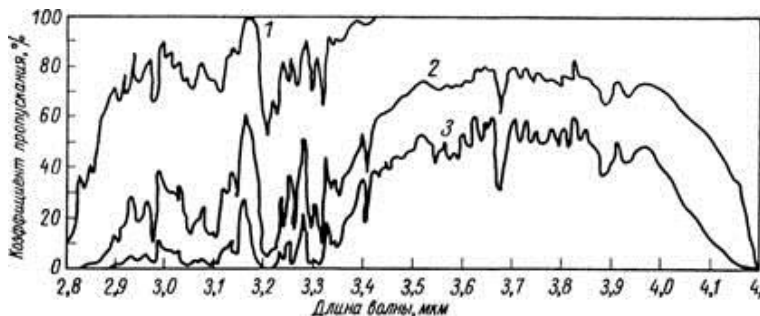


Рис. 2.10. Пропускание атмосферы в диапазоне длин волн 2,8—4,2 мкм.

1 — трасса 300 м, толщина слоя осаденной воды 0,11 см; 2 — трасса 6,3 км, толщина слоя осаденной воды 1,37 см; 3 — трасса 18,7 км, толщина слоя осаденной воды 5,2 см.

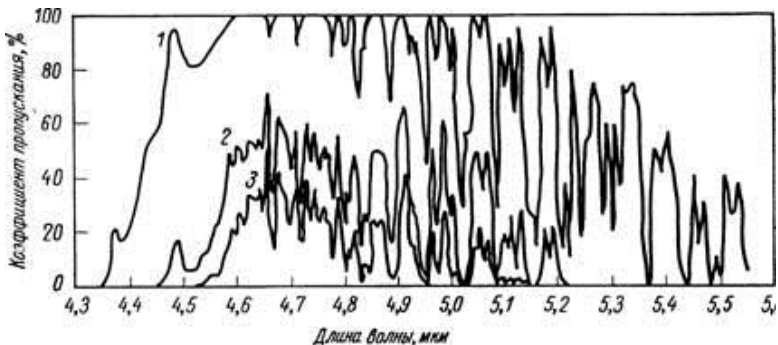


Рис. 2.11. Пропускание атмосферы в диапазоне длин волн 4,3—5,6 мкм.

1 — трасса 300 м, толщина слоя осаденной воды 0,11 см; 2 — трасса 6,3 км, толщина слоя осаденной воды 1,37 см; 3 — трасса 18,7 км, толщина слоя осаденной воды 5,2 см.

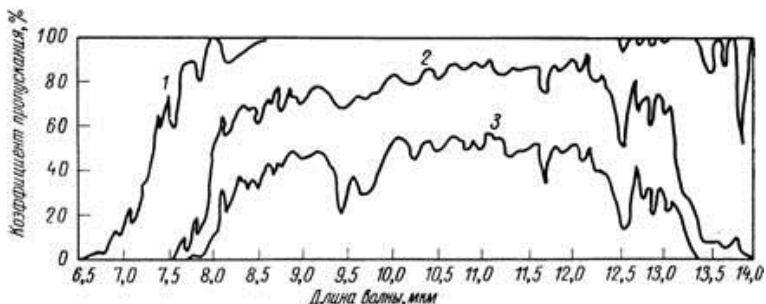


Рис. 2.12. Пропускание атмосферы в диапазоне длин волн 6,5—14 мкм

1. — трасса 300 м, толщина слоя осаденной воды 0,11 см; 2 — трасса 6,3 км, толщина слоя осаденной воды 1,37 см; 3 — трасса 18,7 км, толщина слоя осаденной воды
2. см.



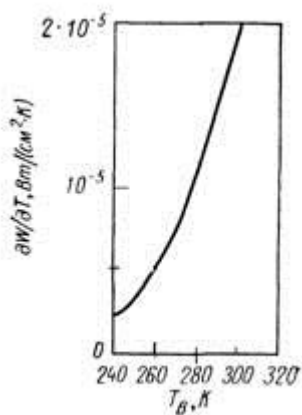


Рис. 2.6. Значения производной плотности потока излучения, соответствующей закону Планка, по температуре для диапазона 3,5—5 мкм в функции температуры фона.

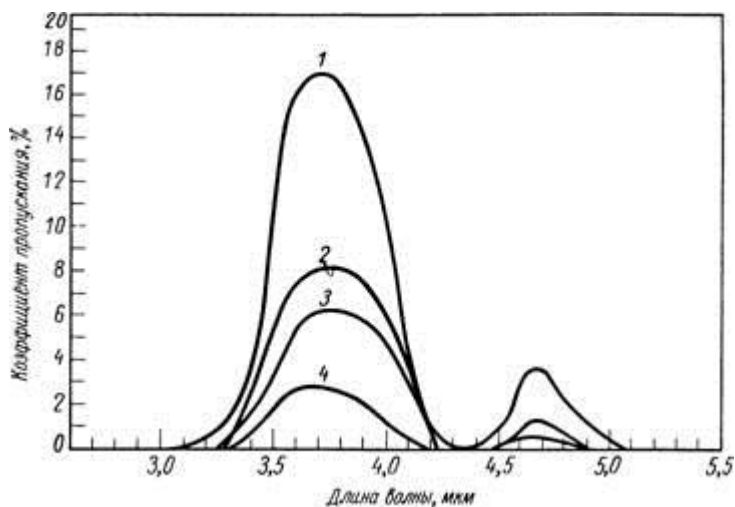


Рис. 2.13. Пропускание атмосферы в диапазоне длин волн 3—5 мкм.

Длина трассы 25 км; толщина слоя осажденной воды: 1

— 21,5 см; 2 — 25,4 см; 3 — см; 4 — 43,3 см.

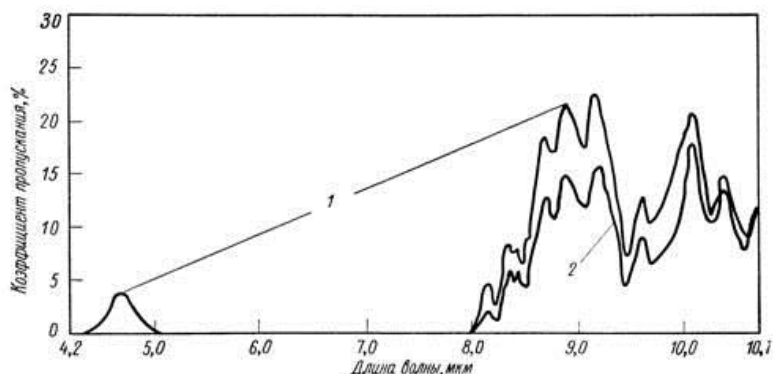


Рис. 2.14. Пропускание атмосферы в диапазоне длин волн 4,2—10,7 мкм. Длина трассы 25 км; толщина слоя осадженной воды: 1 — 21,5 см; 2 — 26,7 см.

**Поглощение молекулами газа происходит в том случае, когда колебательные и вращательные движения атомов в молекуле вызывают изменение дипольного момента. При этом энергетическое взаимодействие молекулы с электромагнитным полем может проявляться в резонансном поглощении и испускании квантов. Следовательно, изолированным симметричным молекулам, не имеющим дипольного момента, не свойственно колебательно-вращательное поглощение.**

Молекулярное поглощение в электронных зонах атомов также пренебрежимо мало. По этим причинам изолированные молекулы трех основных компонентов атмосферы — двухатомные молекулы азота и кислорода и одноатомная молекула аргона — не поглощают инфракрасного излучения. В газе, однако, происходит уширение линий поглощения, вызванное давлением. Этот эффект соответствующим образом влияет на поглощение излучения в атмосфере.

Молекулярное поглощение ослабляет пучок теплового излучения, поскольку газ переизлучает поглощенную энергию во всех

направлениях, а не только в направлении первоначального распространения. Четкое объяснение процесса молекулярного

поглощения дается Эндингом. В его работе приведено описание модели Эльзассера, статистической модели и модели Эльзассера со случайным наложением полос. Эндинг дает рекомендации по применению моделей к различным молекулярным компонентам и сравнивает результаты, полученные с помощью этих моделей, с экспериментальными данными. Молекулярное рассеяние и ослабление излучения на аэрозолях хорошо описаны в работе Макклэтчи и др. Монографии по инфракрасной технике содержат обобщающие сведения о моделях поглощения в одиночных линиях и полосах.

При высокой относительной влажности молекулы паров воды собираются в скопления, образуя аэрозоль. Такое состояние атмосферы занимает промежуточное положение между влажной атмосферой и туманом или дымкой. Используя подходящие модели молекулярного поглощения и рассеяния, а также модель рассеяния на аэрозолях, Ходжес сравнил расчетные и экспериментальные данные и выяснил, что при высокой относительной влажности ослабление практически полностью определяется поглощением на жидких аэрозолях. На небольших высотах и на умеренных расстояниях, когда концентрация паров воды мала, ослабление, по данным Ходжеса, определяется одним молекулярным поглощением. Рассеяние молекулами, аэрозолями, туманом, дымкой и облаками можно объяснить с помощью теории Ми. Теория Ми справедлива для рассеяния на малых частицах, размер которых значительно меньше длины волны (рэлеевское рассеяние), и для рассеяния на больших частицах, размер которых значительно больше длины волны (неселективное рассеяние). Поскольку рэлеевское рассеяние происходит по закону  $A\lambda^4$ , молекулярное рэлеевское рассеяние не играет существенной роли в области  $\lambda > 2$  мкм. В результате рассеяние на молекулах ( $\rho_k$ ) в этой области можно не учитывать по сравнению с поглощением; нужно принимать во внимание только рассеяние на скоплениях молекул.

Наиболее подробное рассмотрение всех источников ослабления излучения в атмосфере содержится в работе Макклэтчи и др. Их методы расчета ослабления в интервале длин волн 0,25—25 мкм основываются на следующих механизмах:

- на молекулярном поглощении в отдельных линиях для всех, основных газов;
- на молекулярном поглощении в уширенных давлением линиях паров воды;
- на молекулярном рассеянии для всех компонентов атмосферы;

на ослаблении на аэрозолях всех типов.

На рис. 2.15—2.19 приведены зависимости коэффициентов пропускания от длины волны для различных плотностей поглощающих компонентов или длины трассы для молекулярного поглощения в линиях паров воды, не уширенных давлением; для непрерывного спектра поглощения паров воды, уширенного давлением; для равномерно распределенной смеси газов; для молекулярного рассеяния и ослабления на аэрозолях. Для однородной атмосферы кривые можно использовать непосредственно. Если атмосфера неоднородна, необходимо сначала определить эквивалентную длину трассы.

Порядок определения коэффициента пропускания по кривым рис. 2.15—2.19 следующий. Соответствующая шкала коэффициента пропускания наносится на прозрачную бумагу. Совмещая заданное количество поглотителя (или длину трассы) с горизонтальной линией и передвигая шкалу на заданную длину волны, считывают значение коэффициента пропускания для этой длины волны на пересечении шкалы с кривой.

Концентрация паров воды как поглотителя выражается различными способами. Основной мерой является абсолютная влажность — масса воды в граммах на 1 см<sup>3</sup> объема воздуха, содержащего пары воды, при определенных температуре и давлении.

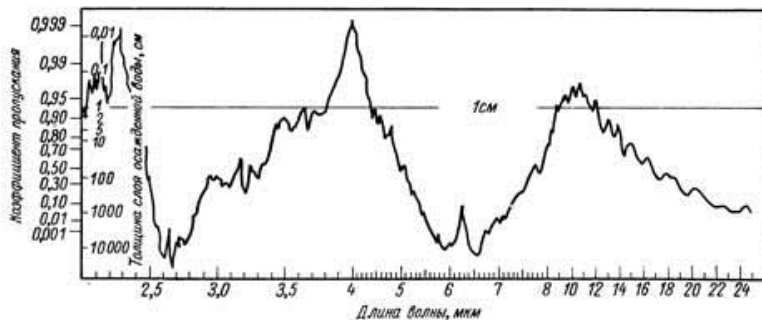


Рис. 2.15. Молекулярное пропускание паров воды в дискретных линиях.

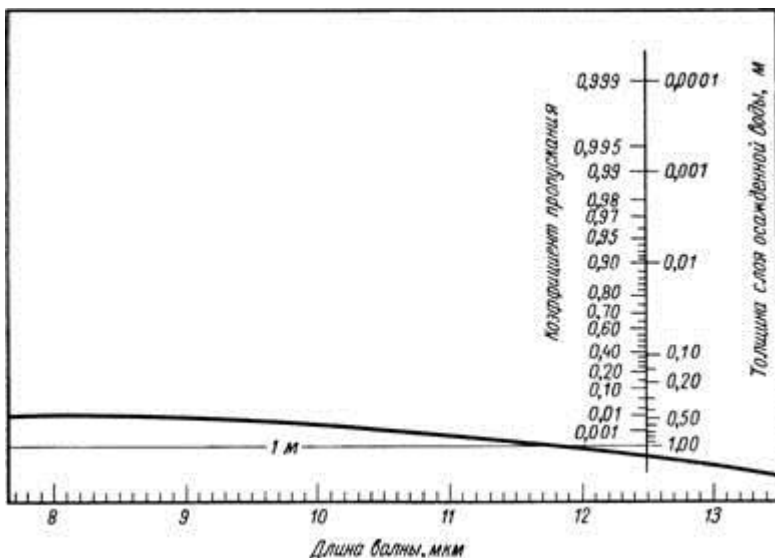


Рис. 2.16. Молекулярное пропускание паров воды в непрерывном спектре, уширенном давлением.

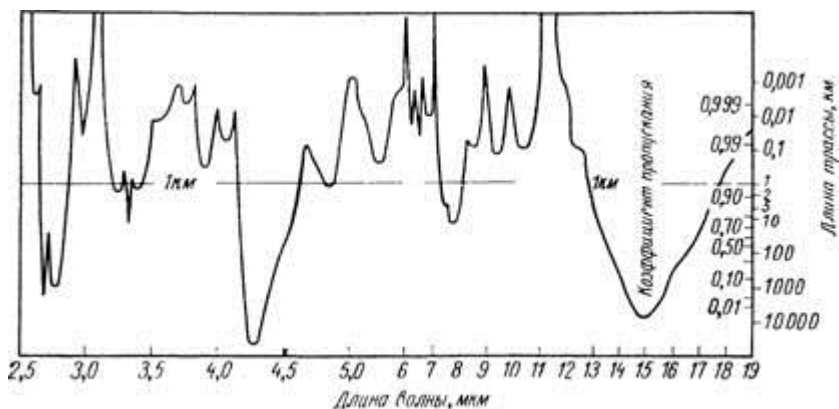


Рис. 2.17. Молекулярное пропускание равномерно распределенной смеси CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CO и CH<sub>4</sub>

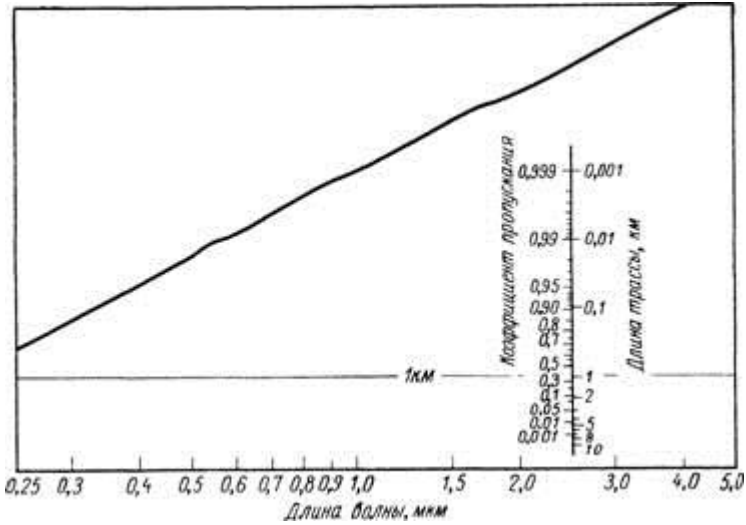


Рис. 2.18. Пропускание, обусловленное молекулярным рассеянием всех компонентов атмосферы.

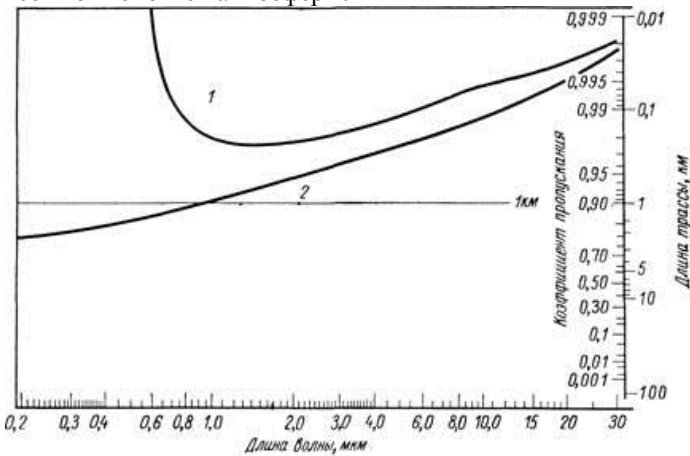


Рис. 2.19. Пропускание аэрозолей. 1 — поглощение; 2 — рассеяние.

Абсолютная влажность  $N_a$  (г/см<sup>3</sup>) является функцией парциального давления  $P$  (мм рт. ст.) паров воды и температуры  $T_a$  (К).

Абсолютная влажность насыщенного парами воды воздуха равна

$$H'_a = 2,89 \cdot 10^{-4} \frac{P}{T_a}, \quad (2.21)$$

где парциальное давление  $P$  также зависит от температуры  $T_a$ . Более простой мерой концентрации поглотителя является относительная влажность, представляющая собой отношение абсолютной влажности в определенных условиях к абсолютной влажности, соответствующей насыщенному объему при тех же условиях.

Абсолютная и относительная влажности не определяют непосредственно количество поглотителя на длине данной трассы. Мерой, определяющей суммарное поглощение на трассе, является количество осажденной воды, которое можно найти по относительной влажности и длине трассы. Количество осажденной воды  $w$  характеризуется толщиной слоя жидкой воды, образовавшейся при конденсации паров в цилиндре, длина которого равна длине трассы. Эта толщина обычно выражается в сантиметрах осажденной воды на километр трассы (см/км).

Величина  $w$  связана с плотностью жидкой воды  $d$ , относительной влажностью  $H_r$  (выраженной в долях единицы) и абсолютной влажностью  $H_a$  на следующим образом:

$$w \text{ (см/км)} = \frac{H_r H_a \text{ (г/см}^3\text{)}}{d \text{ (г/см}^3\text{)}} = \frac{10^5 H_r H_a \text{ (г/(см}^2 \cdot \text{км))}}{d \text{ (г/см}^3\text{)}} = 10^5 \frac{H_r H_a}{d} \text{ (см/км)}. \quad (2.22)$$

Поскольку плотность воды  $d$  приблизительно постоянна и равна  $1 \text{ г/см}^3$ , то

$$w = 10^5 H_r H_a \text{ (см/км)}. \quad (2.23)$$

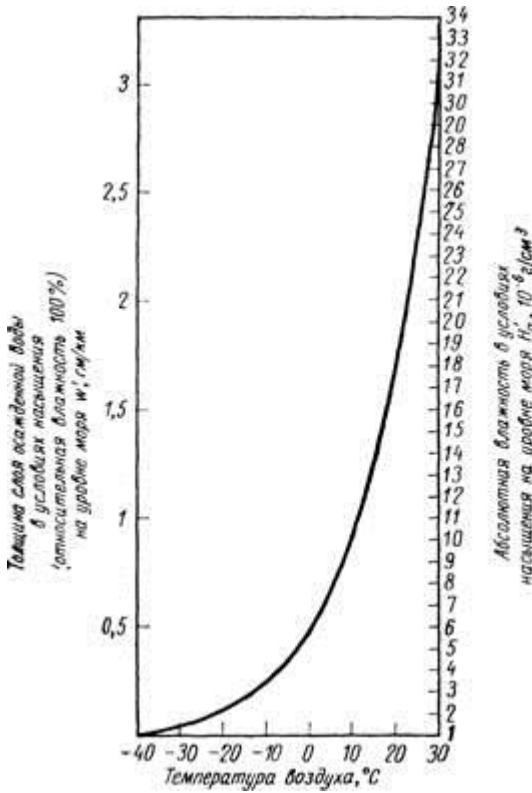


Рис. 2.20. Количество осаждаемой воды (см/км) и абсолютная влажность в условиях насыщения в зависимости от температуры.

Полное количество осаждаемой воды на трассе  $wT$  выражается в сантиметрах. Если абсолютная и относительная влажности на трассе постоянны, полное количество осаждаемой воды получается умножением величины  $w$  (см/км) на длину трассы  $R$  (км). На фиг. 2.20 показаны толщина слоя осаждаемой воды и абсолютная влажность в условиях насыщения в функции температуры.

Потери на поглощение, равные 0,1 $\beta$ 7 при  $wT = 0$ , обусловлены ослаблением излучения другими компонентами атмосферы. Для окна 3—5 мкм не выявляется столь явной зависимости от  $wT$ . Это



связано с тем, что в окне 3—5 мкм поглощение углекислым газом проявляется в большей степени, чем в окне 8—14 мкм.

## 3. Теория линейной фильтрации

### 3.1. Области применения

В практике использования методов тепловидения в СИИ часто требуется описать реакцию системы на различные сигналы, оценить пространственное разрешение, разработать схемы для повышения качества изображения. **Математический аппарат, применяемый для этих целей,— теория линейной фильтрации, являющаяся ветвью фурье-анализа, используемого для изучения реакции на сигнал линейных инвариантных устойчивых систем.** Теорию линейной фильтрации можно применять к оптическим, оптико-электронным, механическим и электронным системам. Разработанная первоначально для описания электрических цепей и следящих систем, эта теория была распространена затем на оптические системы. **Теория линейной фильтрации является частью теории анализа изображения и необходима при разработке и оценке любой тепловизионной системы.** Определяя систему, Гудмен считает основным ее признаком **способность преобразовывать ряд входных функций в ряд выходных функций.** Будем рассматривать здесь только системы однозначных функций или взаимно однозначных преобразований, т. е. системы с шумами исключаются из рассмотрения. Нарис. 3.1 показана система координат и применяемые обозначения.

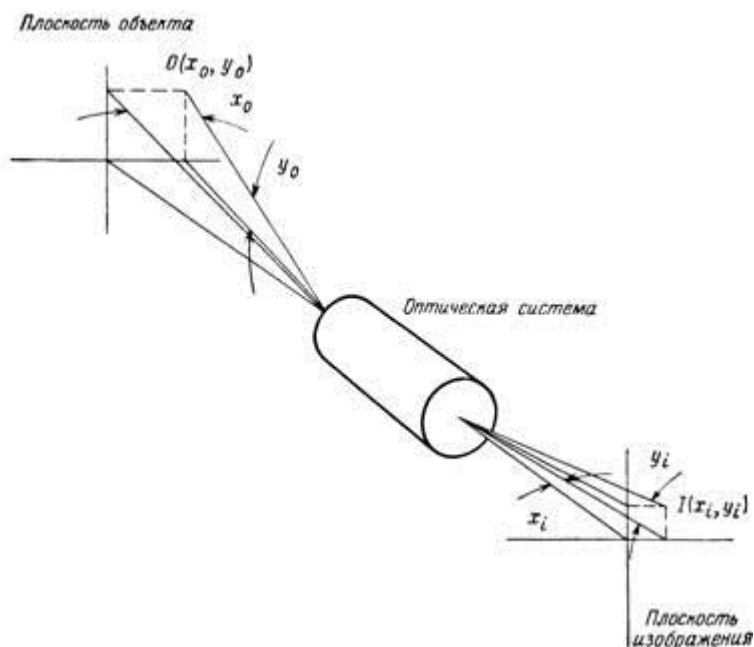


Рис. 3.1. Пространственные координаты в плоскости объекта и изображения.

Точка в пространстве объектов определяется угловыми координатами  $(x_0, y_0)$ , отсчитываемыми от оптической оси. Координаты  $(x_i, y_i)$  в плоскости изображения для системы без искажений определяются соотношениями  $x_i = Mx_0$  и  $y_i = My_0$ , где  $M$  — угловое увеличение.

Теория линейной фильтрации применима только к таким оптическим системам, которые преобразуют распределение яркости объекта в распределение яркости изображения в результате свертки. В большинстве изображающих систем в максимально возможной степени осуществляются процессы свертки, так как именно эти процессы обеспечивают изображение наилучшего качества. Следовательно, понимание сущности процессов свертки является весьма важным; нужно также уметь отличать процессы, не подчиняющиеся закономерностям свертки.

### 3.2. Интеграл свертки

Рассмотрим процесс в цепи при действии на ее входе сигнала произвольной формы  $f_1(t)$  (рис. 3.2). Этот сигнал можно представить в виде последовательности прямоугольных импульсов длительностью  $\Delta x$  с амплитудами  $f_1(k\Delta x)$ .

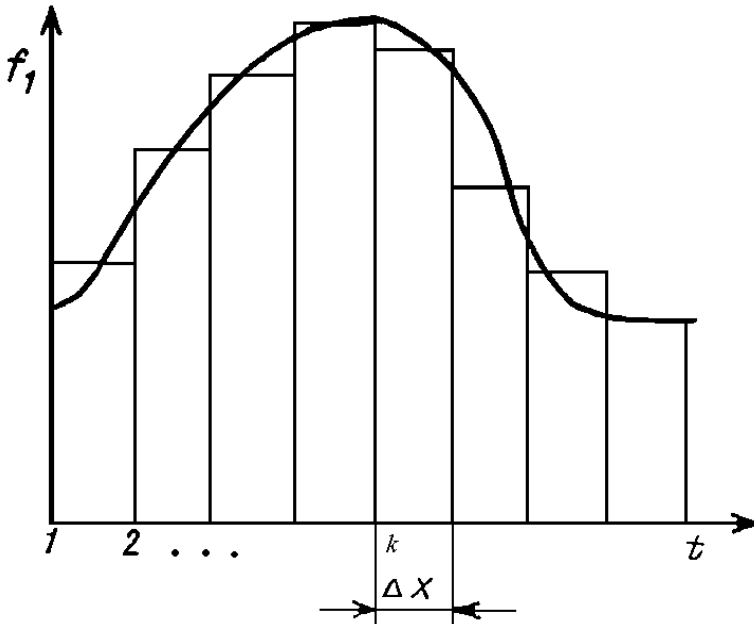


Рис. 3.2

При малых значениях  $\Delta x$  каждый такой импульс эквивалентен действию на цепь  $\delta$ -импульса, включаемого в момент  $t = k\Delta x$  и имеющего площадь  $f_1(k\Delta x) \Delta x$ . Поэтому входной сигнал представим

$$f_1 \approx \sum_{k=1}^n f_1(k \Delta x) \Delta x \delta(t - k \Delta x)$$

в виде суммы

. После перехода к

$$f_1(t) = \int_0^t f_1(x) \delta(t-x) dx$$

пределу при  $\Delta x \rightarrow 0$ ,  $k\Delta x \rightarrow x$  получим

Поскольку реакция цепи на каждый  $\delta$ -импульс описывается импульсной характеристикой  $h_\delta$ , то для выходной величины  $f_2(t)$  можно записать аналогичный интеграл, в котором реакция на входной импульс  $\delta(t-x)$  выражена как  $h_\delta(t-x)$ :

$$f_2(t) = \int_0^t f_1(x) h_\delta(t-x) dx$$

Полученный интеграл называется *интегралом свертки* и используется при вычислении реакции цепи  $f_2(t)$  на воздействие  $f_1(t)$  произвольной формы. Он и является основой временного метода расчета переходных процессов.

Рассмотрим двумерный объект, энергетическая яркость которого описывается распределением  $O(x_0, y_0)$  в координатах  $(x_0, y_0)$  в пространстве объектов. Действие изображающей системы на объект обозначим оператором  $S \{ \}$ . Тогда распределение яркости в пространстве изображения будет  $S \{ O(x_0, y_0) \}$ .

Система называется линейной, если для любых двух функций  $O_1(x_0, y_0)$ ,  $O_2(x_0, y_0)$ , взвешенных по любым комплексным полярным постоянным  $c$  и  $d$ , выполняется условие

$$S \{ cO_1(x_0, y_0) + dO_2(x_0, y_0) \} = cS \{ O_1(x_0, y_0) \} + dS \{ O_2(x_0, y_0) \}. \quad (3.4)$$

Следствием линейности системы является возможность представления функции распределения яркости объекта в виде ряда более простых функций или в пределе в виде интеграла. Чтобы быть уверенным, что это важное упрощение возможно, ограничим рассмотрение системами, которые являются или могут быть аппроксимированы линейными операторами во времени и пространстве, воздействующими на представляющие интерес сигналы.

В общем случае **функции распределения яркости объекта являются четырехмерными функциями пространства и времени**, однако при анализе обычно считают, что глубина не имеет значения, и описывают объекты функциями двух угловых пространственных координат и одной временной координаты. Функцию распределения яркости объекта удобно разложить на комбинацию взвешенных дельта-функций Дирака, используя так называемое фильтрующее свойство дельта-функции  $\delta(x)$ . Математически это записывается в двух измерениях в виде

$$O(x_o, y_o) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta) \delta(x_o - \xi) \delta(y_o - \eta) d\xi d\eta, \quad (3.2)$$

а геометрическая интерпретация дана на рис. 3.3.

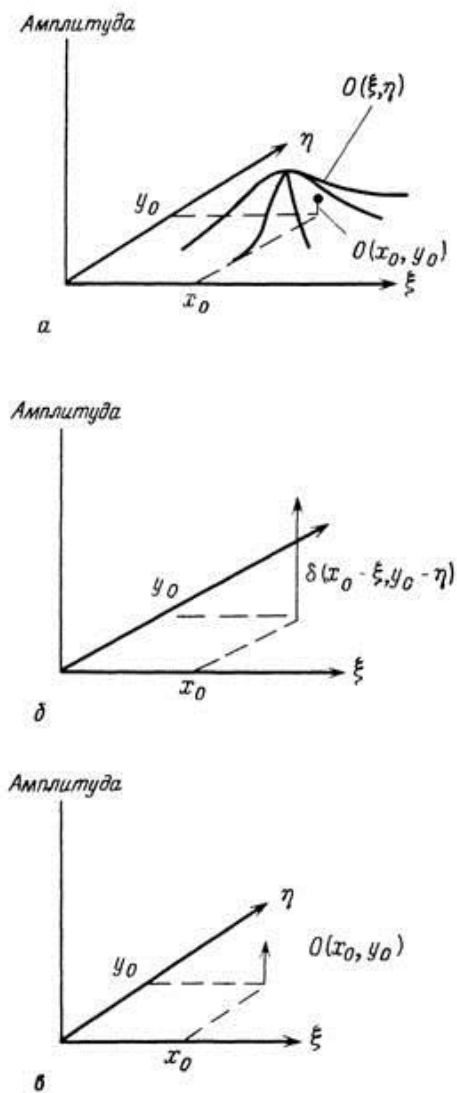


Рис. 3.3. Фильтрующее свойство дельта-функции.  
 а — распределение яркости объекта; б — дельта-функция; в —  
 интеграл от произведения распределения яркости объекта на дельта-  
 функцию.

Смысл рассматриваемого интеграла заключается в том, что любую функцию можно представить как бесконечную сумму взвешенных и смещенных дельта-функций.

Распределение яркости изображения  $I(x_i, y_i)$  определяется следующим образом:

$$I(x_i, y_i) = S\{O(x_o, y_o)\} = S\left\{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta) \delta(x_o - \xi) \delta(y_o - \eta) d\xi d\eta\right\}. \quad (3.3)$$

Предполагая, что выполняется свойство линейности, получаем

$$I(x_i, y_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta) S\{\delta(x_o - \xi) \delta(y_o - \eta)\} d\xi d\eta. \quad (3.4)$$

Таким образом, функция распределения яркости изображения представляет собой взвешенную сумму реакций системы на дельта-функции, являющиеся компонентами объекта.

Функция  $S\{\delta(x_o - \xi) \delta(y_o - \eta)\}$  называется **функцией рассеяния точки или импульсной реакцией системы**. Соотношение (3.4) называется **интегралом суперпозиции**, так как функция  $I(x_i, y_i)$  выражается как интеграл от наложенных друг на друга реакций на дельта-функцию, соответствующих бесконечно малым пространственным интервалам. В теории электромагнитного поля количественным аналогом функции рассеяния точки является функция Грина для точечного заряда или источника тока, а в теории электрических цепей — реакция на импульс тока или напряжения.

Обобщим записанный результат на трехмерный случай, полагая, что временная задержка реакции на входной сигнал пренебрежимо мала:

$$I(x_i, y_i, t) = S\{O(x_o, y_o, t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta, t') S\{\delta(x_o - \xi) \delta(y_o - \eta) \delta(t - t')\} d\xi d\eta dt'. \quad (3.5)$$

(3.5)

Интеграл суперпозиции упрощается в случае пространственной инвариантности системы, т. е. если импульсная реакция системы не зависит от времени и положения импульса  $l$ ). Полагая для простоты увеличение  $M$  равным единице, получим



$$S \{ \delta(x_0 - \xi) \delta(y_0 - \eta) \delta(t - t') \} = S \{ \delta(x_i - \xi) \delta(y_i - \eta) \delta(t - t') \} \stackrel{\Delta}{=} r(x_i, y_i, t; \xi, \eta, t'). \quad (3.6)$$

(3.6)

Приведенный ниже графический пример показывает, что интеграл суперпозиции приобретает упрощенную форму, называемую **интегралом свертки**, в случае, когда система пространственно инвариантна, т. е. когда форма импульсной реакции  $g$  не меняется при смещении относительно осей координат. Рассмотрим распределение яркости объекта и функцию рассеяния, показанные на рис. 3.4.

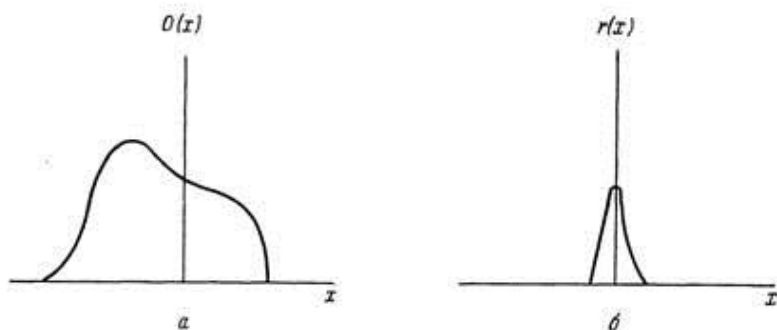


Рис. 3.4. Распределение яркости объекта (а) и функция рассеяния (б).

Распределение яркости изображения можно найти, разлагая распределение яркости объекта на взвешенные дельта-функции, заменяя каждую из этих дельта-функций функцией рассеяния и производя суммирование, как показано на рис. 3.5.

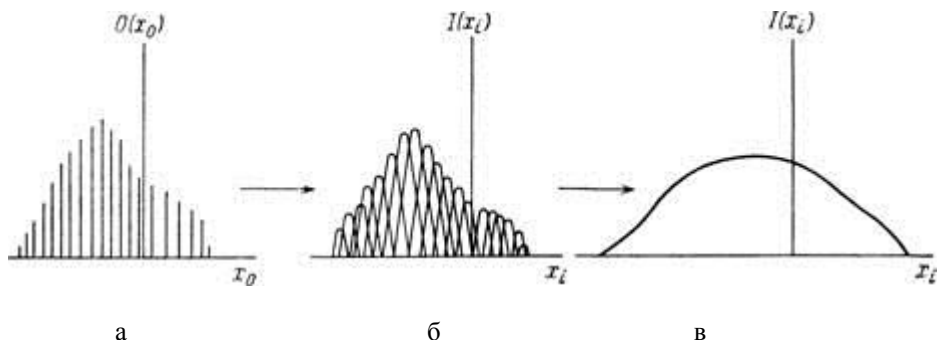


Рис. 3.5. Построение функции распределения яркости изображения путем разложения функции распределения яркости объекта (а), замены дельтафункций взвешенными функциями рассеяния (б) и суммирования (в).

В действительности системы тепловидения с кадровой разверткой не инвариантны во времени, поскольку данная точка объекта создает сигнал только в течение малого промежутка общего времени. Однако мы рассматриваем действие системы при наблюдении интегрирующим во времени прибором, таким как **зрительный аппарат человека**. Следовательно, **когда объект неподвижен относительно системы можно считать, что система инвариантна во времени**.

Таким образом, ординату распределения яркости изображения в точке  $x_i$  находят, суммируя вклады в точке  $x_i$  от импульсов реакций с центрами в  $x_i - \xi$ , взвешенных по величине  $O$  во всех точках  $\xi$ . Математически это записывается в виде

$$I(x_i) = \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi) r(x_i - \xi) d\xi. \quad (3.7)$$

Выражение (3.7) является интегралом свертки, для которого применяется краткое обозначение

$$I(x) = O(x) * r(x). \quad (3.8)$$

Другая, правда, не очевидная на первый взгляд, возможность убедиться в этом — учесть, что для определенного  $x_i$  переменной в уравнении (3.7) является  $\xi$  и  $r(x_i - \xi) = r[-(\xi - x_i)]$  есть зеркальное отражение  $r(\xi)$  с центром в  $x_i$ . Тогда интеграл свертки может быть интерпретирован (рис.3.6) как интеграл от произведения распределения яркости объекта на смещенное зеркальное отражение функции рассеяния. Ясно, что

$$r(x_i, y_i, t; \xi, \eta, t') = r(x_i - \xi, y_i - \eta, t - t') \quad (3.9)$$

как из приведенных выше соображений, так и потому, что функция  $r$  должна быть инвариантной при параллельном смещении относительно осей координат. Тогда для трехмерного случая интеграл свертки запишется в виде

$$I(x_i, y_i, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta, t') r(x_i - \xi, y_i - \eta, t - t') d\xi d\eta dt' = \\ = O(x_i, y_i, t) * r(x_i, y_i, t). \quad (3.10)$$

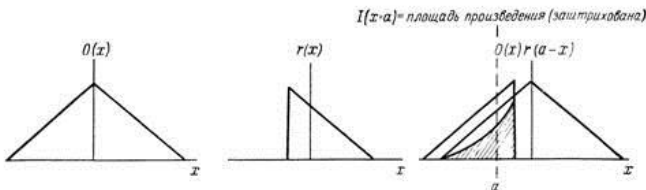


Рис. 3.6.

Свертка.

**Интеграл Дюамеля.** Интеграл свертки можно выразить через переходную характеристику. Это приводит к интегралу Дюамеля. Для его получения используем записанную связь  $h_s = dh/dt$ , из которой произведение  $h_s(t-x) dx$  можно представить как  $-dh(t-x)$ :

$$f_2(t) = \int_{-0}^{t+0} f_1(x) h_s(t-x) dx = - \int_{-0}^{t+0} f_1(x) dh(t-x) = \\ = -f_1(x) h(t-x) \Big|_{-0}^{t+0} + \int_{-0}^{t+0} \frac{df_1}{dx} h(t-x) dx$$

В последнем преобразовании использована формула интегрирования по частям. Так как внеинтегральный член равен нулю, то окончательно получим

$$f_2(t) = \int_{-0}^{t+0} f_1'(x) h(t-x) dx,$$

где  $f_1'(x) = df_1/dx$ .

Неудобство этого выражения связано с  $\delta$ -слагаемыми в  $f_1'$ , которые появляются, если входной сигнал  $f_1(t)$  имеет разрывы. При наличии разрыва в точке  $t = 0$  [ $f_1(-0) = 0, f_1(+0) \neq 0$ ], его можно выделить и записать

$$f_2(t) = f_1(0)h(t) + \int_{+0}^{t+0} f_1'(x)h(t-x)dx$$

Последнее выражение является наиболее распространенной формой записи интеграла Дюамеля.

Если входная функция  $f_1$  имеет разрывы, то для расчета переходного процесса временным методом удобнее использовать интеграл свертки, если она непрерывна, то — интеграл Дюамеля (при неограниченной характеристике  $h_\delta$ ).

При выполнении расчетов временным методом следует обращать внимание на: 1) различное аналитическое описание функции  $f_1$  на различных отрезках у импульсов сложной формы; 2) правильный учет неограниченного характера функции  $h_\delta$  (при вычислении интегралов с  $\delta$ -слагаемыми); 3) правильный учет разрывов функции  $f_1$  в интеграле Дюамеля.

### 3.3. Преобразование Фурье

В одномерном случае прямое преобразование Фурье определяется формулой

$$F\{O(x)\} = \int_{-\infty}^{\infty} O(x) e^{-2\pi i x f_x} dx \triangleq \tilde{O}(f_x). \quad (3.11)$$

Пространственная частота  $f_x$  (пространство описывается декартовыми координатами) является аналогом обычной временной или электрической, частоты  $f^*$ . Частота  $f^*$  измеряется в герцах, а пространственная частота  $f_x$  — в единицах мрад<sup>-1</sup>. Смысл пространственной частоты ясен из рис. 3.7, на которой показано синусоидальное изменение интенсивности источника света с пространственным угловым периодом  $\theta_x$ .

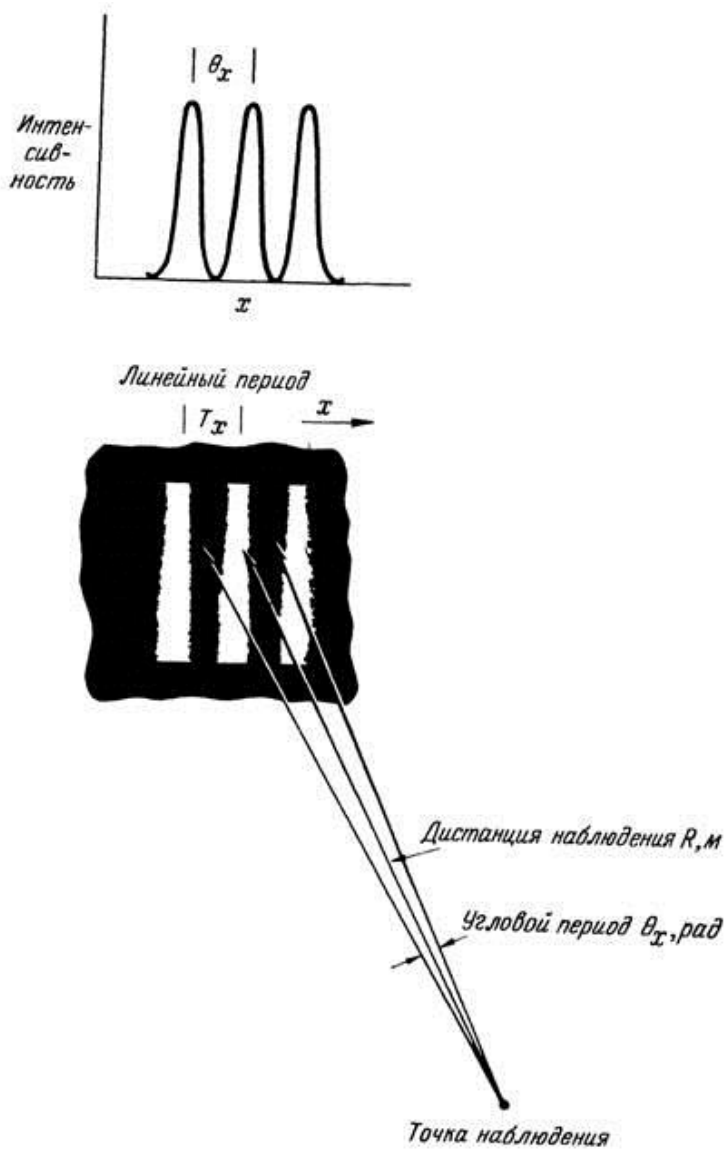


Рис.3.7. Пространственная частота.

Источник рассматривается с достаточно большого расстояния /?, чтобы можно было приближенно считать

$$\theta_x = 2 \sin \frac{T_x}{2R} \approx \frac{T_x}{R}. \quad (3.12)$$

На рис. 3.8 показана связь пространственных частот в плоскостях объекта и изображения с угловым увеличением для случая наблюдения изображения на экране.

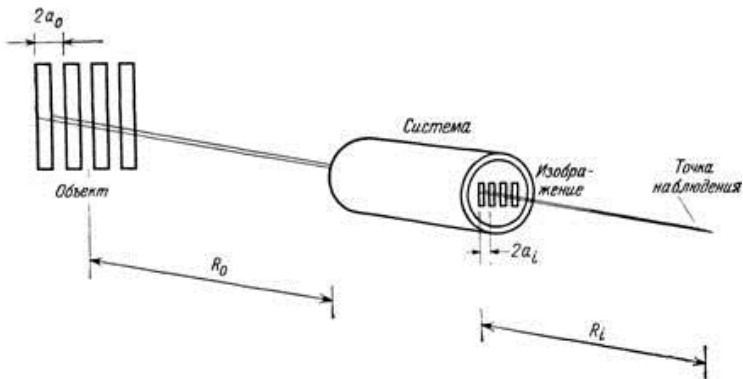


Рис. 3.8. Угловое увеличение.

Периоды тест-объекта и его изображения равны соответственно  $2a_0/R_0$  и  $2a_i/R_i$  пространственные частоты составляют  $R_0/2a_0$  и  $R_i/2a_i$ . Угловое увеличение  $M$  равно

$$M = R_0 a_i / R_i a_0. \quad (3.13)$$

В трех измерениях

$$F \{O(x, y, t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(x, y, t) e^{-2\pi i (xf_x + yf_y + tf_t)} dx dy dt \triangleq \tilde{O}(f_x, f_y, f_t). \quad (3.14)$$

Обратное преобразование имеет вид

$$F^{-1} \{\tilde{O}(f_x)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{O}(f_x) e^{2\pi i x f_x} df_x = O(x) \quad (3.15)$$

для одномерного случая и

$$F^{-1}\{\bar{O}(f_x, f_y, f_t)\} = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{O}(f_x, f_y, f_t) e^{2\pi i(xf_x + yf_y + tf_t)} df_x df_y df_t \stackrel{\Delta}{=} O(x, y, t) \quad (3.16)$$

для трехмерного случая.

Последовательно проведенные прямое и обратное преобразования дают исходную функцию, т. е.

$$F^{-1}\{F\{O(x)\}\} = O(x).$$

### 3.4. Теорема свертки и оптическая передаточная функция

Когда система осуществляет ряд последовательных сверток и приходится иметь дело со сложным объектом и различными функциями рассеяния, процесс трудно проанализировать и представить себе наглядно. Теорема свертки в фурье-анализе позволяет перейти в область частот, где эти операции производить намного легче. Теорема гласит, что преобразование Фурье-свертки двух функций равно произведению преобразований этих функций. Применительно к уравнению (3.10), описывающему изображение, эта теорема записывается в виде.,

$$F\{O \star r\} = F\{O\} \cdot F\{r\}. \quad (3.17)$$

Соответствующее сокращенное обозначение имеет вид

$$\bar{I} = \bar{O} \cdot \bar{r}. \quad (3.18)$$

Преобразование Фурье  $r$  импульсной реакции  $r$  называется оптической передаточной функцией (ОПФ). Если каждая компонента системы линейна и не зависит от других компонент, то реакция системы в целом  $r_s$  есть результат ряда сверток

$$r_s = r_1 \star r_2 \star \dots \star r_n. \quad (3.19)$$

Тогда в соответствии с теоремой свертки для получения ОПФ системы нужно перемножить последовательные передаточные функции



$$\tilde{r}_s = \prod_{m=1}^n \tilde{r}_m, \quad (3.20)$$

и спектр изображения оказывается равным

$$\tilde{I} = \tilde{O} \prod_{m=1}^n \tilde{r}_m. \quad (3.21)$$

Таким образом, сложную операцию многократных сверток можно заменить более простой операцией нахождения обратного преобразования произведения преобразований свертываемых функций. Это позволяет также представить процесс получения изображения как селективное взвешивание системой спектра пространственных частот объекта в частотной области (рис. 3.9).

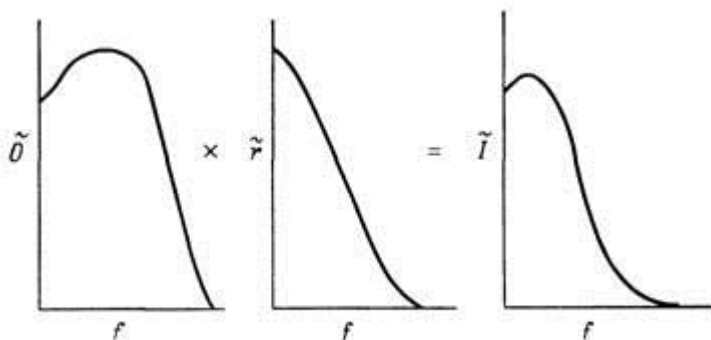


Рис. 3.9. Ослабление частот объекта модуляционной передаточной функцией (МПФ) в зависимости от пространственной частоты  $f$ .

Таким образом, ОПФ есть мера способности изображающей системы воспроизводить пространственные частоты, содержащиеся в картине.

ОПФ — комплексная функция, модуль, или абсолютная величина, которой является модуляционной передаточной функцией (МПФ). (В отечественной литературе модуляционная передаточная функция (МПФ) обычно называется частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ), а в переводах — функцией передачи модуляции (ФПМ). В данном случае используется название модуляционная передаточная

функция (МПФ) по аналогии с оптической передаточной функцией (ОПФ).)

МПФ представляет собой амплитуду реакции системы на синусоидальную волну. Значение этой функции условно принято за единицу при нулевой частоте или близкой к ней.

Аргумент оптической передаточной функции в радианах называется **фазовой передаточной функцией (ФПФ)** и определяет фазовый сдвиг пространственной частоты, вносимый системой. Комплексное выражение ОПФ имеет вид

$$\text{ОПФ}(f) = \text{МПФ}(f) e^{i \text{ФПФ}(f)}, \quad (3.22)$$

Многие из теоретических положений, относящихся к ОПФ и содержащихся в литературе по оптическим и телевизионным системам, применимы и к **системам тепловидения**, если выполняются следующие условия: **1) излучение воспринимается некогерентно; 2) обработка сигнала линейна; 3) воспроизведение изображения — пространственно инвариантный процесс; 4) преобразование, осуществляемое системой, однозначно (в частности, происходит без шумов)**. Последние три условия в тепловизорах обычно нарушаются. В инфракрасной оптической системе не выполняется условие пространственной инвариантности, если импульсная реакция меняется от центра к краю поля зрения из-за аберраций и если сканирование нелинейно во времени, в результате чего электрические фильтры будут иметь различные значения ОПФ на одной и той же частоте в различных участках поля зрения. Линейка чувствительных элементов приемника излучения осуществляет периодическую выборку в направлении, перпендикулярном направлению сканирования, поэтому преобразование изображения не подчиняется закономерностям свертки. Каждый приемник имеет шумы, из-за чего нарушается условие однозначности преобразования. Аналоговые электронные схемы вносят как шумы, так и нелинейность. Нелинейное сжатие можно специально использовать в канале обработки видеосигнала для улучшения динамического диапазона системы. Преобразование электрического сигнала оптическим индикатором также может быть нелинейным.

Кроме того, системы тепловидения могут отличаться от других оптических и оптико-электронных приборов по следующим **четырем причинам**. Во-первых (и это наиболее важно), в тепловизоре уровень, соответствующий средней яркости картины,

обычно вычитается из видеосигнала и на экране индикатора отображаются только изменения яркости относительно среднего уровня, к которым добавляется по желанию любой постоянный сигнал. Во-вторых, производя формирование сигнала с помощью электронной системы или используя специальные индикаторные устройства, можно получить функции рассеяния с отрицательными амплитудами и МПФ с амплитудой, большей единицы, что вносит определенную специфику при оценке ОПФ. В-третьих, различные рабочие точки квазилинейной системы могут иметь разные ОПФ. В-четвертых, изображение может образовываться в результате процесса выборки, не обеспечивающего достаточной фильтрации, так что ОПФ проявляет себя только в направлении, перпендикулярном направлению выборки.

Поэтому, когда мы говорим об ОПФ тепловизионного прибора, то вводим, по существу, довольно ненадежную систему оценки. **Тем не менее целесообразно принять эту систему как средство конструирования, анализа и описания тепловизионных приборов, так как ОПФ является удобным мерилom качества изображающей системы.** В связи с этим при анализе, описании и экспериментальном определении ОПФ требуется максимум предосторожностей, чтобы убедиться, что все указанные выше отклонения от необходимых для существования ОПФ условий устранены или учтены.

Поскольку во многих системах тепловидения не выполняются условия существования ОПФ во всех направлениях, часто необходимо иметь функцию рассеяния в направлении, где условия выполняются. Это приводит к определению функции рассеяния линии (ФРЛ), которая представляет собой реакцию на источник в виде длинной, бесконечно тонкой линии, составленной из ряда следующих друг за другом дельта-функций. Такой линейный источник содержит пространственные частоты только в направлении, перпендикулярном длине линии, причем присутствуют все пространственные частоты от нуля до бесконечности с амплитудами, равными единице (рис. 3.10).

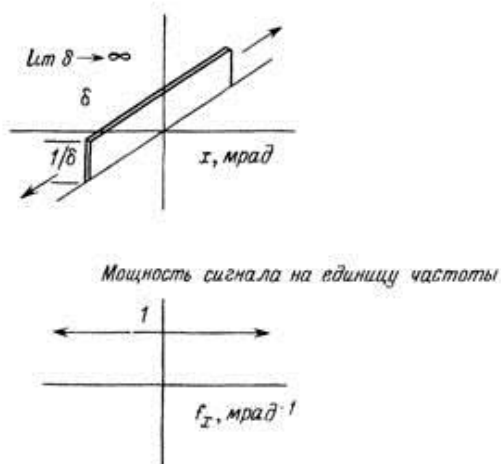


Рис. 3.10. Линейный источник и его спектр.

Поэтому преобразование Фурье от функции рассеяния линии одномерно.

Так как сигнал, соответствующий этой линии, проходит через каждую компоненту системы, частотный состав сигнала селективно ослабляется. Изображение на выходе не соответствует точно сигналу на входе, наблюдается размытие изображения линии. Пример ФРЛ, МПФ и ФПФ для системы тепловидения в направлении сканирования приведен на рис. 3.11.

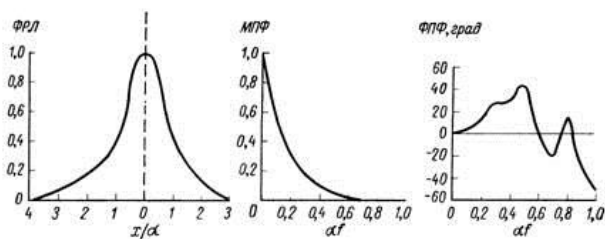


Рис. 3.11. Функция рассеяния линии (ФРЛ), модуляционная передаточная функция (МПФ) и фазовая передаточная функция (ФПФ).

Заметим, что асимметрия ФРЛ указывает на наличие фазового сдвига. В системах тепловидения основной вклад в ФРЛ и МПФ обычно дает конечный угловой размер приемника излучения  $\alpha$ , поэтому координату  $x$  можно выразить в единицах  $\alpha$ , а частоту — в единицах  $1/\alpha$ .

Фурье-анализ в оптике, за немногими исключениями, аналогичен анализу Лапласа в теории электрических цепей. Как указал О'Нейл, временные фильтры имеют два существенных отличия от пространственных. Во-первых, временные фильтры являются односторонними во времени и должны удовлетворять требованию физической осуществимости, т. е. изменения на выходе временного фильтра не могут проявиться раньше, чем они возникли на входе. Оптические же фильтры являются двусторонними в пространстве. Как показано во многих книгах по математике и теории электрической фильтрации, вследствие этой разницы становится целесообразным использовать при анализе временных фильтров одностороннее преобразование Лапласа, а не преобразование Фурье. Во-вторых, электрические сигналы могут быть положительными и отрицательными, в то время как интенсивность оптического сигнала всегда положительна.

### **3.5. Применение операции свертки к процессам воспроизведения изображения**

Поскольку теория линейной фильтрации является широко используемым средством анализа изображения, часто имеет смысл аппроксимировать процессы, не подчиняющиеся закономерностям свертки (несвертываемые процессы) процессами, подчиняющимися закономерностям свертки (свертываемые процессы), так чтобы отклонения от истинного поведения были незначительными. Например, процесс получения изображения, характеризующийся умеренной пространственной неинвариантностью, может быть аппроксимирован свертываемым процессом по малым участкам поверхности объекта, называемым изопланатическими зонами. Изображение, образованное выборками свертки, большей частью будет достаточно хорошо отфильтровано, что делает процесс выборки близким к свертываемому. Аналогично влиянием небольших шумов и нелинейности обычно можно пренебречь. Один из наиболее важных свертываемых процессов при получении теплового изображения — разложение изображения путем

сканирования приемником излучения. Рассмотрим рис. 3.12, где квадратный приемник с размерами  $a \times a$  сканирует плоскость изображения  $(x, y)$ , причем середина линии сканирования соответствует  $y = y'$ .



Рис. 3.12. Сканирующий приемник излучения

Если приемник имеет равномерную по поверхности чувствительность и мгновенно интегрирует все падающее излучение, обеспечивая получение единого электрического сигнала, то при сканировании сигнал в точке  $x, y'$  определяется величиной  $I(x, y')$  и зависит от распределения энергии в плоскости изображения  $O(x, y)$  следующим образом:

$$I(x', y') = \int_{x' - (a/2)}^{x' + (a/2)} \int_{y' - (a/2)}^{y' + (a/2)} O(x, y) dx dy. \quad (3.23)$$

Определим теперь импульсную реакцию приемника  $r(x)$  как

$$r_1(x) = 1 \text{ при } -\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}, \\ r(x) = 0 \text{ для всех остальных } x. \quad (3.24)$$

При сканировании  $x$  принимает непрерывный ряд значений  $x'$ , а  $y$  все время остается равным  $y'$ . Соответственно можно переписать уравнение (3.23) в виде

$$I(x', y') = \int_{y' - (a/2)}^{y' + (a/2)} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} O(x, y) r(x' - x) dx \right] dy. \quad (3.25)$$

Интеграл в скобках представляет собой свертку; таким образом, процесс является свертываемым в направлении сканирования. Интеграл по  $y$  указывает на пространственную неинвариантность,

так что в направлении, перпендикулярном сканированию, процесс является несвертываемым. Хорошо знакомый пример такого типа сканирования для получения изображения — телевизионное вещание. Можно привести множество других примеров несвертываемых процессов получения изображения. Строго говоря, к ним следует отнести и зрение, поскольку используется конечное число приемников и разрешение падает от центра к краю поля зрения. Полутоновая газетная фотография — также несвертываемый процесс, поскольку в каждой точке он по интенсивности бинарный. Следовательно, это процесс одновременно нелинейный и не обладающий пространственной инвариантностью. Обычная фотография является нелинейным процессом, кроме того при проявлении наблюдаются эффекты соседства, что приводит к нарушению пространственной инвариантности. Однако такие процессы могут рассматриваться и как свертываемые, если выбран соответствующий масштаб или анализируются только ограниченные площади.

### **3.6. Сокращенная система обозначений в фурье-анализе**

Прежде чем обратиться к рассмотрению конкретных импульсных реакций и их преобразований полезно остановиться на системе обозначений в фурье-анализе. Во многих задачах для описания процессов формирования изображения в области частот **используются ряды и интегралы Фурье**, записанные в явной форме. К сожалению, такие соотношения часто трудно наглядно представить, с ними трудно манипулировать в сложных задачах, когда приходится свертывать или перемножать множество функций. Дело значительно упрощается, если использовать сокращенную систему обозначений, введенную Брейсуэллом и Гудменом. **Эта система содержит два элемента — математические операторы и пары преобразований основных функций**.

В предыдущих разделах было показано, что оператор двумерного преобразования Фурье определяется формулой

$$F \{g(x, y)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp[-2\pi i(xf_x + yf_y)] dx dy = \tilde{g}(f_x, f_y). \quad (3.26)$$

Свертка двух функций  $f(x, y)$  и  $g(x, y)$  обозначается  $f * g$ , где

$$f(x, y) * g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x - \xi, y - \eta) g(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (3.27)$$

Свертки применяются также к частотным функциям и обладают свойствами ассоциативности, коммутативности и дистрибутивности. Скалярное произведение обозначается знаком  $\bullet$ , например  $f \bullet g$ .

Операции свертки и умножения представляют собой пары преобразований; таким образом,

$$F \{f \bullet g\} = F \{f\} \bullet F \{g\}. \quad (3.28)$$

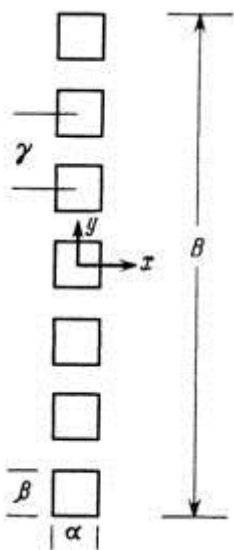
Основные функции, применяемые в тепловидении, представлены на рис. 3.13 в мнемоническом виде; даны их определения, графическое представление и преобразования Фурье.

Функция	Определение	Графическое представление	Преобразование Фурье
$\delta(x)$	$= 1, x=0$ $= 0, x \neq 0$ для всех $y$		$\delta(f_x)$
$\delta(y)$	$= 1, y=0$ $= 0, y \neq 0$ для всех $x$		$\delta(f_y)$
$\delta(x)\delta(y)$	$= 1, xy=0$ $= 0, xy \neq 0$		1
$\text{Rect}(\frac{x}{a})$	$= 1, \frac{ x }{a} < \frac{1}{2}$ $= 0, \frac{ x }{a} > \frac{1}{2}$ для всех $y$		$\text{Sinc}(af_x)\delta(f_y)$

Рис. 3.13. Линейка чувствительных элементов приемника излучения.

Всякий раз, когда процесс получения изображения подвергается временной фильтрации, будем рассматривать только стационарные картины и, не оговаривая особо, производить преобразование координат в область пространственных частот, так что необходимо только двумерное преобразование.





дельта-функции Дирака

$$f(a) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x-a) dx$$

(3.29)

представлено в виде

$$f(a) = \delta(a) f(x). \quad (3.30)$$

Чтобы понять на простом примере, как используются обозначения, рассмотрим традиционную линейку чувствительных элементов приемника излучения, показанную на фиг. 3.13. Отдельные элементы приемника описываются выражением  $\text{Rect}(x/\alpha) \cdot \text{Rect}(y/\beta)$ , бесконечно длинная линейка описывается выражением  $[\text{Rect}(x/\alpha) \cdot \text{Rect}(y/\beta)] * [\text{Comb}(y/\gamma) \cdot \delta(x)]$ , а линейка конечной длины ограничивается выражением  $\text{Rect}(y/B)$ . Таким образом, линейка, изображенная на фиг. 3.13, полностью описывается выражением

$$\{[\text{Rect}(x/\alpha) \cdot \text{Rect}(y/\beta)] * [\text{Comb}(y/\gamma) \cdot \delta(x)]\} \cdot \text{Rect}(y/B).$$

Выполняя последовательные преобразования, получаем

$$\begin{aligned} F \{ \{ [\text{Rect}(x/\alpha) \cdot \text{Rect}(y/\beta)] * [\text{Comb}(y/\gamma) \cdot \delta(x)] \} \cdot \text{Rect}(y/B) \} = \\ = F \{ \{ [\text{Rect}(x/\alpha) \cdot \text{Rect}(y/\beta)] * [\text{Comb}(y/\gamma) \cdot \delta(x)] \} * F \{ \text{Rect}(y/B) \} \} = \\ = [F \{ \text{Rect}(x/\alpha) \cdot \text{Rect}(y/\beta) \}] \cdot F \{ \text{Comb}(y/\gamma) \cdot \delta(x) \} * F \{ \text{Rect}(y/B) \}. \end{aligned}$$

При использовании приведенных выше пар преобразований полученное выражение сводится к виду

$$\{ \text{Sinc}(\alpha f_x) \cdot \text{Sinc}(\beta f_y) \cdot \text{Comb}(\gamma f_y) \} * \text{Sinc}(B f_y).$$

Данный пример показывает порядок обычно проводимых манипуляций»

### **3.7. Оптические передаточные функции типичных элементов**

Полезными аппроксимациями функций рассеяния, присущих обычным элементам систем изображения, являются следующие три функции. Это, во-первых, двумерная прямоугольная функция  $[\text{Rect}(x/\alpha) \cdot \text{Rect}(z/\beta)]$ , профиль которой по оси  $x$  показан на рис. 3.14. В первом приближении можно полагать, что такую пространственную импульсную реакцию имеют чувствительные элементы прямоугольной формы. В действительности чувствительность приемника излучения может описываться далеко не прямоугольной функцией, однако точно контролировать форму функции при изготовлении приемника обычно не представляется возможным и

большей частью принимают указанное первое приближение. Если сканирование производится только в направлении  $x$ , то ОПФ приемника излучения есть преобразование  $\text{Rect}(x/a)$  и является действительной функцией вида

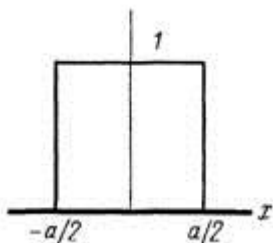
$$\tilde{r}_d = \sin(\pi\alpha f_x) / \pi\alpha f_x = \text{Sinc}(\alpha f_x). \quad (3.31)$$

Таблица 3.1

Значения  $\sin(\pi\alpha f) / \pi\alpha f$  и  $[\sin(\pi\alpha f) / \pi\alpha f]^2$

$\alpha f$	$\frac{\sin(\pi\alpha f)}{\pi\alpha f}$	$[\frac{\sin(\pi\alpha f)}{\pi\alpha f}]^2$	$\alpha f$	$\frac{\sin(\pi\alpha f)}{\pi\alpha f}$	$[\frac{\sin(\pi\alpha f)}{\pi\alpha f}]^2$
0	1	1	1	0	0
0,05	0,996	0,992	1,05	-0,047	0,002
0,1	0,984	0,968	1,1	-0,089	0,008
0,15	0,963	0,928	1,15	-0,126	0,016
0,2	0,935	0,875	1,2	-0,156	0,024
0,25	0,900	0,810	1,25	-0,180	0,032
0,3	0,858	0,737	1,3	-0,198	0,039
0,35	0,810	0,657	1,35	-0,210	0,044
0,4	0,757	0,573	1,4	-0,216	0,047
0,45	0,699	0,488	1,45	-0,217	0,047
0,5	0,637	0,405	1,5	-0,212	0,045
0,55	0,572	0,327	1,55	-0,202	0,041
0,6	0,505	0,255	1,6	-0,189	0,036
0,65	0,436	0,190	1,65	-0,172	0,030
0,7	0,368	0,135	1,7	-0,151	0,023
0,75	0,300	0,090	1,75	-0,129	0,017
0,8	0,234	0,055	1,8	-0,078	0,006
0,85	0,170	0,029	1,9	-0,052	0,003
0,9	0,109	0,012	1,95	-0,025	0,001
0,95	0,052	0,003	2,0	0	0

Рис. 3.14. Профиль пространственной импульсной реакции прямоугольного приемника излучения.



Значения этой функции и ее квадрата приведены в табл. 3.1 и представлены графически на рис. 3.15.

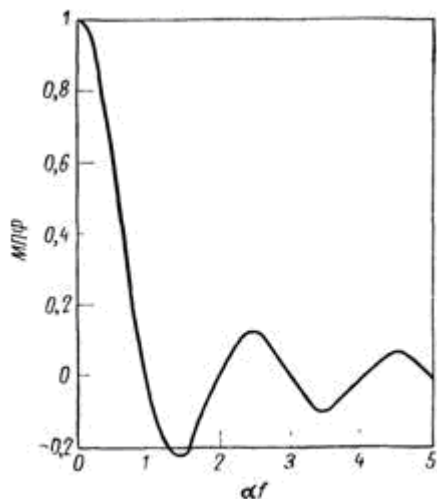


Рис. 3.15. МПФ в виде Sinc-функции.

Прямоугольная функция может также описывать прямоугольные элементы индикаторных устройств, например светодиоды или ячейки газоразрядных индикаторных панелей.

Вторая употребительная функция рассеяния — двумерное гауссово распределение; в простейшем случае это гауссоида с круговой симметрией, сечение которой по оси  $x$  показано на рис. 3.16.

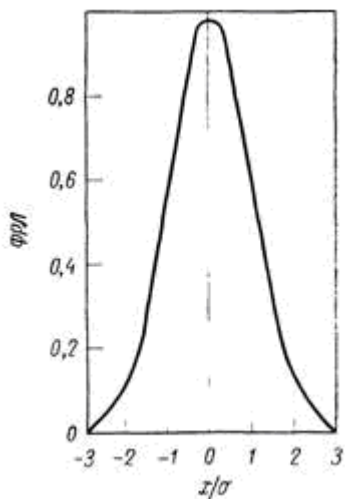


Рис. 3.16. Обобщенная ФРЛ в виде гауссоиды.

Функция рассеяния имеет следующий вид:

$$r(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3.32)$$

а соответствующие выражения для ОПФ — вид

$$\tilde{r}_x = e^{-2\pi^2\sigma^2 f_x^2} \quad \text{и} \quad \tilde{r}_y = e^{-2\pi^2\sigma^2 f_y^2}.$$

Эллиптически симметричная гауссоида описывается формулой

$$r(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right). \quad (3.33)$$

Переменные  $x$  и  $y$  можно разделить и выражения для соответствующих ОПФ примут вид

$$\tilde{r}(f_x) = e^{-2\pi^2\sigma_x^2 f_x^2} \quad \text{и} \quad \tilde{r}(f_y) = e^{-2\pi^2\sigma_y^2 f_y^2}. \quad (3.34)$$

Нормированная МПФ в виде гауссоиды представлена на рис. 3.17.

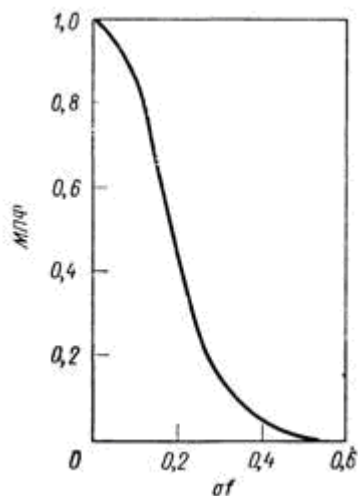


Рис. 3.17. Обобщения МПФ в виде синусоиды

В табл. 3.2 приведены три гауссоиды, причем значения  $a$  выражены в единицах углового размера приемника  $a$ , а частоты — в единицах  $\omega = 1/a$ .

Таблица 3.2

Значения МПФ элементов, имеющих гауссовы функции рассеяния. Величины  $a$  выражены в единицах углового размера приемника  $a$ .

$$\text{МПФ} = \exp \left[ -2\pi^2 \left( \frac{\sigma_m}{\alpha} \right)^2 \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 \right]$$

$\omega_0$	МПФ для $a/a = 0,125$	МПФ для $a/a = 0,25$	МПФ для $a/a = 0,5$
0	1	1	1
0,05	0,999	0,997	0,987
0,1	0,997	0,987	0,952
0,15	0,993	0,973	0,894
0,2	0,987	0,952	0,821
0,25	0,981	0,925	0,735

0,3	0,973	0,894	0,641
0,35	0,963	0,859	0,546
0,4	0,952	0,821	0,454
0,45	0,939	0,779	0,368
0,5	0,925	0,735	0,291
0,55	0,911	0,689	0,225
0,6	0,894	0,641	0,169
0,65	0,878	0,594	0,124
0,7	0,859	0,546	0,089
0,75	0,841	0,500	0,062
0,8	0,821	0,454	0,042
0,85	0,800	0,410	0,028
0,9	0,779	0,368	0,018
0,95	0,757	0,328	0,012
1,0	0,735	0,291	0,007

Данные таблицы можно использовать для быстрой оценки влияния на МПФ приемника излучения видеоконтрольного устройства или других элементов системы, имеющих МПФ в виде гауссоиды. Хотя импульсные реакции редко в точности описываются гауссоидой, часто бывает полезно аппроксимировать их гауссоидой. Например, размер пятна рассеяния оптики обычно характеризуют диаметром кружка  $2\sigma$ , в пределах которого заключен определенный процент полной энергии излучения. Если распределение энергии в пятне допустимо считать гауссовым, можно применить

аппроксимацию, отыскав гауссоиду, для которой тот же процент энергии  $P$  заключен в кружке радиусом  $\rho$ .

Для гауссоиды

$$r(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/2\sigma^2] = \exp(-R^2/2\sigma^2),$$

показанной на фиг. 3.18, можно найти величину  $\sigma$ , для которой выполняется условие

$$P = \frac{\int_0^{\rho} \int_0^{2\pi} r(R) R dR d\varphi}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} r(R) R dR d\varphi}. \quad (3.35)$$

Интегрируя по  $\varphi$  и затем по  $R$ , имеем

$$P = 1 - \exp(-\rho^2/2\sigma^2)$$

и решая полученное уравнение относительно  $\sigma$ , получаем

$$\sigma = \frac{\rho}{\sqrt{2 \ln [1/(1-P)]}}. \quad (3.36)$$

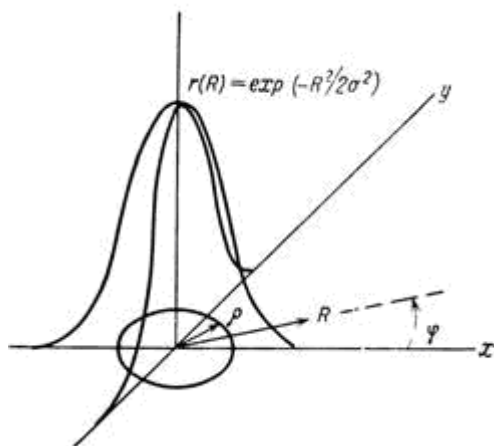


Рис. 3.18. Гауссово распределение с круговой симметрией.

Таким образом, для гауссова пятна легко перейти от процентного содержания энергии  $P$  в пределах заданного диаметра к среднеквадратичному отклонению  $\sigma$ . Например, если 85% энергии заключено в кружке радиусом  $\rho$ , то  $\sigma = 0,51\rho$ .



Примерами явлений, импульсные реакции которых часто удовлетворительно описываются гауссоидой, являются симметричное абберационное пятно оптической системы, случайные погрешности положения сканирующего устройства, вибрации чувствительного элемента, пятно на экране электронно-лучевой трубки. При испытаниях размер раstra плавно уменьшается электронным способом. В случае когда пятно представляет симметричную гауссоиду, величина  $\sigma$  связана с расстояниями между центрами соседних строк  $s$  соотношением

$$\sigma = 0,54s. \quad (3.37)$$

Если разрешение оценивается по частоте прямоугольной миры, величина  $\sigma$  связана с периодом миры  $p$  соотношением

$$\sigma = 0,42p. \quad (3.38)$$

Дженнис и др. рассчитали картину растрового фона, получающуюся в телевизионном растре из линий гауссовой формы. Они нашли, что для  $h/\sigma = 0 - 4$  картина синусоидальна ( $h$  — расстояние между линиями,  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение). Процентная глубина растрового фона  $\xi$  зависимости от  $h/\sigma$  показана на рис. 3.19.

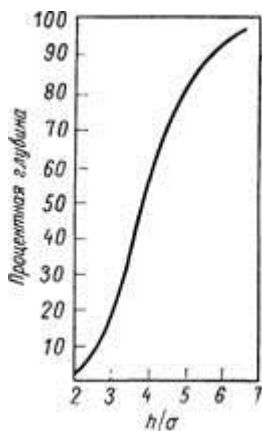


Рис. 3.19. Процентная глубина растрового фона для раstra, построенного из линий, распределение яркости которых имеет гауссову форму, в зависимости от отношения расстояния между линиями  $h$  к величине  $\sigma$ .

Третья употребительная функция рассеяния — круговая функция (рис. 3.20), которая определяется уравнением

$$r(R) = \text{Circ}(R/\rho). \quad (3.39)$$

ОПФ является действительной функцией и имеет вид

$$r = 2 \text{Bessinc}(\rho f_R) = 2J_1'(\pi \rho f_R)/(\pi \rho f_R), \quad (3.40)$$

где  $J_1$  — функция Бесселя первого рода первого порядка, а  $f_R$  — пространственная частота в любом радиальном направлении;  $x$  — сечение круговой функции (3.40) — показано на рис. 3.21.

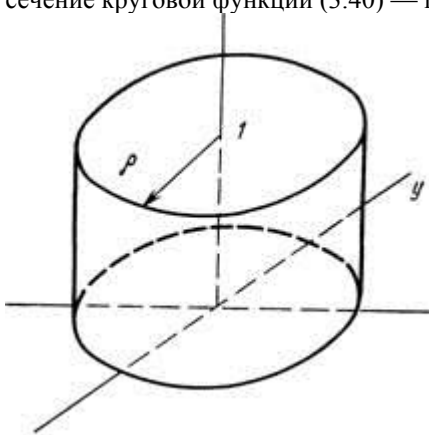


Рис. 3.20. Круговая функция

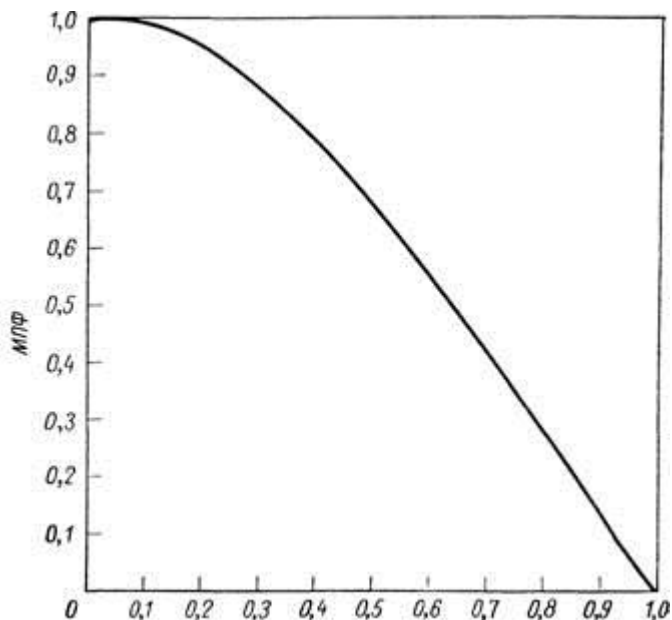


Рис. 3.21. Усеченная Bessinc-функция.

Круговая функция может описывать сильно расфокусированную оптику, приемник излучения круглой формы или круглый индикаторный элемент. Bessinc-функция достаточно точно аппроксимируется формулой

$$2 \text{ Bessinc}(\rho f_R) \approx \text{Sinc}(0,867\rho f_R). \quad (3.41)$$

### 3.8. Ухудшение модуляционной передаточной функции вследствие движения и неопределенности положения изображения

Помимо источников потерь разрешающей способности, рассмотренных в разд. 3.5, которые всегда существуют в системах тепловидения, имеются еще **четыре источника**, которые будут рассмотрены ниже. Это — вибрации приемного устройства

относительно рассматриваемой картины, вибрации индикатора относительно наблюдателя, погрешности положения точки изображения во времени при сканировании (в процессе записи) и на индикаторном устройстве (в процессе воспроизведения). Движение приемного устройства относительно рассматриваемой картины наблюдается, когда устройство недостаточно стабилизировано, чтобы скомпенсировать колебания платформы и ветровую нагрузку. Вибрации индикатора относительно наблюдателя происходят, когда скорости и амплитуды колебаний платформы столь велики, что перемещения тела и головы наблюдателя уже не могут быть скомпенсированы зрительным аппаратом. Погрешности при сканировании возникают, когда от кадра к кадру несколько меняется угол наклона сканирующего зеркала относительно его номинального значения. Ошибки воспроизведения возникают, когда положение линии сканирования на индикаторе неточно соответствует положению линии сканирования на входе.

Случайные перемещения с частотами, не превышающими  $\sim 2$  Гц, не вызывают заметного размытия изображения, поскольку постоянная времени глаза слишком мала, чтобы воспринять эти перемещения слитно. В связи с тем что механизм, позволяющий глазу выделять информацию при наблюдении движущегося изображения объекта, в настоящее время недостаточно хорошо понят, невозможно определенным образом связать движение с ухудшением ОПФ.

Однако чисто случайные перемещения и ошибки положения можно, по-видимому, описать фурье-преобразованием функции плотности вероятности положения изображения, когда эта функция непрерывна. Например, сигналы датчика положения сканирующей системы или ошибки синхронизации с гауссовым распределением плотности вероятности с центром, соответствующим правильному положению, должны иметь МПФ в форме гауссоиды с таким же среднеквадратичным отклонением  $\sigma$ , что и у функции плотности вероятности.

### 3.9. Эквивалентная полоса частот, эквивалентное разрешение и центральная предельная теорема

Шаде установил, что видимая резкость телевизионного изображения может быть в известной мере описана интегралом, взятым по всей области частот от квадрата МПФ телевизионной системы.

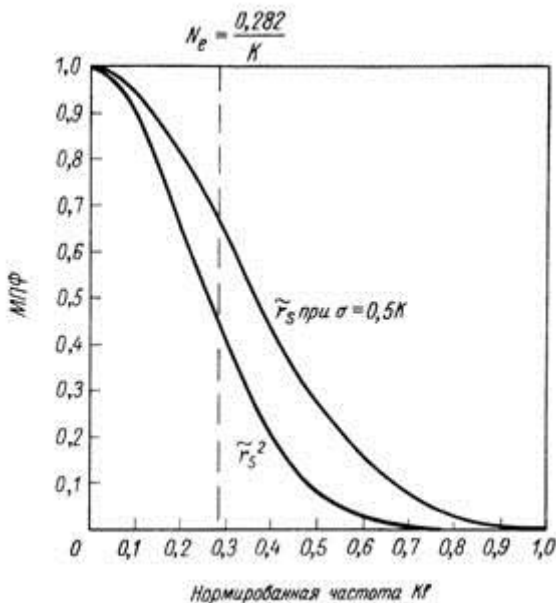


Рис. 3.27. Пример эквивалентной полосы частот для МПФ гауссовой формы.

Шаде назвал этот интеграл эквивалентным числом линий  $N_e$  (по всей высоте кадра)

$$N_e \triangleq \int_0^{\infty} [\tilde{r}(f)]^2 df. \quad (3.60)$$

Эта величина в действительности представляет эквивалентную полосу частот (рис. 3.27). Величина  $N_e$  — один из лучших критериев оценки резкости и разрешения в частотной области для нешумящих изображающих систем. (Смысл и значение параметра  $N_e$  подробно разбираются в разд. 4.10.)

Если  $N_e$  является эффективной мерой разрешения в частотной области, то должен существовать соответствующий параметр и в пространственной области, который будем называть **эквивалентным разрешением**. Сенделл рассмотрел различные возможные определения эквивалентного разрешения  $r$  и считает, что наилучшим является  $r = 1/2 N_e$ , поскольку это дает  $r = a$  для прямоугольной функции рассеяния. На рис. 3.28 приведены  $N_e$  и  $r$  для некоторых распространенных ОПФ. Недостатком приведенного определения  $r$  является то, что  $r$  — не обязательно угловой размер наименьшей детали, разрешаемой системой.

ФРЛ	МПФ	$N_e$	$\tilde{r}$
Rect ( $x/\alpha$ )	Sinc ( $\alpha f$ )	$1/2\alpha$	$\alpha$
$e^{-x^2/2\sigma^2}$	$e^{-2\pi^2\sigma^2 f^2}$	$1/4\sigma\sqrt{\pi} = 0,141/\sigma$	$\sigma/0,284$
$a^2/(x^2 + a^2)$	$e^{-2\alpha  f }$	$1/2a$	$a$

Рис. 3.28. Примеры значений эквивалентной полосы частот и эквивалентного разрешения.

Хорошо известная в теории вероятностей и статистике центральная предельная теорема имеет аналог в **теории линейной фильтрации**: произведение  $\pi$  ограниченных по полосе непрерывных модуляционных передаточных функций (МПФ) стремится к гауссовой форме, когда  $\pi$  становится большим  $r$ ). Многие системы тепловидения имеют как минимум **четыре компоненты МПФ**, а часто и семь, так что функция рассеяния линии для системы в целом

часто может быть весьма точно аппроксимирована гауссоидой  $r(x) = \exp(-x^2/2\sigma^2)$ , где  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение. Соответствующая МПФ равна

$$\tilde{r}(f_x) = \exp(-2\pi^2\sigma^2 f_x^2). \quad (3.61)$$

В качестве примера в табл. 3.5 и на рис. 3.29 показаны компоненты МПФ, относящиеся к системе с разрешением порядка 1 мрад; МПФ системы в целом имеет приблизительно гауссову форму. Для целей анализа и описания имеет смысл отметить некоторые свойства этой функции. Среднеквадратичное отклонение функции рассеяния можно оценить, определив точки  $r(\sigma) = 0,61$  или  $r(1,175\sigma) = 0,5$ . Масштаб МПФ можно найти, определив частоту  $f = 0,159/\sigma$ , на которой  $r = 0,61$ . Различные оценки размера функции рассеяния для определенного процентного содержания полной энергии функции рассеяния  $P$  в интервале значений между  $x = -x_0$  и  $x = x_0$  для гауссоиды можно сделать по следующим данным:

$P, \%$	38,3	68,3	84,2	95,5	99,7
$x_0$	$\sigma/2$	$\sigma$	$\sqrt{2}\sigma$	$2\sigma$	$3\sigma$

Другой путь аппроксимации МПФ гауссоидой — найти значение  $\sigma$ , которое обеспечивает равенство гауссовой величины  $Ne = 0,141/\sigma$  фактической величине  $Ne$  функционально неизвестной МПФ для примера конкретной системы МПФ.

$\alpha = 1.0$  мрад;  $f_o = 1$  мрад<sup>-1</sup>;  $D_o = 20$  мм;  $f_c = 2$  мрад<sup>-1</sup> при  $\bar{\lambda} = 10$  мкм;  
характеристическая частота электронной системы  $0,5$  мрад<sup>-1</sup>;  
 $\sigma_m/\alpha = 0,25$

$f$ , мрад <sup>-1</sup>	Оптика, $\tilde{r}_o$	Приемник излучения, $\tilde{r}_d$	Электронная система, $\tilde{r}_e$	Видеокон- трольное устройство, $\tilde{r}_m$	Система, $\tilde{r}_s$	МПФ в форме гауссоида с $\sigma = 0,55\alpha$
0	1	1	1	1	1	1
0,1	0,9634	0,984	0,981	0,987	0,918	0,942
0,2	0,8729	0,935	0,928	0,952	0,721	0,788
0,3	0,8097	0,858	0,857	0,894	0,532	0,584
0,4	0,7471	0,757	0,781	0,821	0,363	0,385
0,5	0,6850	0,637	0,707	0,735	0,227	0,224
0,6	0,6238	0,505	0,640	0,641	0,129	0,117
0,7	0,5636	0,368	0,583	0,546	0,066	0,054
0,8	0,5046	0,234	0,530	0,454	0,028	0,022
0,9	0,4470	0,109	0,486	0,368	0,009	0,008
1,0	0,3910	0	0,447	0,291	0	0,003

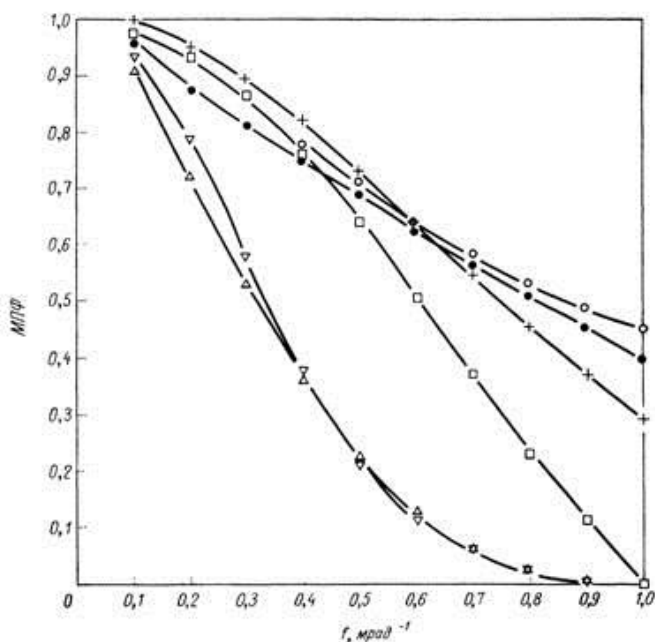


Рис. 3.29. МПФ для примера системы.

# оптическая система; D приемник излучения; O электронная система; 4- видео- контрольное устройство; A система; у гауссоида.



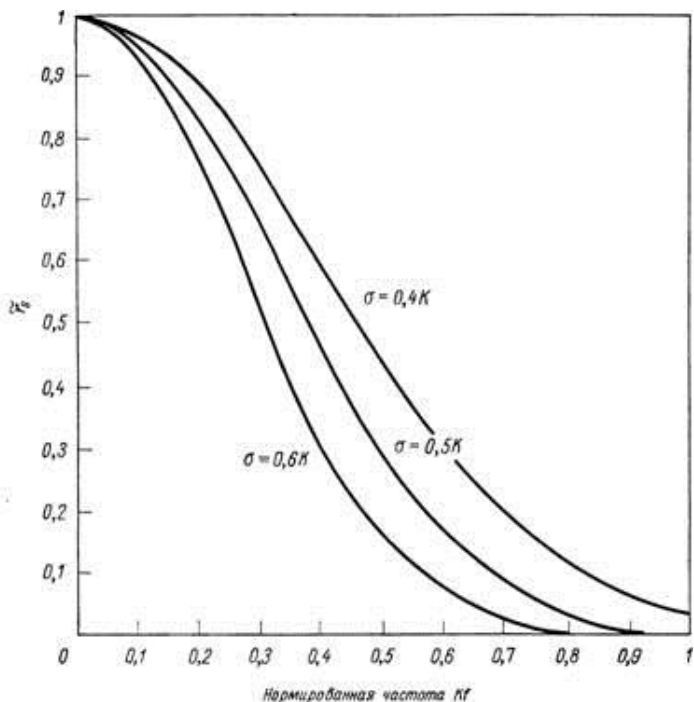


Рис. 3.30. Примеры МПФ, имеющих форму гауссоид.

На фиг. 3.30 показаны три универсальные гауссовы кривые в зависимости от безразмерного параметра  $Kf$  для величин  $\sigma = 0,4K$ ,  $0,5K$  и  $0,6K$ . Эти кривые можно использовать для определения влияния величины  $\sigma$  на МПФ системы путем выбора значений  $K$ .  $K = 0,25$  мрад дает систему с номинальным разрешением 25 мрад и с граничной частотой  $\sim 4$  мрад $^{-1}$ ; при этом кривые МПФ соответствуют величинам  $\sigma = 0,1$ ,  $0,125$  и  $0,15$  мрад.

## **4. Физиология зрительного восприятия**

### **4.1. Введение**

Проблему, которой посвящена эта глава, можно кратко сформулировать следующим образом: каковы допустимые отличия оптико-электронного изображения от реальной картины, чтобы зрительный аппарат человека мог правильно оценивать картину и эффективно воспринимать заключенную в ней информацию? Уровень наших современных знаний не позволяет однозначно ответить на этот вопрос, а для получения приближенного ответа необходимо рассмотреть следующие характеристики и особенности зрительного процесса: разрешающую способность и пространственно-частотную характеристику; восприятие шумов; увеличение изображения; выделение сигнала на фоне определенной яркости и (или) фоне шумов; неблагоприятное воздействие таких факторов, как слишком большое или слишком малое поле зрения, слишком быстрое движение картины, мерцание, растровая структура изображения. Некоторые из этих характеристик и особенностей достаточно хорошо изучены, однако они описаны на языке физиологии зрительного восприятия, и их следует переосмыслить с точки зрения задач **систем преобразования изображения и систем искусственного интеллекта**. С другой стороны, многие из оригинальных исследований в области зрительного восприятия проводились и продолжают проводиться в плане поисков инженерного решения практических задач получения изображения. Прежде чем обратиться к физиологии зрительного восприятия, рассмотрим кратко основные особенности зрительного аппарата.

## 4.2. Основные характеристики зрительного аппарата человека

### (Характеристика зрительного анализатора)

В процессе деятельности человек до 90% всей информации получает через зрительный анализатор. Прием и анализ информации происходит в световом диапазоне (380-760 нм) электромагнитных волн. Цветовые ощущения вызываются действием световых волн, имеющих различную длину. Приблизительные границы длин волн и соответствующие им ощущения показаны на рис. 4.1.

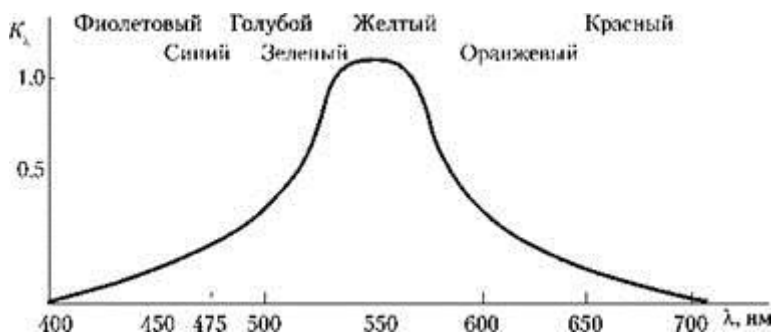


Рис. 4.1. Спектральная чувствительность глаза

Глаз различает семь основных цветов и более сотни их оттенков. Наибольшая чувствительность в условиях обычного дневного освещения с яркостью  $B = 9,56$  кд/м<sup>2</sup> достигается при длине волн  $X = 554$  нм (в желто-зеленой части спектра) и убывает в обе стороны от этого значения.

Характеристикой чувствительности является *относительная видимость* -  $Kx = 5X / 5_{554}$ , где  $5_{554}$  - ощущение, вызываемое источником излучения с длиной волны 554 нм;  $5X$  - ощущение, вызываемое источником той же мощности с длиной волны  $X$ .

Полный диапазон световой чувствительности 3-10 - 2,25 о 105кд/м2. Абсолютная слепящая яркость наступает при 2,25 -10° кд/м2. Эффект ослепления может наступить и при меньших яркостях, если яркость нового объекта, попавшего в поле зрения, превысит яркость того объекта, на которую адаптирован глаз.

Минимальная интенсивность светового воздействия, вызывающая ощущение света, называется **порогом световой чувствительности**.

Порог световой чувствительности изменяется в широких пределах в процессе адаптации зрительного анализатора к внешнему световому воздействию.

Наиболее высокая чувствительность, достигаемая в ходе темновой адаптации в течение нескольких (до 3-4) часов, представляет собой абсолютный порог световой чувствительности.

Различимость предмета на фоне других определяется контрастом его с фоном. Для практических целей используется показатель, называемый **порогом контрастной чувствительности**. Величина контраста оценивается количественно, как отношение разности яркости (кд/м2) предмета и фона к большей яркости. Оптимальными считаются значения контраста 0,6-0,9.

**Временные характеристики восприятия сигналов:** - латентный период (скрытый период) - время от подачи сигнала до момента возникновения ощущения (0,15- 0,22 с);

- порог обнаружения сигнала при большей яркости - 0,001 с, при длительности вспышки 0,1 с;

- привыкание к темноте (неполная темповая адаптация) - от нескольких секунд до нескольких минут;

- порог восприятия мелькающего света (критическая частота слияния мельканий) - от 14 до 70 Гц в зависимости от яркости импульсов, их формы, угловых размеров объекта, уровня зрительной адаптации, функционального состояния человека и

т.п. Для исключения слияния мельканий рекомендуется проецирование сигналов с частотой 3-8 Гц.

При оценке восприятия пространственных характеристик основным понятием является острота зрения, которая характеризуется минимальным углом, под которым две точки видны как отдельные. Острота зрения зависит от освещенности, контрастности, формы объекта и других факторов. При оптимальной освещенности (100-700 лк) порог разрешения составляет от  $1^\circ$  до  $5'$ . При уменьшении контрастности острота зрения снижается.

При восприятии объектов в двухмерном и трехмерном пространствах различают поле зрения и глубинное зрение. Бинокулярное поле зрения охватывает в горизонтальном направлении  $120-180^\circ$ , по вертикали вверх -  $55-60^\circ$  и вниз -  $65-72^\circ$ . Распознавание взаимного расположения форм объектов возможно в границах: вверх -  $25^\circ$ , вниз -  $35^\circ$ , вправо и влево - по  $32^\circ$  от оси зрения. В поле бинокулярного зрения предметы не распознаются, но обнаруживаются. Точное восприятие зрительных сигналов и четкое различение деталей возможно только в центральной части поля зрения размером  $3^\circ$  от оси во все стороны. Глубинное зрение связано с восприятием пространства. Ошибка восприятия абсолютной удаленности составляет 12% при дистанции 30 м. Восприятие пространства: формы, объема, величины и взаимного расположения объектов, их рельефа, удаленности и направления, в котором они находятся, достигается за счет бинокулярного зрения двумя глазами.

Информация об удалении предметов достигается за счет конвергенции - сведения зрительных осей на объекте восприятия, благодаря чему возникают мышечные двигательные ощущения, которые и дают информацию.

Рассмотрим здесь только те характеристики глаза, которые играют важную роль при проектировании систем тепловидения.

Поле зрения глаза, в пределах которого достигается удовлетворительное качество видения, составляет примерно  $30^\circ$

по углу места и  $40^\circ$  по азимуту; хорошее качество видения обеспечивается в пределах желтого пятна сетчатки ( $\sim 9^\circ$ ) и очень хорошее — в пределах центральной ямки сетчатки диаметром  $1\text{—}2^\circ$ . Поле размером  $30 \times 40^\circ$  используется во многих зрительных задачах; этим, в частности, объясняется то, что соотношение сторон кадра  $4 : 3$  (принятое, например, в телевидении) эстетически представляется более естественным, чем другие соотношения [7]. Цветовое зрение обеспечивается в пределах угла  $90^\circ$ , причем цветовая чувствительность падает по мере приближения к краю сетчатки. Участки, близкие к краю сетчатки, не дают ощутимого вклада в способность видеть и используются только для обнаружения движущихся объектов. Для нормального глаза молодого человека минимальное расстояние наилучшего видения составляет  $\sim 25$  см; с возрастом это расстояние увеличивается.

Диапазон яркости, в котором глаз может нормально работать, составляет девять порядков, а диапазон чувствительности охватывает десять порядков. Диапазон чувствительности глаза делится на три области с нечетко очерченными яркостными границами — ночного, сумеречного и дневного зрения. Область ночного зрения простирается от абсолютного яркостного порога  $\sim 3 \cdot 10^{-6}$  до  $\sim 10^{-4}$  кд/м<sup>2</sup>, область сумеречного зрения охватывает  $10^{-4}$ —кд/м<sup>2</sup> и область дневного зрения  $3\text{—}3 \cdot 10^4$  кд/м<sup>2</sup>. Эти три области приблизительно соответствуют переходу от палочкового или периферического зрения при очень низких уровнях яркости к совместной работе палочек и колбочек в условиях сумерек и, наконец, к колбочковому или центральному зрению при высоких уровнях яркости.

Разрешающую способность глаза можно описать различным образом. Простейшей мерой визуального разрешения является острота зрения — величина, обратная угловому размеру минимальной разрешаемой детали в угловых минутах. Максимальная острота зрения зависит от того, какое содержание мы вкладываем в понятие «наименьшая разрешаемая деталь», однако обычно принимаемое номинальное значение максимальной остроты зрения — одна обратная угловая минута. Острота зрения снижается, когда объект смещается с линии зрения.

Разрешающая способность глаза до некоторой степени регулируется диаметром зрачка. При высоких уровнях яркости,

когда для нормальной работы глазу не нужна вся энергия излучения, которое может поступить от объекта, зрачок сужается. Исключение лучей, составляющих большой угол с осью, уменьшает aberrации и улучшает разрешение на ярком свете. В нормальных условиях диаметр зрачка составляет примерно 3 мм, пределы его изменения в зависимости от уровня яркости 2—8 мм.

Для перевода субъективного представления о качестве изображения в поддающиеся количественной оценке объективные зависимости важно понимать, как работает зрительный аппарат. **Субъективно качество изображения определяется следующими четырьмя различными факторами:** восприятием резкости, шумов, контраста и искажений структуры изображения. **Резкость** — понятие, используемое для описания возможностей системы в воспроизведении всех деталей изображения. Резкость характеризует способность наблюдателя извлекать информацию из изображения высокого контраста в отсутствие шумовых и интерференционных помех. Термины «разрешение» и «разрешающая способность» часто применяются как синонимы резкости, хотя, строго говоря, они обозначают несколько иные качества системы. **Шумовые свойства** характеризуют степень маскировки сигнала фиксированными или меняющимися во времени шумами. Эти шумы изображения называются также зернистостью и «снегом» (проявление пульсационных помех на изображении в виде движущихся хлопьев снега).

**Контраст** характеризует яркость рассматриваемой детали по отношению к яркости элемента фона. **Искажения структуры** изображения проявляются в мерцании из-за низкой частоты развертки, иначе говоря, из-за слишком низкой скорости пространственной или временной выборки, межстрочном мерцании в системах с чересстрочной разверткой, в сползании строк и оптических искажениях.





### 4.3. Восприятие света

На выходе изображающих систем обычно создается фотоснимок или изображение на экране, которые рассматриваются человеком. Поэтому очевидно, что для эффективной разработки таких систем очень полезно понимать механизм человеческого зрения. Зная этот механизм, можно строить **функциональные модели зрительной системы**. Такие модели очень важны при разработке систем искусственного интеллекта, систем обработки изображений и создании критериев верности воспроизведения и дешифрируемости изображения.

Согласно словарю Вебстера, **свет есть «лучистая энергия, которая, действуя на органы зрения, дает им возможность выполнять зрительные функции»**. Физические свойства света изучены довольно хорошо, но механизм взаимодействия света с органами зрения еще не вполне понятен. Как известно, **свет есть форма электромагнитного излучения, лежащего в относительно узкой области спектра в диапазоне длин волн от 350 до 780 нм**. Характеристикой источника света является **интенсивность излучения заданной длины волны**. В зрительную систему человека попадает свет либо от самосветящегося источника, либо отраженный от некоторого предмета, либо прошедший через него. Пусть  $E(\lambda)$  есть спектральная плотность излучения первичного источника света, а  $t(\lambda)$  и  $r(\lambda)$  - коэффициент пропускания и коэффициент отражения соответственно. Тогда для предмета, пропускающего свет, спектральная плотность излучения наблюдаемого света будет

$$C(\lambda) = t(\lambda)E(\lambda), \quad (4.1)$$

а для предмета, отражающего свет,

$$C(\lambda) = r(\lambda)E(\lambda). \quad (4.2)$$

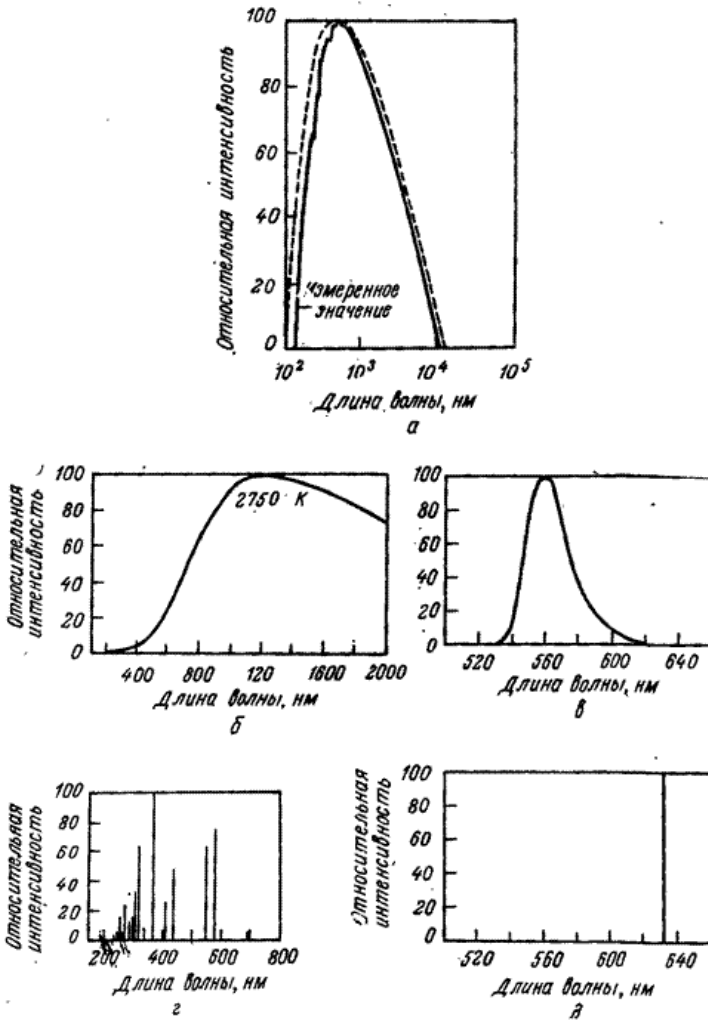


Рис.4.1. Спектральная плотность излучения обычных источников света: а - солнечный свет; б - вольфрамовая лампа накаливания; в - светоизлучающий диод; г - ртутная дуговая лампа; д - гелий-неоновый лазер.

На рис.4.1 представлены графики спектральной плотности излучения некоторых обычных источников света, применяемых в изображающих системах: солнечного, вольфрамовой лампы накаливания, светоизлучающего диода, ртутной дуговой лампы и гелий-неонового лазера. Свет от этих источников воспринимается зрителями по-разному. Солнечный свет кажется очень ярким и желтовато-белым, а свет лампы накаливания - менее ярким и довольно желтым. Светоизлучающий диод дает тусклый зеленый свет, а ртутная лампа - очень яркий, голубовато-белый. Наконец, лазер создает чрезвычайно яркий световой пучок чистого красного цвета. Эти наблюдения порождают много вопросов. Например, полностью ли описывает спектральная плотность излучения особенности восприятия этого излучения? Как будет видно, получен только частичный ответ на этот вопрос.

Существуют **три основные характеристики ощущения света** — **светлота, цветовой тон и насыщенность**. Эти характеристики рассматриваются ниже.

Если имеются два источника света с одинаковой формой спектральной плотности излучения, то источник с большей интенсивностью излучения воспринимается как более яркий. Известно, однако, много примеров, когда предмет с одинаковой интенсивностью излучения всех точек не воспринимается как имеющий равномерную светлоту. Следовательно, **интенсивность света не является адекватной количественной мерой светлоты**.

Признак, которым отличается, например, красный свет от зеленого, называется **цветовым тоном**. С помощью призмы и щели, показанных на рис.4.2, можно получать почти монохроматический свет различного цвета.

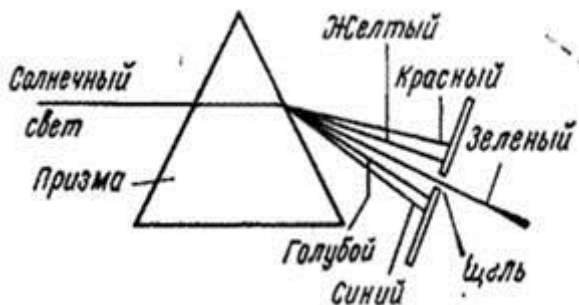


Рис.4.2. Преломление света в призме.

Ясно, однако, что длина волны не является адекватной мерой цвета, так как в природе встречаются такие цвета, которые не наблюдаются в радуге, создаваемой призмой. Отсутствует, например, пурпурный цвет, который может быть получен смешением в равных количествах узкополосных красного и синего света. Если два источника света с одинаковыми спектральными плотностями наблюдать в одинаковых условиях, их цветовой тон будет одинаковым. Однако можно взять два таких источника света с разными спектральными плотностями, которые будут восприниматься как имеющие одинаковый цветовой тон (такие два излучения называются метамерической парой.)

Третья характеристика ощущения света – его насыщенность. Этот признак позволяет отличать спектральный цвет от пастельного блеклого цвета такого же цветового тона. По существу **насыщенность описывает «белизну» цвета.** Можно измерять насыщенность в процентах, сравнивая данный свет со спектральным цветом на графике цветностей, изображенном на рис.4.3. Однако обычно насыщенность не используют как количественную характеристику.

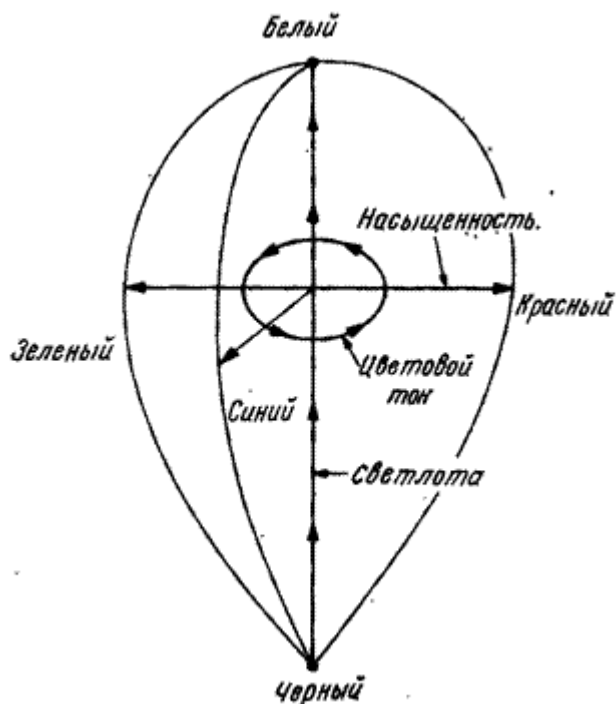


Рис.4.3. Субъективные характеристики цвета.

Для классификации цветов удобно рассматривать их как точки некоторого цветового пространства (рис.4.3). Но для того чтобы можно было делать количественные выводы, расстояние между двумя точками в цветовом пространстве должно соответствовать субъективно воспринимаемой разнице между представляемыми цветами, где бы ни находилась эта пара цветов. Такие цветовые пространства будут рассматриваться далее.

#### 4.4. Глаз

Наиболее естественным подходом к разработке модели зрительной системы человека было бы, видимо, проведение физиологического анализа глаза, нервных путей от глаза к мозгу и тех отделов мозга, которые связаны со зрительным восприятием. К сожалению, мы не в

состоянии решить эту задачу из-за того, что зрительная система состоит из огромного числа очень маленьких элементов. Однако в результате физиологических исследований глаза уже получено много данных, полезных для создания модели зрительной системы.

На рис.2.4 показан поперечный разрез человеческого глазного яблока. Передняя прозрачная наружная оболочка глаза называется роговицей. Остальная часть наружной оболочки - склера - состоит из плотных волокон. Следующий слой - сосудистая оболочка, содержащая капилляры, которые снабжают глаз кровью. Внутри сосудистой оболочки находится сетчатка с рецепторами двух типов - палочками и колбочками. Соединенные с сетчаткой нервные волокна выходят из глазного яблока в виде пучка - зрительного нерва. Свет, попавший в глаз через роговицу, фокусируется на поверхности сетчатки хрусталиком, форма которого под действием специальной мышцы меняется для обеспечения хорошей фокусировки предметов,, находящихся на различном расстоянии от глаза. Радужная оболочка действует как диафрагма, изменяя количество света, проходящее в глаз.

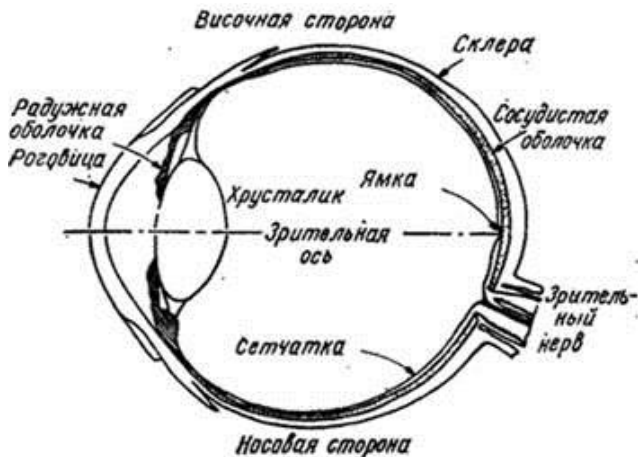


Рис.4.4. Поперечный разрез глаза.

Палочки - это длинные тонкие рецепторы, а колбочки — более короткие и толстые. Эти рецепторы действуют различным образом. Палочки более чувствительны к свету, чем колбочки. При малой

освещенности палочки обеспечивают реакцию зрительной системы (ночное зрение). Колбочки функционируют при большой освещенности, их реакция представляет дневное зрение. На рис.4.5 приведены относительные чувствительности палочек и колбочек в зависимости от длины волны воспринимаемого света.

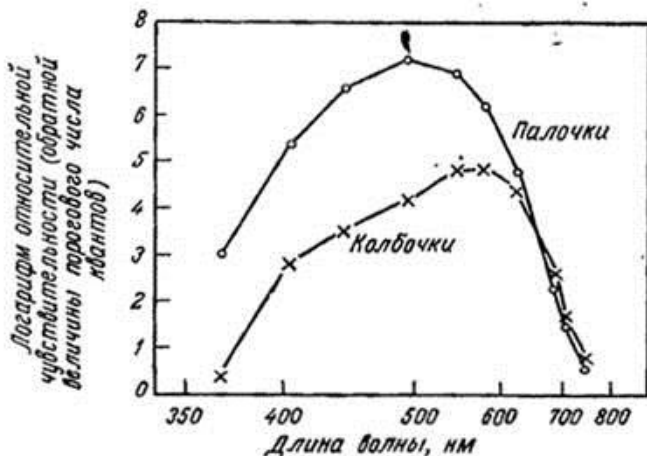


Рис. 4.5. Чувствительность палочек в колбочек по данным Валда .

Глаз содержит около 6,5 млн. колбочек и 100 млн. палочек. Распределение палочек и колбочек по сетчатке показано на рис. 4.6.

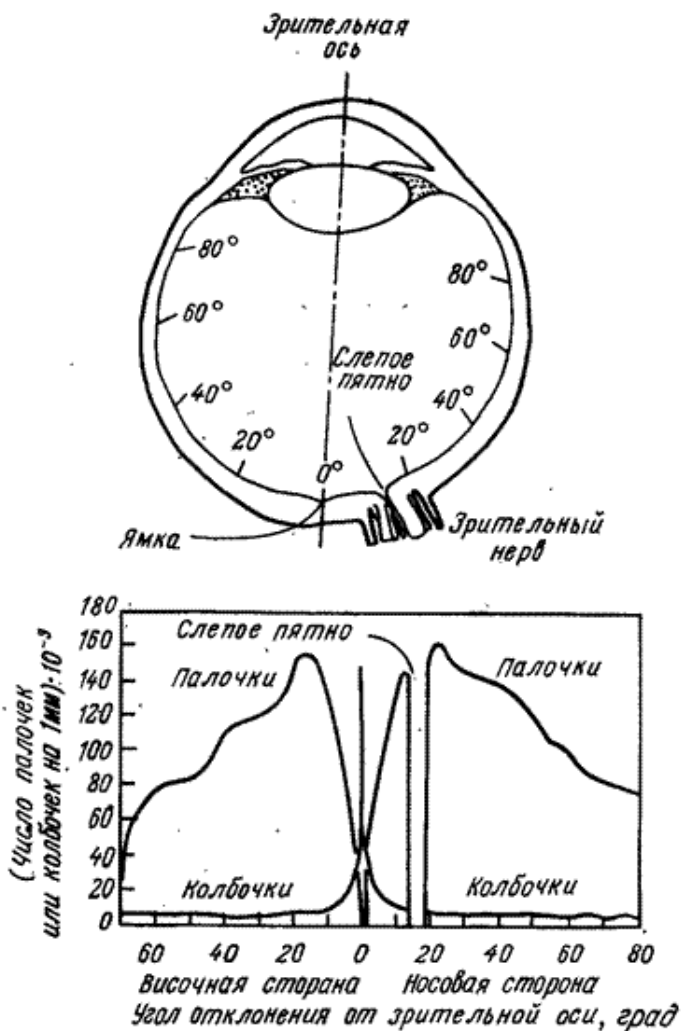


Рис.4.6. Распределение палочек и колбочек по сетчатке.

Наибольшая плотность колбочек приходится на небольшую область сетчатки, называемую центральной ямкой которая находится вблизи



выхода из глаза зрительного нерва. Это область наиболее резкого дневного зрения. В окрестности зрительного нерва нет ни палочек, ни колбочек — это слепое пятно глаза.

Установлено, что имеются три основных типа колбочек сетчатки. Эти колбочки имеют различные спектральные характеристики поглощения света с максимумом в красной, зеленой и синей областях оптического спектра. На рис. 4.7 приведены спектральные кривые поглощения пигментов сетчатки.

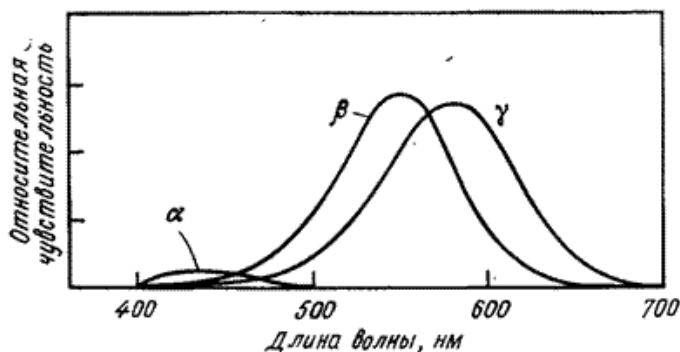


Рис.4.7. Спектральные кривые поглощения пигментов рецепторов сетчатки .

Следует отметить две особенности этих кривых: во-первых, относительно низкую чувствительность колбочек типа а, воспринимающих в основном синий свет, и, во-вторых, значительное перекрытие кривых. Существование трех типов колбочек служит физиологической основой для трехцветной теории цветового зрения.

Когда свет возбуждает палочку или колбочку, возникает фотохимический переходный процесс, в результате которого создается нервный импульс. Механизм распространения нервных импульсов в зрительной системе в настоящее время полностью не выяснен. Известно, что зрительный нерв содержит около 800 000 нервных волокон. Сетчатка имеет свыше 100 000 000 рецепторов. Поскольку фотохимические процессы в сетчатке и механизм

распространения нервных импульсов в глазе недостаточно изучены, нельзя дать полного описания зрительных процессов. Приходится удовлетвориться разработкой моделей, которые описывают и, возможно, предскажут реакцию зрительной системы человека на те или иные изображения. В следующем разделе описываются некоторые явления, которые должны учитываться при моделировании зрительной системы.

## **4.5. Зрительные явления**

Описанные ниже зрительные явления взаимосвязаны, одни - в меньшей степени, другие - в большей. Однако для упрощения изложения, а также потому, что некоторые детали явлений не ясны, эти явления рассматриваются вне связи друг с другом.

### **Контрастная чувствительность**

Известно, что **реакция глаза на изменение освещения является нелинейной**. Пусть пятно света, имеющее интенсивность  $I + \Delta I$ , окружено фоном интенсивности  $I$  (рис.4.8, а).

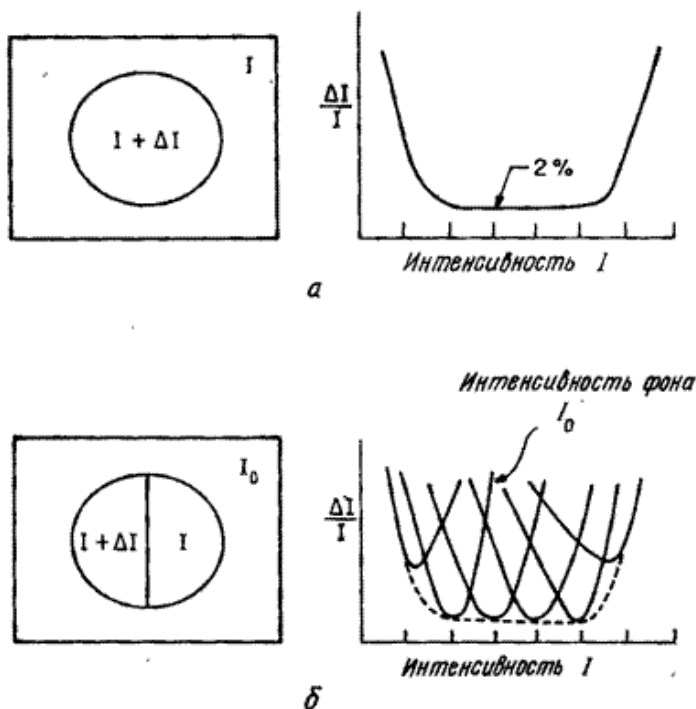


Рис.4.8. Измерения контрастной чувствительности: а — без фона; б — с фоном.

Нужно найти зависимость от  $I$  минимального приращения  $\Delta I$ , которое замечается наблюдателем. Установлено, что в широком диапазоне интенсивностей отношение  $\Delta I / I$ , называемое **отношением Вебера**, имеет почти одинаковую величину – около 0,02. Этот результат не имеет места для очень малых или очень больших интенсивностей, как видно из рис.4.8, а. Более того, контрастная чувствительность зависит от интенсивности окружающего фона. Рассмотрим два пятна света с интенсивностями  $I$  и  $I + \Delta I$  (рис.4.8, б), окруженные фоном интенсивности  $I_0$ . Графики зависимости отношения  $\Delta I / I$  от  $I$  для разных интенсивностей фона  $I_0$  приведены на рис.4.8, б (справа).

Оказалось, что диапазон интенсивностей, при котором отношение  $\Delta I / I$  остается постоянным, значительно уже, чем на рис.4.8, а. Огибающая точек минимума кривых рис.4.8, б совпадает с кривой рис.4.8, а. Однако диапазон интенсивностей  $I$  для почти постоянного отношения  $\Delta I / I$  при фиксированной интенсивности фона  $I_0$  сравним с динамическим диапазоном большинства электронных изображающих систем.

Поскольку дифференциал логарифма интенсивности равен

$$d\{\log(I)\} = dI / I, \quad (4.1)$$

то одинаковые изменения логарифма интенсивности света можно связать с одинаковыми едва заметными изменениями интенсивности в диапазоне, в котором отношение  $\Delta I / I$  остается постоянным. По этой причине во многих системах обработки изображений вычислительные операции проводятся с использованием логарифма интенсивности, а не интенсивности.

### **Полосы Маха**

Рассмотрим ступенчатый оптический клин (набор полосок различной светлоты), показанный на рис.4.9, а.

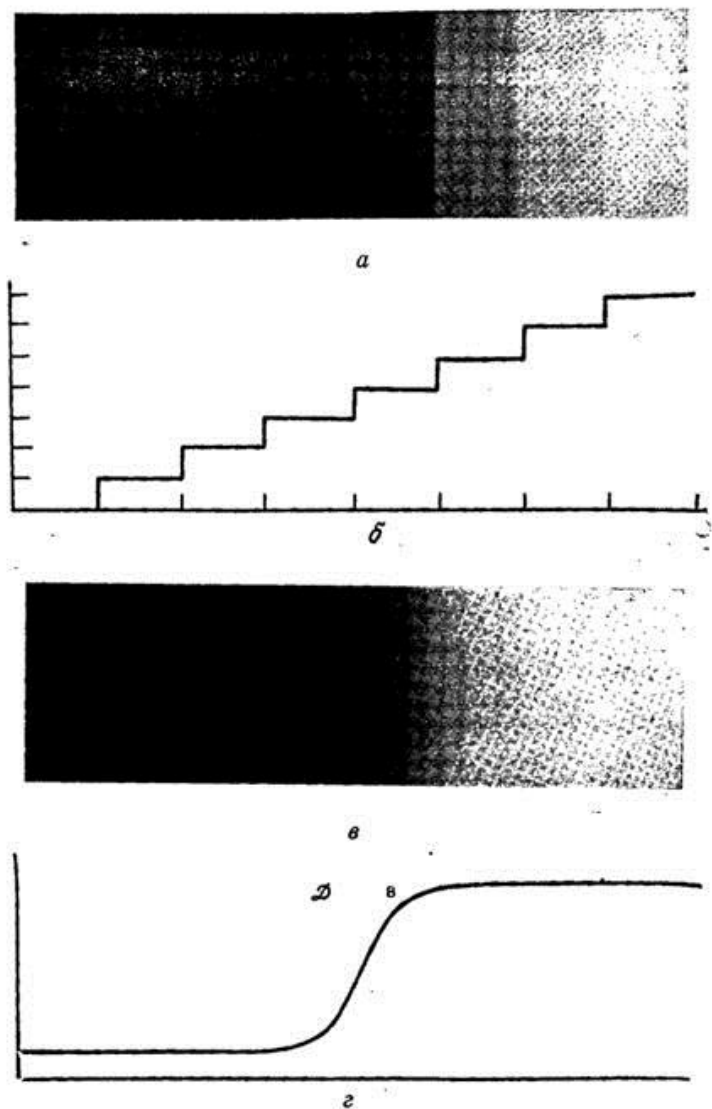


Рис.4.9. Примеры полос Маха: а - ступенчатый клин; б - распределение интенсивности клина; в - перепад интенсивности; г - распределение интенсивности для картины «в».

Интенсивность света, отраженного от каждой полоски, одинакова по ее ширине и отличается на постоянную величину от интенсивности света, отраженного от соседних полосок. Однако правый край каждой полоски кажется темнее левого. Это явление называется **эффектом полос Маха**. На рис.4.9, в представлено изображение с распределением интенсивности, которое показано на рис.4.9, г. На этой фотографии видны два столбика — яркий (В) и темный (D). Ни один из них нельзя предсказать исходя из распределения интенсивности. Полосы Маха, т. е. кажущиеся преувеличения изменений светлоты, можно объяснить исходя из пространственно-частотной характеристики глаза. Как мы увидим, **глаз обладает меньшей чувствительностью в области низких и высоких пространственных частот по сравнению с чувствительностью на средних частотах. Отсюда можно сделать вывод, что при создании систем обработки изображений можно в некоторой степени пожертвовать верностью воспроизведения контуров, так как глаз не очень чувствителен к высокочастотным перепадам светлоты.**

### Одновременный контраст

Явление одновременного контраста иллюстрируется фотографией, приведенной на рис.4.10. В действительности все маленькие квадраты имеют одинаковую яркость, но из-за различной яркости фона кажется, что их яркость разная. Цветовой фон пятна света зависит также от цвета окружения. Белое пятно на черном квадрате кажется желтоватым, если вся фигура окружена синим фоном.

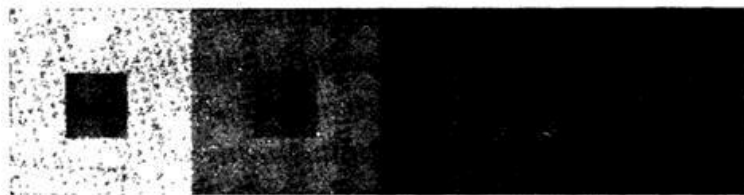


Рис.4.10. Пример одновременного контраста.

### **Цветовая адаптация**

Воспринимаемый цветовой фон зависит от адаптации зрителя. Американский флаг, например, не сразу будет восприниматься как красно-бело-синий, если человек перед этим смотрел на интенсивный красный свет. Воспринимаемые цвета флага будут смещены в сторону голубого цвета, который является дополнительным к красному.

### **Цветовая слепота**

Приблизительно 8% всех мужчин и 1 % женщин в той или иной форме страдают цветовой слепотой. Существуют разные степени цветовой слепоты. Некоторые люди, так называемые монохроматы, имеют только палочки или палочки и колбочки одного типа и поэтому им свойственно одноцветное зрение. Другие люди - дихроматы - имеют колбочки двух типов. И монохроматы, и дихроматы могут различать цвета в той степени, в которой они научились связывать различные цвета с разными предметами. Например, они могут знать, что темные розы - красные, а светлые - желтые. Но если покрасить красную розу в желтый цвет, сохранив величину коэффициента отражения, монохромат может назвать ее красной. Дихроматы также неспособны точно определять цветовой тон.

### **Субъективные цвета**

В 1826 г. французский монах Бенедикт Прево заметил, что если периодически освещать белый лист бумаги, помещая его в узкий луч света в затемненной комнате, то на этом листе можно наблюдать цветные полосы. Это было первое зарегистрированное наблюдение **субъективных цветов**. Фехнер в 1838 г. наблюдал субъективные цвета, появляющиеся на вращающемся диске, выкрашенном наполовину в черный, наполовину в белый цвет. В 1894 г. Бенхэм изобрел волчок, на верхней поверхности которого был узор, показанный на рис. 4.11.



Рис.4.11. Диск Бенхэма.

Когда волчок вращается против часовой стрелки, внешнее кольцо кажется красным, среднее - зеленым, а внутреннее - синим. Вращение в противоположную сторону приводит к тому, что цвета внешнего и внутреннего колец меняются местами. Эти и связанные с ними явления частично объясняются характером временной реакции зрительной системы человека на вспышки света.

### Опыты Лэнда

В начале 50-х годов XX в. Лэнд провел опыты, показывающие возможность воспроизведения цвета с помощью двух основных цветов. Один из этих опытов иллюстрируется на рис.4.12.



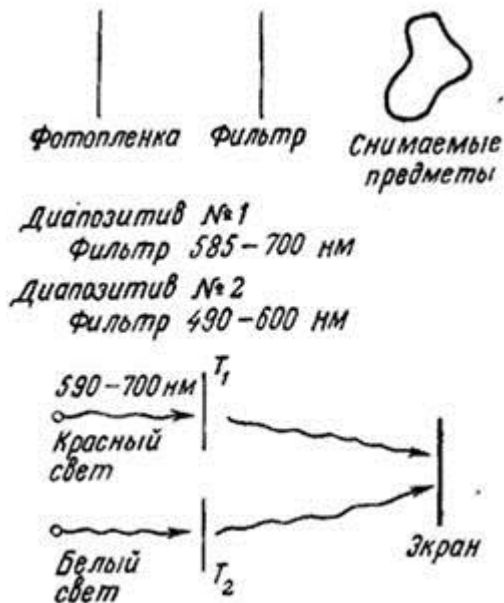


Рис.4.12. Опыты Лэнда.

Некоторая сцена фотографируется дважды: за фильтрами с полосами пропускания  $\sim 600-700$  и  $\sim 500-600$  нм. Изготавливаются два одноцветных диапозитива  $T_1$  и  $T_2$ . Затем эти диапозитивы проектируются на один экран. Первый диапозитив освещается красным светом (длина волны  $600-700$  нм), а второй - белым. Наблюдается интересный эффект: когда оба изображения совмещены, исходная сцена воспроизводится почти в естественных цветах (плохо воспроизводятся только пурпурные цвета). Если изображения слегка не совпадают, воспроизведение цветов резко ухудшается. Это показывает, что воспроизведение цветов зависит от содержания сцены, а не есть чисто локальное явление ( т.е цвет данной точки зависит от цвета ее окружения).

## 4.6. Модель одноцветного зрения

При использовании одного из современных методов разработки оптических систем оптическую систему рассматривают как **линейную систему относительно интенсивности света**, которую можно описать с помощью **двумерной частотной характеристики**. Исследуем линейную оптическую систему, показанную на рис.4.13. Пространственное распределение интенсивности света на входе системы получено после прохождения пучка света постоянной интенсивности через диапозитив, **прозрачность которого меняется по синусоидальному закону**. Вследствие линейности системы **распределение интенсивности света на выходе также будет синусоидальным, но, возможно, отличным по амплитуде или фазе от распределения на входе**. Изменяя пространственную частоту (число периодов изменения интенсивности на единицу длины) распределения интенсивности света на входе и измеряя амплитуду и фазу распределения интенсивности на выходе, можно в принципе получить частотную характеристику оптической системы.

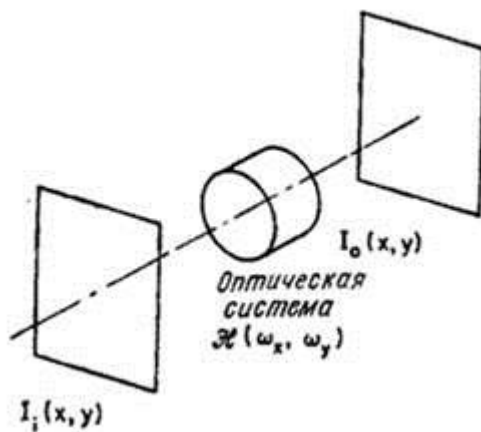


Рис.4.13. Линейная оптическая система.

Пусть  $\mathcal{H}(\omega_x, \omega_y)$  - оптическая частотная характеристика

двумерной линейной системы, а  $\omega_x = 2\pi/T_x$ ,  $\omega_y = 2\pi/T_y$  - угловые пространственные частоты ( $T_x$ ,  $T_y$  - периоды изменения интенсивности вдоль координатных осей  $x$  и  $y$ ). Пусть далее  $I_i(x, y)$  обозначает распределение интенсивности света на входе в предметной плоскости, а  $I_0(x, y)$  - распределение интенсивности света на выходе (в плоскости изображения). Тогда пространственно-частотные спектры распределений интенсивностей на входе и выходе по определению будут равны

$$I_i(\omega_x, \omega_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} I_i(x, y) \exp\{-i(\omega_x x + \omega_y y)\} dx dy \quad (4.1)$$

и

$$I_0(\omega_x, \omega_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} I_0(x, y) \exp\{-i(\omega_x x + \omega_y y)\} dx dy \quad (4.2)$$

Эти спектры связаны следующим соотношением:

$$I_0(\omega_x, \omega_y) = \mathcal{H}(\omega_x, \omega_y) I_i(\omega_x, \omega_y). \quad (4.3)$$

Распределение интенсивности света на выходе может быть получено обратным преобразованием фурье-спектра (4.2):

$$I_0(x, y) = (1/4\pi^2) \iint_{-\infty}^{\infty} I_0(\omega_x, \omega_y) \exp\{i(\omega_x x + \omega_y y)\} d\omega_x d\omega_y. \quad (4.4)$$

Во многих случаях при разработке оптических систем интересуются

только отношением амплитуд интенсивностей на входе и выходе.

Это отношение

$$\left| I_0(\varphi_x, \varphi_y) \right| / \left| I_i(\varphi_x, \varphi_y) \right| = \left| \mathcal{H}(\varphi_x, \varphi_y) \right| \quad (4.5)$$

называется **частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) оптической системы.**

Много работ посвящено вопросу использования понятия линейной системы для описания свойств зрительной системы человека. Типичный эксперимент для проверки справедливости линейной модели зрительной системы заключается в следующем. Наблюдателю показывают две решетки с синусоидальным изменением коэффициента пропускания. Одна из них – опорная, с постоянным контрастом (**контрастом пространственно-периодического распределения интенсивности** называется **отношение максимальной интенсивности к минимальной**) и заданной пространственной частотой, вторая – испытательная, с переменным контрастом и частотой, отличающейся от частоты опорной решетки.

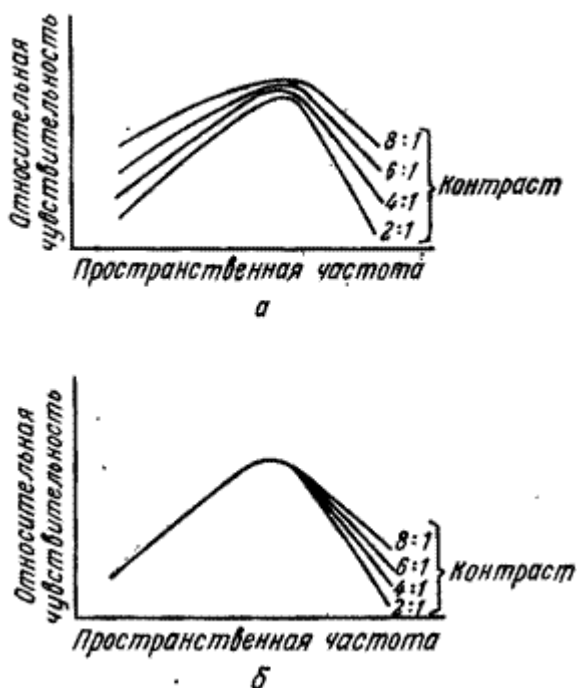


Рис. 4.14. Результаты измерения ЧКХ зрительной системы человека:  
а - синусоидальная решетка; б - экспоненциально-синусоидальная  
решетка.

Контраст испытательной решетки изменяется до тех пор, пока яркость светлых и темных штрихов обеих решеток будет казаться одинаковой. Применяя набор испытательных решеток с разными пространственными частотами, можно построить график ЧКХ зрительной системы человека. На рис.4.14, а приведены графики ЧКХ для разных контрастов входного сигнала. Представление о форме ЧКХ можно также получить, рассматривая сложную синусоидальную решетку, показанную на рис. 4.15.

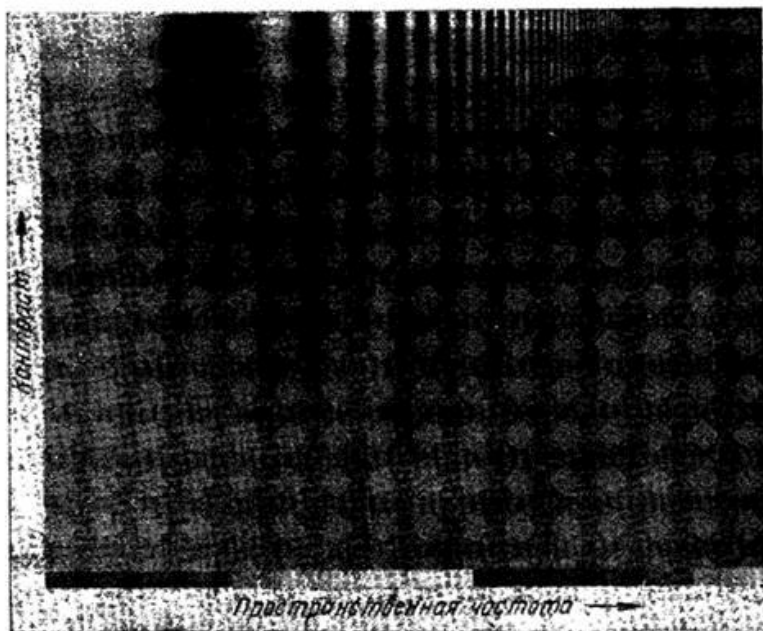


Рис.4.15. Сложная синусоидальная решетка.

В этой решетке пространственная частота возрастает по одной координате, а контраст - по другой. Огибающая различных штрихов в общем близка по форме к кривым рис.4.14, а.

На рис.4.14, а показано, что форма ЧКХ зависит от контраста распределения интенсивности на входе. Кроме того, она меняется при вращении испытательной решетки вокруг оптической оси глаза. Таким образом, **зрительная система человека нелинейна и анизотропна (не обладает инвариантностью относительно поворота)**.

Было сделано предположение, что нелинейная реакция глаза на изменения интенсивности имеет **логарифмический характер**. Нелинейное преобразование осуществляется на первом этапе

обработки визуальной информации в зрительной системе.

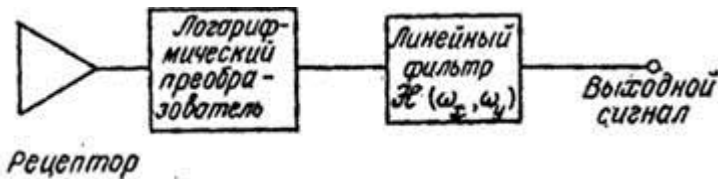


Рис.4.16. Логарифмическая модель одноцветного зрения.

Преобразованию подвергаются сигналы рецепторов (палочек и колбочек) до того, как они вступают во взаимодействие друг с другом. На рис. 4.16 приведена простейшая логарифмическая модель глаза для одноцветного зрения. Если реакция глаза на величину входной интенсивности действительно имеет логарифмический характер, то, **применив экспоненциальное преобразование интенсивности синусоидальной решетки, можно «линеаризовать» зрительную систему.** ЧКХ, полученная в результате измерения с использованием экспоненциально-синусоидальной решетки (рис.4.14, б), хорошо аппроксимируется одной кривой на низких и средних пространственных частотах. На рис. 4.17 приведены результаты измерения ЧКХ, полученные Дэвидсоном для экспоненциально-синусоидального испытательного сигнала. Высокочастотная часть этой кривой получена экстраполированием входного сигнала среднего контраста.

Логарифмически-линейная модель глаза (рис.4.15) позволяет удовлетворительно предсказать реакцию зрительной системы в широком диапазоне интенсивностей. Однако на высоких пространственных частотах и очень низких или очень высоких интенсивностях наблюдаемая реакция отличается от предсказанной на основе этой модели. Для того чтобы получить более точную модель, необходимо детальнее рассмотреть физические процессы в зрительной системе.

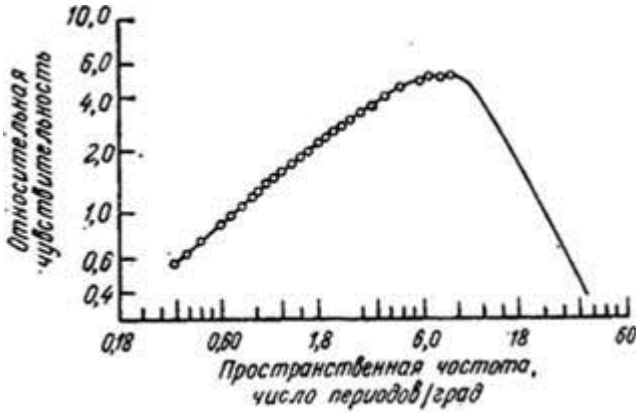


Рис.4.17. Результаты измерений ЧКХ зрительной системы человека с помощью экспоненциально-синусоидальных решеток.

Нелинейная реакция палочек и колбочек на изменения интенсивности все еще служит предметом активных исследований. Были высказаны гипотезы о том, что механизм этой нелинейности объясняется химической активностью, электрическими эффектами и нервной обратной связью. Основная логарифмическая модель предполагает, что

$$I_0(x, y) = K_1 \log[K_2 + K_3 I_i(x, y)], \quad (4.6)$$

где  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  - постоянные, а  $I_i(x, y)$  и  $I_0(x, y)$  - входной и выходной сигналы. В другой модели предполагается следующая зависимость выходного сигнала от входного:

$$I_0(x, y) = [K_1 I_i(x, y)] / [K_2 + I_i(x, y)], \quad (4.7)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  - постоянные. Маннос и Сакрисон изучали различные нелинейности, используемые в аналитических мерах верности воспроизведения изображения. Они установили, что степенная нелинейная зависимость, когда



$$I_0(x, y) = [I_i(x, y)]^S, \quad (4.8)$$

где  $S$  - постоянная, обеспечивает хорошее согласие между вычисленной верностью и субъективной оценкой качества изображения. Подбором постоянных, входящих в выражения (4.6) – (4.8), соответствующие кривые могут быть достаточно хорошо приближены в диапазоне средних интенсивностей.

Пространственно-частотные характеристики глаза объясняются частично оптическими и частично нервными механизмами. **Как оптический инструмент глаз имеет ограниченную разрешающую способность из-за конечных размеров апертуры линзы, оптических aberrаций конечных размеров палочек и колбочек. Эти эффекты могут быть представлены в модели фильтром нижних пространственных частот, включенным между рецептором и нелинейным элементом.** Наиболее существенный вклад в частотную характеристику глаза вносит механизм **латерального торможения**. Схема этого механизма приведена на рис.4.18. Нервный сигнал есть взвешенная сумма сигналов от многих соседних рецепторов. Некоторые рецепторы вносят тормозящий (т. е. отрицательный) вклад в эту сумму. Весовые множители представляют собой по существу импульсный отклик части зрительной системы, находящейся после сетчатки. Двумерное преобразование Фурье этого импульсного отклика дает соответствующую частотную характеристику.

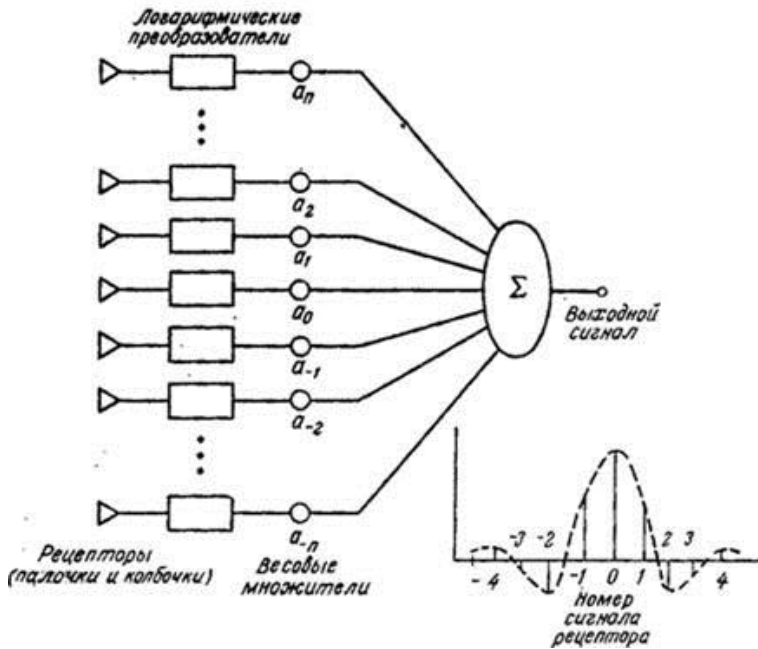


Рис.4.18. Схема латерального торможения.

Восприятие светового импульса, попавшего в глаз, происходит с задержкой. После окончания действия импульса ощущение света затягивается на короткое время. Эти явления, возникающие из-за ненулевой длительности временной реакции зрительной системы, можно моделировать линейным временным фильтром.

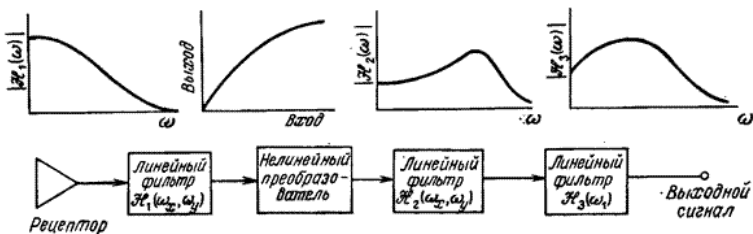


Рис.4.19. Расширенная модель одноцветного зрения.

На рис. 4.19 показана модель одноцветного зрения, учитывающая результаты, которые обсуждались выше. В этой модели выходной сигнал рецептора подается на вход линейного фильтра нижних частот, соответствующего оптике глаза. Далее включен элемент с монотонно нелинейной характеристикой, моделирующий нелинейную реакцию рецепторов на изменение интенсивности. Процесс латерального торможения учитывается введением полосового линейного пространственного фильтра. Эффекты временной фильтрации моделируются последним звеном - линейной системой. При удачном выборе масштабных коэффициентов рассмотренная модель одноцветного зрения будет достаточно точной для большинства задач обработки изображений. Даже упрощенная логарифмическая модель (рис.4.16) будет во многих случаях удовлетворительной.

#### **4.7. Модель цветового зрения**

Начиная с опытов Ньютона и Максвелла, было предложено множество теорий, объясняющих цветовое зрение человека. В классической трехцветной модели цветового зрения, разработанной Юнгом в 1802г. предполагается, что глаз обладает **тремя видами элементов**, чувствительных в разных зонах оптического спектра. Следует отметить, что до 1960г. не было прямых физиологических подтверждений существования трех различных типов чувствительных элементов сетчатки.

На рис. 4.20 показана схема модели цветового зрения, предложенная Фреем.

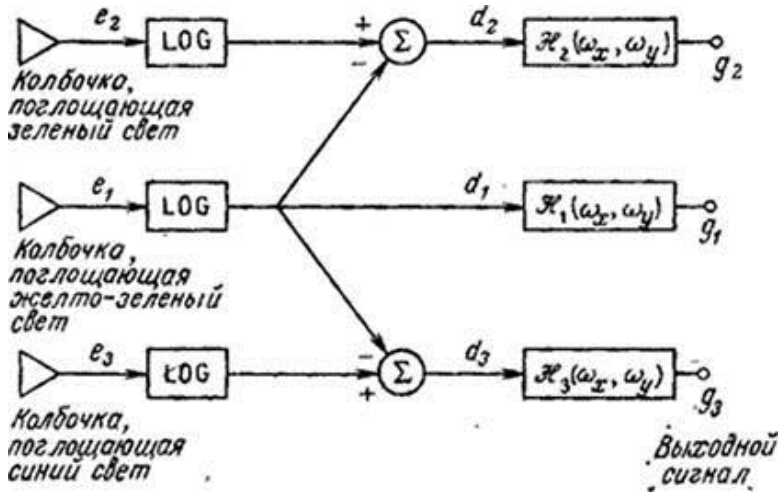


Рис. 4.20. Модель цветового зрения.

В этой модели три рецептора со спектральными чувствительностями  $s_1(\lambda)$ ,  $s_2(\lambda)$  и  $s_3(\lambda)$ , соответствующими трем пигментам колбочек сетчатки, создают сигналы

$$e_1 = \int C(\lambda) s_1(\lambda) d\lambda, \quad (1a)$$

$$e_2 = \int C(\lambda) s_2(\lambda) d\lambda, \quad (1б)$$

$$e_3 = \int C(\lambda) s_3(\lambda) d\lambda, \quad (1в)$$

где  $C(\lambda)$  - спектральная плотность энергии источника падающего света. Три сигнала  $e_1, e_2, e_3$  подвергаются затем логарифмическому преобразованию и объединяются так, чтобы получились сигналы

$$d_1 = \log e_1, \quad (2a)$$

$$d_2 = \log e_2 - \log e_1 = \log(e_2 / e_1), \quad (26)$$

$$d_3 = \log e_3 - \log e_1 = \log(e_3 / e_1) \quad (2b)$$

Эти сигналы проходят через линейные фильтры с частотными характеристиками  $\mathcal{H}_1(\omega_x, \omega_y)$ ,  $\mathcal{H}_2(\omega_x, \omega_y)$  и  $\mathcal{H}_3(\omega_x, \omega_y)$ ; получаемые на выходе сигналы  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$  определяют восприятие цветов в мозге.

В модели рис. 4.20 сигналы  $d_2$  и  $d_3$  характеризуют цветность, а сигнал  $d_1$  пропорционален яркости. Оказалось, что эта модель позволяет очень точно предсказать многие явления цветового зрения и хорошо согласуется с основными законами колориметрии. Известно, например, что **если спектральную плотность энергии источника света умножить на постоянную (одинаковую для всех длин волн), то цветовой тон и насыщенность, описываемые координатами цветности, останутся неизменными в широком диапазоне изменения интенсивности света.** Выражения (1) и (2) показывают, что сигналы цветности  $d_2$  и  $d_3$  в таком случае не изменяются, а сигнал яркости изменяется по логарифмическому закону. Другие особенности этой модели описаны Фреем.

Как уже отмечалось, некоторые данные о спектральной чувствительности  $s_i(\lambda)$  трех типов колбочек сетчатки были получены при измерении поглощения света пигментами колбочек (см. рис.4.14). Однако прямые физиологические измерения очень сложны и не могут быть выполнены с большой точностью. Косвенные оценки спектральной чувствительности колбочек были получены Конигом и Бродхуном при изучении аномалий цветового зрения. Джадд на основе этих данных нашел линейное преобразование, позволяющее установить связь

спектральных чувствительностей  $s_i(\lambda)$  с функциями сложения, найденными в колориметрических опытах. В результате были получены кривые, приведенные на рис. 4.21. Они унимодальны и строго положительны, как это и следует из физиологических представлений.

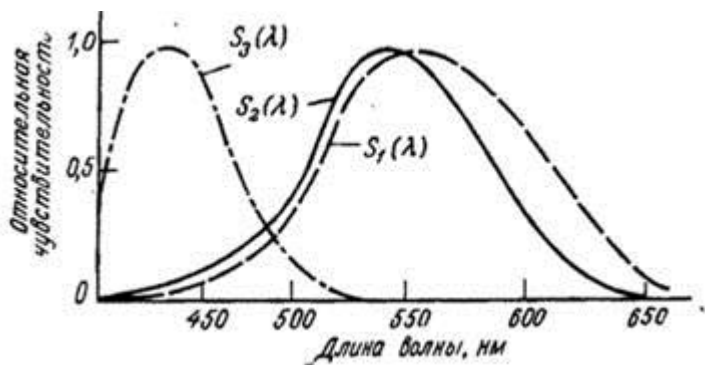


Рис.4.21. Спектральные чувствительности колбочек по данным Конига

Аналогично модели одноцветного зрения (рис.4.19) логарифмическая модель цветового зрения (рис.4.20) может быть дополнена линейными фильтрами, которые включаются после рецепторов. **Вместо логарифмической функции можно использовать нелинейную функцию общего вида.** Заметим, что, не изменяя выходного сигнала, можно изменить порядок выполнения линейных операций суммирования и преобразования. Схема расширенной модели цветового зрения представлена на рис.4.22.

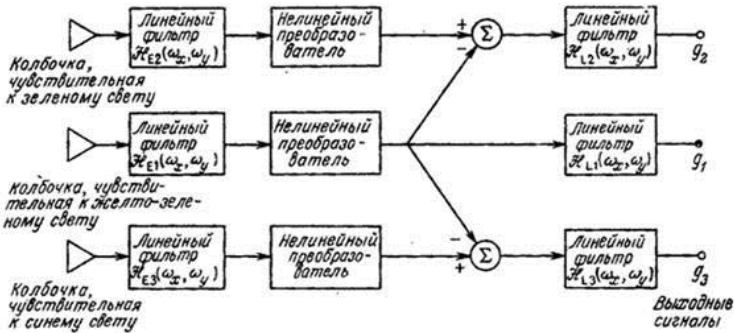


Рис. 4.22. Расширенная модель цветового зрения.

Можно ожидать, что пространственно-частотная характеристика яркостного канала, на выходе которого образуется сигнал  $g_1$ , будет подобна пространственно-частотной характеристике системы одноцветного зрения, которая рассматривалась в разд. 4.6. Результаты измерений частотной характеристики системы в окрашенном свете приведены на рис.4.23.

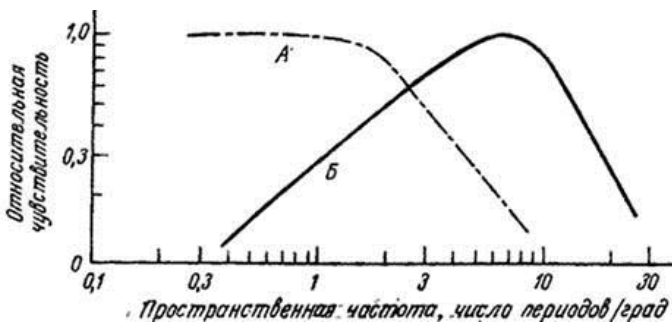


Рис.4.23. Пространственно-частотные характеристики зрительной системы человека: А – для окрашенного цвета; Б – для белого цвета.

Как видно, частотная характеристика, измеренная при использовании окрашенного света, сдвинута к низким пространственным частотам по сравнению с частотной характеристикой, измеренной с белым светом. **Латеральное**

**торможение** должно приводить к изгибу частотной характеристики на низких частотах. Этот изгиб получается, вероятно, на более низких частотах, чем те, которые входили в исследуемый диапазон.

Воспринимаемый цвет — понятие относительное. Ощущение, вызываемое светом с данным спектральным распределением энергии, зависит от окружающего фона и адаптации зрителя. Человек может очень хорошо адаптироваться к освещению сцены, используя опорный белый свет или общий цветовой баланс. Это свойство называется **цветовой адаптацией**.

В простейшей модели цветовой адаптации, предложенной фон Крисом, в схему зрительной системы (рис.4.22) между колбочками и первым линейным фильтром включается блок автоматической регулировки усиления. Коэффициент усиления

$$\alpha_i = \left[ \int W(\lambda) s_i(\lambda) d\lambda \right]^{-1} \quad (3)$$

для  $i = 1, 2, 3$  устанавливается так, чтобы усиленный сигнал колбочки равнялся единице при рассматривании опорного белого света со спектральной плотностью  $W(\lambda)$ . Модель фон Криса привлекает разумностью и простотой. Однако эксперименты показали, что эта модель не полностью описывает эффект цветовой адаптации. Уоллис высказал предположение о том, что цветová адаптация может быть частично объяснена действием механизма торможения, в результате которого ослабляются медленно изменяющиеся компоненты яркостного поля. Этот механизм может

моделироваться фильтрами с характеристиками  $H_{Li}(a_x, a_y)$  (рис.4.22). **Оба механизма - регулировки усиления и торможения - обеспечивают цветовую адаптацию.** Требуется дальнейший анализ и эксперименты, чтобы правильно объяснить это явление и построить его модель.



## **4.8. Пространственно-частотная характеристика глаза**

Одной из наиболее понятных и хорошо исследованных характеристик, используемых в физиологии зрительного восприятия, является реакция глаза на синусоидальную волну (РСВ), т. е. на тест-объект с синусоидальным изменением яркости по пространственной координате. Для анализа желательно рассматривать процесс зрения как линейный, чтобы можно было использовать аппарат линейной фильтрации и понятие оптической передаточной функции (ОПФ). Однако зрительные процессы не всегда линейны, как, например, в случае явления Маха. При низких контрастах зрительные процессы обычно приближенно считают линейными, тем не менее, чтобы подчеркнуть приближенный характер допущения о линейности, будем использовать для глаза РСВ, а не ОПФ. РСВ можно использовать применительно к линейным и нелинейным процессам; в случае нелинейности РСВ — неоднозначная функция, зависящая от уровня яркости и других параметров.

**Реакция глаза на синусоидальную волну определяется по меньшей мере восемью факторами:**

**дифракцией на зрачке;**

**абберациями хрусталика;**

**конечным размером чувствительных элементов сетчатки;**

**расфокусировкой;**

**тремором глаза;**

**взаимосвязью чувствительных элементов сетчатки; передачей информации по зрительному нерву;**

**обработкой информации в мозгу.**

РСВ глаза можно измерить пороговым методом по тест-объектам с синусоидальным распределением яркости, или надпороговым методом, сравнивая пики и провалы воспринимаемой синусоидальной волны с яркостью калиброванного регулируемого источника света. В случае порогового метода контраст, при котором с определенной степенью достоверности разрешается тест-объект с синусоидальным распределением яркости, откладывается на графике в зависимости от пространственной частоты (рис. 4.24).

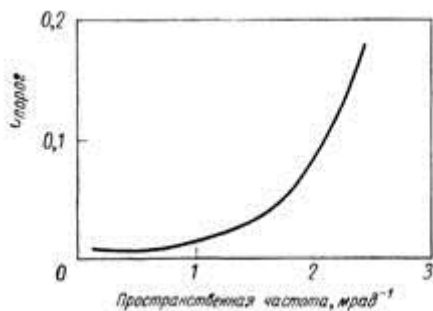


Рис.4.24. Пороговый контраст в зависимости от пространственной частоты для синусоидальной волны . Дистанция наблюдения 3 м, яркость фона 70 кд/м<sup>2</sup>.

Сделано предположение, что изменения в зависимости от пространственной частоты обусловлены пространственной фильтрацией и что пороговый контраст равен минимальному значению контраста Смит деленному на РСВ глаза. Следовательно, РСВ можно получить, разделив ординаты кривой на  $S_{\min}$  и взяв обратные величины (рис. 4.25).

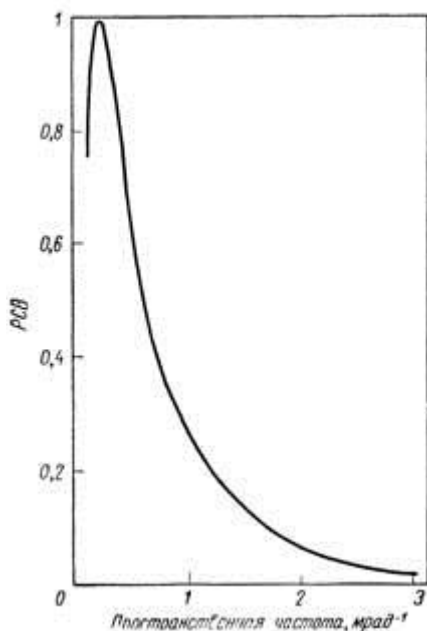


Рис. 4.25 РСВ глаза, рассчитанная по кривой порогового контраста, приведенной на рис. 4.24.

Проблемы, возникающие при измерениях такого рода, довольно очевидны. Пороговые измерения приходится проводить при низком значении отношения сигнала к шуму, так что восприятие тест-объекта с синусоидальным распределением яркости определяется не только сигналами в системе глаз—мозг, но и шумами в системе воспроизведения изображения, а также в процессах принятия решения в мозгу. Таким образом, результаты, полученные пороговым методом, не обязательно окажутся справедливыми в случае высоких контрастов, а на данные измерений, проведенных в надпороговых условиях, будут влиять нелинейные эффекты (явление Маха). Даже при условии, что зрительный аппарат в действительности — нелинейная, нестационарная и недетерминированная система, использование РСВ глаза все же

весьма полезно, особенно при анализе слабых сигналов. Реакция глаза на синусоидальную волну измерялась в различных условиях, причем существенное влияние на РСВ оказывают следующие факторы:

яркость поля адаптации (средняя яркость фона);  
дистанция наблюдения при постоянном увеличении;  
угловая ориентация объекта;  
цвет объекта;  
время наблюдения;  
временная частота предъявления.

Относительно РСВ глаза можно сделать следующие основные выводы:

Наблюдаемая пространственно-частотная характеристика глаза не является результатом действия одного пространственного фильтра, скорее это огибающая множества узкополосных резонансных фильтров. Каждый из этих фильтров настроен на свою среднюю частоту, и все они взаимно стохастически независимы. Каждый фильтр может быть выбран независимо, и мозг с известным приближением конструирует оптимальный для решения данной задачи обнаружения фильтр, выбирая соответствующие резонансные фильтры из имеющегося их набора.

Этот набор фильтров имеет огибающую типичной формы, показанную на рис. 4.26 для одной определенной совокупности условий.

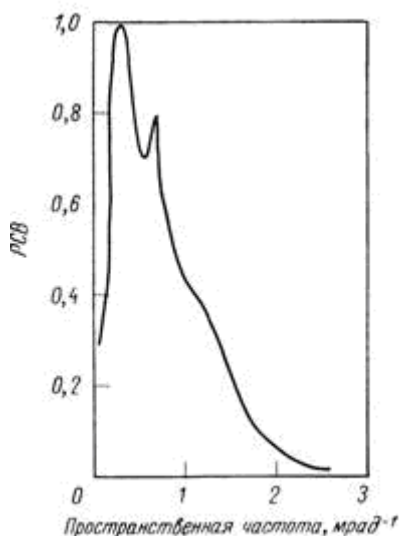


Рис.4.26. РСВ глаза, характеризуемая двумя максимумами, по результатам наблюдений экрана ЭЛТ с расстояния 1 м. Средняя яркость  $140 \text{ кд/м}^2$ .

В общем случае чувствительность мала при постоянном сигнале, резко возрастает до максимума на низких частотах и спадает примерно по гауссову закону на высоких частотах. В зависимости от индивидуальных особенностей двойной максимум, показанный на рис. 4.26, может быть ярко выраженным, едва заметным или вообще отсутствовать.

1. Пространственная частота, на которой наблюдается максимум, увеличивается с ростом яркости поля адаптации, и РСВ в целом охватывает более широкий частотный диапазон.

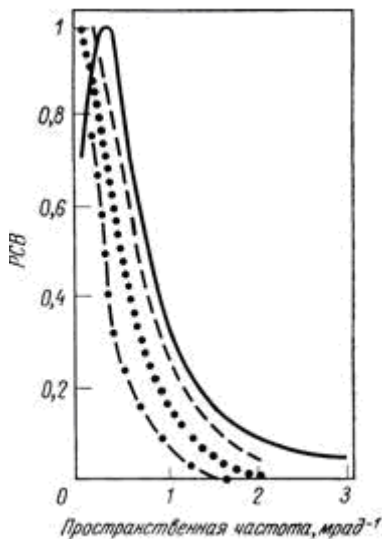


Рис. 4.27. РСВ глаза, иллюстрирующие влияние средней яркости объекта, по результатам измерений с помощью ЭЛТ.

**Средняя яркость поля адаптации:**  
 ————— 1700 кд/м<sup>2</sup>;  
 - - - - - 170 кд/м<sup>2</sup>;  
 . . . . . 14 кд/м<sup>2</sup>;  
 ●—●—● 1,4 кд/м<sup>2</sup>.

2. В характерном для индикаторов оптико-электронных устройств диапазоне яркостей максимум наблюдается в интервале 0,1—0,4 мрад-1.
3. При постоянном увеличении максимум сдвигается в сторону высоких частот с увеличением расстояния аккомодации. РСВ также расширяется с увеличением расстояния в связи с меньшей кривизной хрусталика и устранением лучей, идущих под большими углами к оси.
4. Пороговый контраст понижается с ростом яркости поля адаптации и расстояния аккомодации.

5. Пороговый контраст повышается, если направление штрихов синусоидального тест-объекта составляет угол  $45^\circ$  с вертикалью или горизонталью.

Первые непосредственные измерения РСВ глаза были выполнены Шаде в 1956 г. с помощью порогового метода. Многие исследователи повторяли с теми или иными вариациями фундаментальные опыты Шаде, и большинство из них подтвердили его основные результаты. Наиболее существенные отличия были получены Кемпбелом и Робсоном, которые сравнивали пороговые-контрасты для синусоидальной и прямоугольной волн, а также для прямоугольных и пилообразных пространственно-частотных тест-объектов и на основании проведенного гармонического анализа пришли к выводу, что в зрительном процессе участвует множество узкополосных резонансных фильтров. Затем Сахе и др. более прямым способом показали, что **РСВ глаза не является характеристикой одного фильтра, а является огибающей или суммой нескольких параллельных каналов, каждый из которых представляет узкополосный резонансный фильтр**. Кроме того, они показали, что **шумовые свойства каналов статистически независимы**. Измерения Штрмейера и Юлежа также подтвердили эту теорию.

Большинство измерений РСВ глаза проводилось пороговым методом, но обычные задачи, решаемые глазом, далеко не всегда соответствуют пороговым условиям. Поэтому особый интерес представляют исследования РСВ в надпороговых условиях, проведенные Ватанабе и др. При проведении ими надпороговых (а также пороговых) измерений сравнительным методом было обнаружено, что чем выше над порогом возрастает контраст тест-объекта, тем шире становится частотная характеристика. Они установили, что РСВ, полученные ими экспериментально, с достаточной точностью описываются следующими формулами:

$$\text{РСВ} = 1 - [1 + (f/f_0)^2]^{-1/2}$$

**и**

$$\text{РСВ} = 1 - [1 + (f/f_0)^2]^{-1};$$

**в области высоких частот при пороговых условиях**

$$\text{РСВ} = [1 + (f/f_1)^2]^{-2};$$

в области низких частот при пороговых условиях между (4.1) (4.2) в области высоких частот при надпороговых условиях

$$PCB = e^{-(f/f_2)^2}, \quad (4.4)$$

где  $f_0$ ,  $f_1$  и  $f_2$  — характеристические частоты.

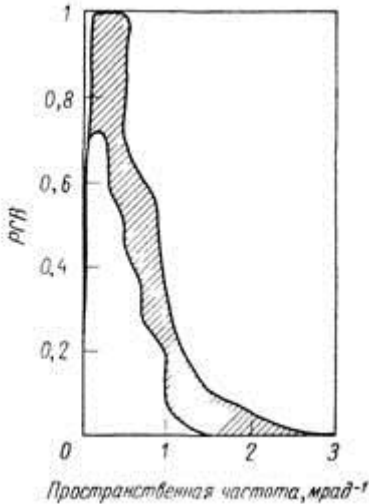


Рис. 4.28. Диапазон изменения PCV глаза по результатам различных экспериментов

На рис. 4.28 показан диапазон изменений PCV, полученных в различных исследованиях.

Из общих соображений зависимость PCV от уровня яркости можно объяснить следующим образом: при очень низких уровнях зрачок расширен и доминирующую роль играют аберрации; на средних уровнях (~70 кд/м<sup>2</sup>) характеристики определяются в основном свойствами сетчатки и функциями мозга, а на очень высоких уровнях при сильно суженном зрачке превалирует дифракция. В достаточной мере согласующиеся результаты, которые можно применять при решении проблем оптико-электронного воспроизведения изображения, содержатся в работах Шаде, Лоури и Депальма, Кемпбелла, Джилберта и Фендера, Поллена и Рерига, Куликовского, Робсона, Ваганаве и др. Максимум не наблюдается



при яркостях ниже  $20 \text{ кд/м}^2$ ; наиболее высокая разрешаемая пространственная частота по опубликованным результатам составляет  $3,44 \text{ мрад}^{-1}$ .

Понимание фильтрующих свойств зрительного аппарата важно по двум причинам. Во-первых, глаз сам с некоторым приближением представляет собой оптимальный фильтр, поэтому попытки улучшить характеристики глаза предварительной фильтрацией спектра изображения представляются сомнительными. Во-вторых, эффективная передача конечного изображения в глаз в большой мере зависит от общего увеличения системы. Действительно, нельзя передать глазу информацию на частоте  $4 \text{ мрад}^{-1}$ , если разрешающая способность глаза  $2 \text{ мрад}^{-1}$  или меньше. Проблема передачи информации и важность выбора оптимального увеличения являются предметом дальнейшего обсуждения.

По Шаде, спад РСВ глаза после максимума приближенно описывается гауссоидой

$$\text{PCB} \approx e^{-2\pi^2\sigma_e^2 f^2}, \quad (4.5)$$

где  $\sigma_e$  — среднеквадратичное отклонение функции рассеяния линии, определенной ранее. Рассмотрим РСВ гауссовой формы (рис. 4.29) для значений  $a = 0,15, 0,2, 0,25$  и  $0,3 \text{ мрад}$ .

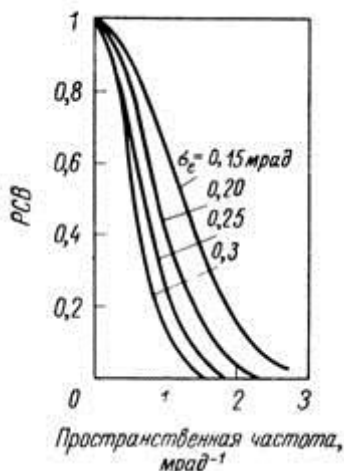


Рис. 4.29. РСВ, описываемые зависимостью  $\exp(-2\pi^2\sigma^2 f^2)$ .

Если сравнить эти кривые с экспериментально полученными результатами для РСВ глаза, можно видеть, что значительная часть представляющих интерес экспериментальных результатов укладывается в диапазон значений  $\alpha$  0,2—0,3 мрад. С другой стороны, можно использовать формулу

$$PCB \approx [1 + (f/f_1)^2]^{-2}, \quad (4.6)$$

предложенную Ватанабе и др. Несколько кривых, построенных в соответствии с этой формулой, показаны на фиг. 4.30.

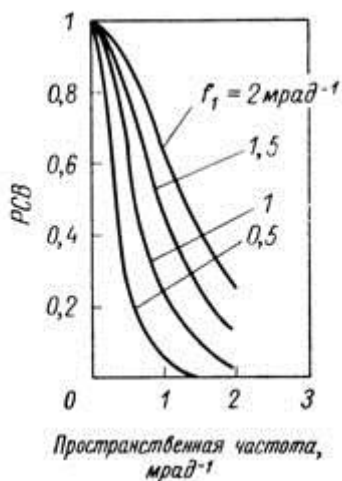


Рис. 4.30. РСВ, описываемые зависимостью  $[1 + (f/f_1)^2]^{-2}$ .

## 4.9. Влияние увеличения

Шаде предложил выбирать угловое увеличение прибора  $M$  таким образом, чтобы частоты, представляющие наибольший интерес, приходились на максимум РСВ. Это приближенный способ согласования **модуляционных передаточных функций (МПФ)** глаза и системы, чтобы получить наилучшую суммарную МПФ. Можно сделать еще шаг вперед, если попытаться решить вопрос, каким же по величине должно быть  $M$ , чтобы оптимизировать

эквивалентную полосу  $N'$  системы прибор — глаз. МПФ прибора хорошо аппроксимируется гауссоидой, удобной к тому же для анализа. С ростом увеличения  $M$  расширяется эффективная РСВ глаза относительно МПФ прибора. Обозначая величину среднеквадратичного отклонения для МПФ прибора через  $\sigma_s$ , можем написать

$$N' = \int_{0,2M}^{\infty} \text{PCB}^2(f) \tilde{r}_s^2(f) df = \int_{0,2M}^{\infty} \exp \left\{ -4\pi^2 f^2 \left[ \left( \frac{\sigma_e}{M} \right)^2 + \sigma_s^2 \right] \right\} df. \quad (4.8)$$

Здесь все частоты представлены как пространственные частоты в плоскости объекта, так что  $N'$  можно сравнить с полосой  $N_s$  прибора до участия глаза. Заменяя переменные интегрирования, запишем уравнение (4.8) в виде

$$N' = \frac{M}{2\pi (\sigma_e^2 + M^2 \sigma_s^2)^{1/2}} \int_{0,4\pi (\sigma_e^2 + M^2 \sigma_s^2)^{1/2}}^{\infty} e^{-x^2} dx. \quad (4.9)$$

Нормализуя (4.9) относительно  $N_s = 1/4\sigma_s \sqrt{\pi}$ , получим

$$\frac{N'}{N_s} = \frac{2M\sigma_s}{\sqrt{\pi} (\sigma_e^2 + M^2 \sigma_s^2)^{1/2}} \int_{0,4\pi (\sigma_e^2 + M^2 \sigma_s^2)^{1/2}}^{\infty} e^{-x^2} dx. \quad (4.10)$$

На рис. 4.31 представлен параметр  $N'/N_s$  в функции  $M\sigma_s$  при  $\sigma_e = 0,25$  мрад.

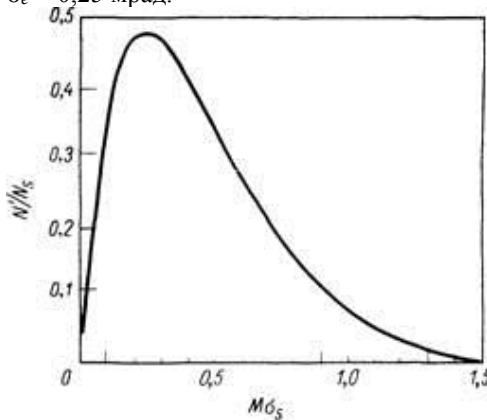


Рис. 4.31. Эквивалентная полоса системы прибор- глаз, отнесенная к полосе прибора, в зависимости от произведения увеличения  $M$  на величину  $\sigma_s$  прибора.

Из рассмотрения этой функции можно сделать следующие выводы. Во-первых, оптимальное увеличение равно  $1/(4 \sigma_s)$ , диапазон оптимума является широким и ухудшение  $N'/N_s$  вдвое соответствует изменению увеличения примерно в 5 раз. Во-вторых, величина  $N'$  при  $1/(4 \sigma_s)$  немного меньше половины  $N_s$  системы, равной  $0,141 / \sigma_s$ . В-третьих, ясно, что излишнее и недостаточное увеличения могут привести к существенному ухудшению общей разрешающей силы. Для примера можно рассмотреть систему с  $\sigma_s = 0,125$  мрад. Оптимальное увеличение в этом случае равно 2, и хорошие результаты, по-видимому, можно получить в диапазоне увеличений 0,8—4,0.

Беннет и др. установили в ходе исследования характеристик фотодешифратора, что увеличение элемента разрешения до размера, превышающего 0,873 мрад для глаза, приводит к ухудшению этих характеристик. Не стремясь к большой строгости, можно сказать, что граничная частота системы, деленная на  $M$ , не должна быть менее  $\sim 1,1$  мрад<sup>-1</sup>. Так, система с разрешением мрад<sup>-1</sup> должна иметь увеличение не более 3,6, что согласуется с проведенным рассмотрением.

#### **4.10. Визуальная чувствительность к пространственной частоте случайного шума**

Случайные шумы влияют на работу тепловизионной системы двояким образом. Во-первых, случайный шум влияет на способность наблюдателя обнаруживать и опознавать объект на экране индикатора. Во-вторых, некоторые виды шумов настолько неприятны сами по себе, что вообще не позволяют наблюдателю рассматривать экран индикатора. Поэтому важно знать, как воспринимается шум.

На различное восприятие глазом шумов, по-разному распределенных по пространственным частотам, первыми указали Мерц и Болдуин. Болдуин провел субъективные измерения восприятия различных по спектру телевизионных шумов, а Мерц по результатам этих измерений определил весовую функцию глаза применительно к восприятию шумов, т. е. чувствительность к пространственно-частотным составляющим случайного шума. Болдуин наблюдал своеобразный эффект независимости восприятия белого шума с резкой отсечкой граничной частоты /с от величины/с. По-видимому, это объясняется тем, что невосприимчивость высокочастотных шумов компенсирует увеличение амплитуды шумов, вызванное расширением полосы. Кольтман и Андерсон проверили эти наблюдения, измеряя условия обнаружения телевизионных тест-объектов при наличии шумов. Полученные результаты они подытожили следующим образом: маскирующее действие белого шума зависит только от мощности шума на единицу полосы и не зависит от верхней предельной частоты спектра шума при условии, что эта частота превышает граничную частоту, определяемую свойствами глаза. Последняя равна  $\sim 0,3$  мрад<sup>-1</sup>. Барстоу и Кристофер исследовали видимость шумов, используя телевизионный экран размером  $150 \times 200$  мм, рассматриваемый с расстояния 0,6 м; при наличии шумов наблюдались объекты яркостью  $1\text{—}2$  кд/м<sup>2</sup> на фоне  $\sim 10\text{—}2$  кд/м<sup>2</sup>. Они обнаружили, что мощность шума, сосредоточенная в узком спектральном диапазоне, оказывает более неприятное воздействие, чем та же мощность, распределенная в более

широкой полосе с той же центральной частотой. Шум в узком спектральном диапазоне на низкой частоте также более неприятен, чем шум той же мощности в высокочастотной области.

Барстоу и Кристофер дали описание видимой картины шумов различного типа. На очень низких частотах шумы проявляются в виде раздражающих черточек и полосок. При увеличении частоты шума картина похожа на мелкозернистый фотографический шум, но «зерна» случайным образом перемещаются в пространстве, причем видимый размер зерен уменьшается с ростом частоты. Шум в узкой полосе напоминает «елочку». Сравнивая влияние шумов в различных узких полосах, они получили кривую чувствительности глаза к телевизионным шумам (рис. 4.32).

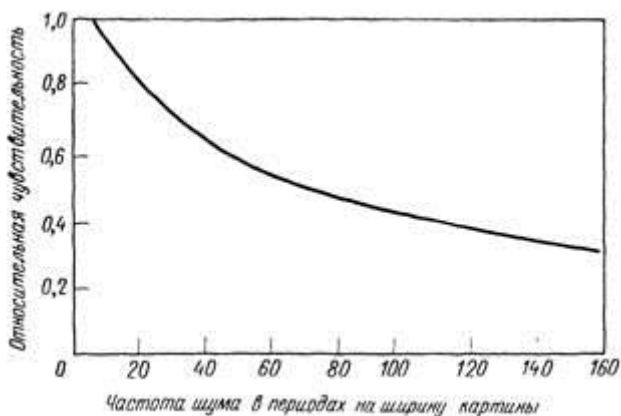


Рис. 4.32. Кривая восприятия шумов по данным Барстоу и Кристофера.

Эти исследования проводились в 1962 г. при соответствующем уровне телевизионной техники. Брейнард и др. провели аналогичные эксперименты для изображения в 225 строк с частотой 30 кадр/с.

Брейнард провел также измерения весовой функции шумов, используя телевизионное изображение со 160 строками в

кадре и кадровой частотой 60 Гц для квадратного кадра размером  $110 \times 110$  мм, наблюдаемого с расстояния 0,8 м. Он обнаружил некоторые дополнительные тонкости по сравнению с результатами, полученными ранее. Брейнард установил, что глаз более чувствителен к шумам в узких полосах, центрированных на частотах, кратных строчной частоте, чем к шумам между этими частотами. Этот эффект наблюдается только в сканирующих системах телевизионного типа. Возможное использование этого факта применительно к системам FLIR заключается в следующем: шум на кратных строчной частоте частотах проявляется как изменение уровня яркости от строки к строке; в пределах одной строки этот уровень приблизительно постоянен. Тот же эффект будет наблюдаться, если от строки к строке меняется уровень по постоянному току или усилению по переменному току, что характерно для систем, в которых каждая строка формируется отдельным приемником излучения. Нежелательность наличия таких шумов при переходе от строки к строке очевидна из данных Брейнарда, обнаруживающих повышенную чувствительность глаза к такого рода шумам.

Одно из наиболее всесторонних исследований влияния шумов было проведено Хуангом. Хуанг рассматривал три неподвижные черно-белые картины (лицо, человека в рост, группу людей), к которым он добавлял характеризующие гауссовым распределением резко ограниченные со стороны высоких частот аддитивные шумы, независимые в горизонтальном и вертикальном направлениях. Регулируя полосу независимо в каждом направлении, он мог получать кривые «равного качества», соответствующие различным комбинациям величин вертикальных и горизонтальных шумов, при которых наблюдалось одинаковое ухудшение изображения. Используя фотографии размером  $90 \times 90$  мм с отношениями сигнала к шуму 26, 22 и 18 дБ (что соответствует линейным отношениям 19,95, 12,59 и 7,94) и с полосами шума в горизонтальном и вертикальном направлениях  $N_x$  и в диапазоне  $1,076—1,908$  мрад<sup>-1</sup>, наблюдатели классифицировали изображения при освещенности 320 лк. На рис. 4.33 и 4.34 показана разница между кривыми равного качества для картин с умеренным (человек в рост) и большим (группа людей) числом деталей.

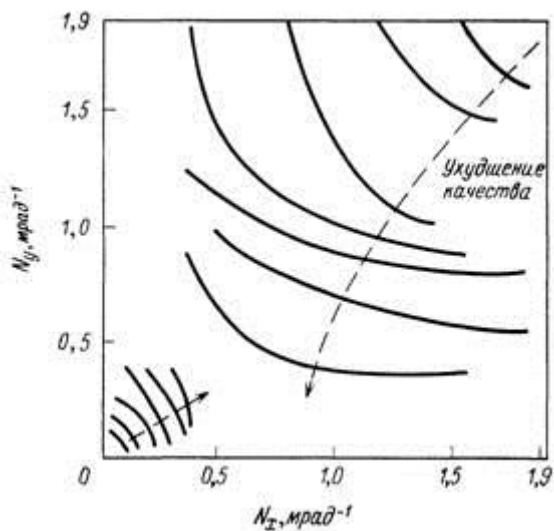


Рис. 4.33. Кривые равного качества изображения на карте шумов для картины с умеренным числом деталей (человек в рост).

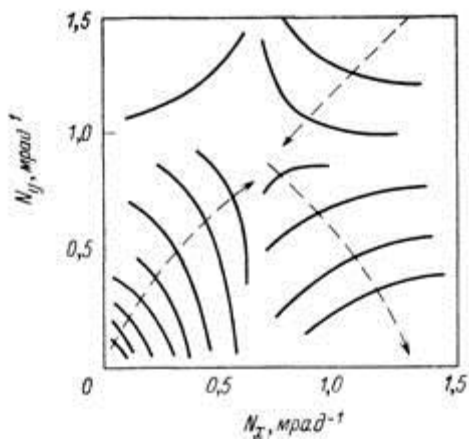


Рис. 4.34. Кривые равного качества изображения на карте шумов для картины с большим числом деталей (группа людей)



По результатам обработки данных Хуанг установил, что весовая функция шума имеет такой же характер, как РСВ.

На основании своих исследований Хуанг сделал следующие основные выводы:

1. Шум определенной мощности в резко ограниченной полосе особенно неприятен, когда ширина полосы приблизительно равна  $0,7 \text{ мрад}^{-1}$ ; раздражающее действие шума уменьшается при сужении или расширении полосы. Таким образом, при постоянной мощности шума равномерное расширение полосы в обоих направлениях приводит к увеличению раздражающего действия шума, которое достигает максимума при
2.  $7 \text{ мрад}^{-1}$ , а затем уменьшается.
3. Шум в виде горизонтальных штрихов менее неприятен, чем шум в виде вертикальных штрихов.
4. Шумы, частотный состав которых похож на частотный состав сигнала, оказывают меньшее раздражающее действие, чем другие шумы.

#### **4.11. Пространственные и временные интегрирующие свойства глаза**

Хорошо известно, что большой объект воспринимается при более низкой пороговой яркости, чем маленький, и что пороговая яркость простого тест-объекта в определенных пределах обратно пропорциональна корню квадратному из его площади. Это явление можно представить как интегрирование яркостей сигнала и шума по площади тест-объекта; его называют пространственным интегрированием или пространственной суммацией. Используя простейшие прямоугольные и квадратные тест-объекты, Кольтман и Андерсон, Шаде, а также Розелл и Вильсон показали, что для телевизионного изображения воспринимаемое отношение сигнала к шуму пропорционально корню квадратному из отношения площади объекта к площади корреляции шума в изображении. **Под воспринимаемым отношением сигнала к шуму понимается следующее.** Поскольку отношение сигнала к шуму в точке, т. е. для элемента, соответствующего площади корреляции, с ростом размера объекта существенно не меняется, из того факта, что глазу легче различать протяженные сигналы, можно заключить, что глаз воспринимает отношение сигнала к шуму, характерное для объекта в целом, а не для элемента. В случае системы FLIR область корреляции шума можно обычно принимать равной размеру на экране, соответствующему угловому размеру приемника излучения.

Пределы пространственной суммации были определены Баграшем и др. Они использовали тест-объекты круглой, квадратной и комбинированной формы и установили, что суммация прекращается для площадей ~11,6 мрад в диаметре и более. Их опыты с тест-объектами комбинированной формы подтверждают рассмотренную выше модель, объясняющую вид РСВ глаза как результат параллельного действия резонансных фильтров. Таким образом, суммация площадей действительно может рассматриваться как селективная пространственно-частотная фильтрация.

Растр в сущности является источником фиксированного полосчатого шума; возможно, поэтому в телевизионном

вещании горизонтальному растру отдано предпочтение перед вертикальным.

Инерция зрения, или способность глаза сохранять изображение в течение короткого промежутка времени, является общеизвестным фактом. Все знакомы с явлениями размытия изображения быстро движущегося объекта и инерцией восприятия вспышки света. Многочисленные опыты по определению порога видимости импульсных оптических сигналов показывают, что глаз сохраняет или накапливает сигнал в течение конечного промежутка времени и суммирует сигналы, разделенные малыми интервалами времени. Эксперименты по наблюдению движущихся изображений в оптикоэлектронных системах при наличии шумов подтвердили способность глаза интегрировать сигналы по времени и показали, что глаз воспринимает не мгновенное значение случайного шума, а его среднеквадратичную величину, усредненную за конечный период. Такое поведение глаза определяет условия получения удовлетворительных характеристик систем изображения с кадровой разверткой, и в настоящем разделе мы рассмотрим имеющиеся экспериментальные данные по этому вопросу. Большинство из этих экспериментов показывает, что есть основания связать способность глаза интегрировать сигналы по времени с эффективной постоянной времени глаза  $T_e$ . Давно известным соотношением, описывающим интегрирование глазом сигналов по времени, является закон Блонделя — Рея. Гласфорд приводит этот закон в виде следующего выражения:

$$L = L_{\infty} \left( 1 + \frac{0,21}{t_0} \right), \quad (4.11)$$

где  $L$  — пороговая яркость источника света, действующего в течение  $t_0$  с, а  $L_{\infty}$  — пороговая яркость источника, действующего бесконечно долго. Величину 0,21 можно рассматривать как постоянную времени  $T_e$ .

В 1943 г. Деврие на основании обзора имевшихся данных сделал заключение, что  $T_e = 0,2$  с. Роуз сравнивал визуальное восприятие шумов на экране кинескопа с фотографиями этих шумов, полученными с различными выдержками. По его мнению, наилучшее соответствие наблюдается при выдержке

0,25 с. Кольтман и Андерсон рекомендуют  $T_c = 0,2$  с, и данные Розелла и Вильсона хорошо согласуются с этой величиной.

По опубликованным данным других исследователей Шаде заключил, что  $T_c = 0,2$  с при низких уровнях яркости и уменьшается при высокой яркости до 0,1 с для палочкового и до 0,05 с для колбочкового зрения. Блэкуэлл исследовал визуальные пороги для двух импульсов продолжительностью 0,0025 с, разделенных интервалом от 0,004 до 0,475 с (шумы отсутствовали). Он наблюдал полную суммацию для интервалов менее 0,02 с; для больших интервалов (до 0,5 с) степень суммации непрерывно уменьшалась. Анализируя данные Грехэма и Маргариа, измерявших пороги в широком диапазоне значений выдержек, Будрыкис нашел, что эти данные хорошо согласуются с предположением об экспоненциальном характере затухания импульсной реакции  $e^{-t/t_0}$  при  $t_0 = 0,135$  с.

Титарелли и Мариот наблюдали двойные вспышки от источника света в форме диска диаметром 1' (продолжительность каждой вспышки 1,4 мс, интервал между вспышками изменялся от 20 до 140 мс). Они измеряли порог временного разрешения вспышек для колбочкового зрения и пришли к выводу, что 50%-ное ослабление реакции на оптический раздражитель происходит за 20 мс. Для пары вспышек, разделенных интервалом более 80 мс, уже не наблюдается улучшения порога, т. е. не происходит эффективного временного интегрирования для сигналов, разделенных интервалом, превышающим 80 мс. Отсюда можно было бы сделать вывод, что системы с кадровой частотой менее 12,5 Гц (т. е. 1/80 мс) не дают выигрыша, связанного с интегрированием картины по времени. Эти результаты не согласуются с другими исследованиями, в которых получены значения эффективной постоянной времени от 0,1 до 0,2 с.

Из обзора имеющихся данных можно сделать вывод, что в системах с быстрой кадровой разверткой, при условии что шум не коррелирован в пространстве от кадра к кадру, а сигнал остается постоянным, воспринимаемая картина, являющаяся результатом суммирования глазом нескольких кадров, имеет меньший уровень шумов, чем изображение

одного кадра. По мнению ряда авторов, результаты измерений реакции наблюдателя на тепловые изображения хорошо согласуются со значением  $T_e = 0,2$  с. Именно эта величина будет в дальнейшем использоваться.

Соображения по временной суммации играют важную роль при выборе скорости предъявления информации или кадровой частоты системы. Поскольку глаз, по-видимому, усредняет сигнал и среднеквадратичное значение некоррелированного шума за время  $T_e$ , то при постоянной мощности шума от кадра к кадру и стационарном изображении отношение сигнала к шуму увеличивается пропорционально корню квадратному из числа независимых кадров, укладываемых в интервале  $T_e$ . Это позволяет взаимно согласовывать такие параметры, как наблюдаемые мелькания, отношение сигнала к шуму за один кадр и частоту кадров, чтобы получить требуемое значение воспринимаемого отношения сигнала к шуму при незначительном мелькании.

Например, если нам удастся сохранить постоянной величину среднеквадратичного шума за кадр в точке экрана индикатора при увеличении кадровой частоты  $F$ , то воспринимаемое отношение сигнала к шуму будет расти пропорционально ( $f \propto F T_e$ ). С другой стороны, если величина среднеквадратичного шума за кадр по той или другой причине пропорциональна  $1/\sqrt{F}$ , как в системах, где мощность шума, отнесенная к корню квадратному из полосы пространственных частот, пропорциональна частоте кадров, увеличение  $F$  не будет оказывать влияния на воспринимаемое отношение сигнала к шуму, и  $F$  в этом случае следует увеличивать только до такого значения, чтобы она превысила критическую частоту мельканий.

## **4.12. Влияние кадровой развертки на восприятие изображения**

Дефекты изображения, связанные с разложением на кадры при сканировании, принадлежат к числу самых неприятных. В идеальном случае покадровая развертка, используя свойства глаза суммировать изображения во времени и пространстве, обеспечивает субъективное впечатление непрерывного во времени и пространстве изображения. Наихудший дефект изображения обнаруживается в том случае, когда глаз ощущает, что изображение не непрерывно во времени. Такое восприятие действия кадровой развертки называется эффектом мельканий или просто мельканием.

### **4.12.1. Мелькания**

Мелькания представляют собой сложное явление, свойства которого по-разному воспринимаются наблюдателями и в сильной степени зависят от характеристик индикаторного устройства. Понимание этого явления весьма важно с точки зрения физиологии зрительного восприятия, так как оно показательно для сущности механизма обработки информации в мозгу. Поэтому мелькания широко исследовались применительно к задачам физиологической оптики. Восприятие мельканий, по-видимому, представляет вероятностную функцию с очень резким переходом от видимости к невидимости. С ростом кадровой частоты изображения мелькания становятся неразличимыми при превышении определенной частоты, называемой критической частотой мельканий  $F_{кр}$ . На самом деле при неограниченном росте кадровой частоты  $n$  соответственно числа независимых интегрируемых кадров и при постоянных шумах за один кадр мы приходим к случаю, когда видимость будет ограничиваться имеющимся контрастом, а шумы системы станут несущественными.

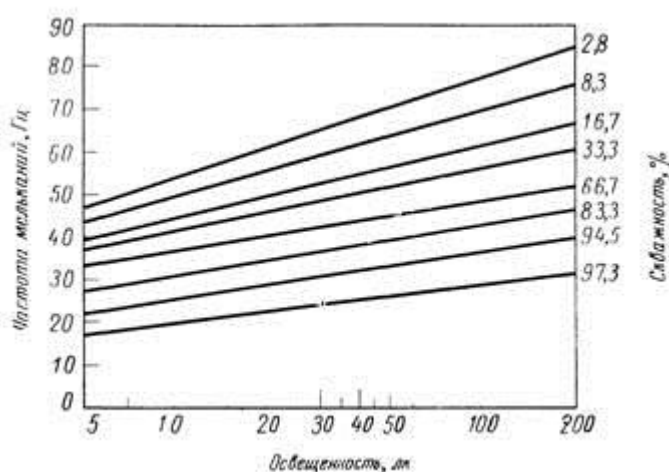


Рис. 4.35. Частота мельканий в зависимости от освещенности экрана и скважности.

В изображающей системе мелькания должны быть устранены, поскольку в лучшем случае они будут раздражать и рассеивать внимание, а в худшем — вызывать головную боль, утомление глаз и тошноту. Особенно важно устранить мелькания в диапазоне альфаритма (~3—10 Гц), поскольку они могут вызвать конвульсии или возбудить симпатические ритмы в мозгу с неочевидными последствиями. Ясно, что мелькания являются серьезным дефектом, и их нельзя допускать в системе.

Мелькания на экране индикатора изображающего устройства были впервые исследованы Энгстромом, пионером телевидения. Энгстром варьировал скважность импульсов, кадровую частоту и освещенность экрана индикатора прямоугольными импульсами. Оптический индикатор с белым экраном имел размеры 300 × 400 мм и рассматривался с расстояния 1,5 м при окружающей освещенности ~10 лк. Трубка индикатора была заперта. Энгстром установил, что  $F_{кр}$  зависит от углового размера изображения на экране индикатора, яркости поля адаптации и закона изменения яркости. Данные, приведенные на рис. 4.35, показывают, что в определенных пределах  $F_{кр}$  пропорциональна логарифму пика освещенности. Энгстром повторил эксперименты на кинескопе с экраном, имеющим

длительное послесвечение, чтобы показать эффект накопления, а Шаде экстраполировал данные Энгстрема на случаи других констант экспоненциального затухания люминесцентных экранов.

Видимая яркость мигающего поля при частоте мельканий, превышающей  $F_{кр}$ , описывается законом Тальбота. Если яркость меняется со временем как  $L(t)$  и время кадра равно  $T_f$ , то эквивалентная воспринимаемая яркость стационарной картины  $U$  по закону Тальбота будет равна

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

(4.12)

Это значит, что, если частота превышает  $F_{кр}$ , видимая яркость равна усредненной по времени яркости. По Люксенбергу и Кюну, отклонения от этого закона при экспериментальных проверках никогда не превышали 0,3%.

Важный эффект, часто ошибочно не учитываемый при проектировании систем,— зависимость  $F_{кр}$  от расположения мелькающего источника в поле зрения. Было замечено, что  $F_{бр}$  растёт с увеличением угла, отсчитываемого от оси зрения. Таким образом, периферическое зрение более чувствительно к мельканиям, чем центральное зрение. Нередко приходится иметь дело с системой, в которой увеличение выбрано из соображений согласования с разрешающей способностью глаза без учета мельканий и в которых мелькания на краю поля зрения действуют раздражающе. Отсюда следует вывод, что для индикатора большого размера нужно обеспечивать высокую кадровую частоту либо оставлять экран индикатора малым при сравнительно низкой частоте мельканий. С восприятием мельканий связан стробоскопический эффект, благодаря которому передаваемая последовательностью кадров движущаяся картина воспринимается как непрерывное движение, пока глаз не замечает мельканий.

#### **4.12.2. Чересстрочная развертка**

На ранней стадии исследований в области телевидения Энгстрем показал, что при данной кадровой частоте мелькания можно устранить с помощью так называемой двухходовой чересстрочной развертки. В этой схеме кадр делится на два последовательных изображения, называемых полями, каждое из которых передается с частотой, вдвое превышающей частоту кадров. Первое поле



содержит только четные (или нечетные) строки раstra, а второе — остальные строки (рис. 4.36).

Если экран индикатора наблюдается с такого расстояния, что не происходит разрешения отдельных строк раstra, глаз сливает оба изображения, создавая визуальное впечатление однородности картины по всей площади. Благодаря этому методу частота кадров удваивается и превышает Гър. Однако в случае разрешения строк изображение будет мерцать, или сцинтиллировать. Это явление связано со сдвигом фаз в соседних строках на полупериод кадра и называется междустрочным мерцанием.

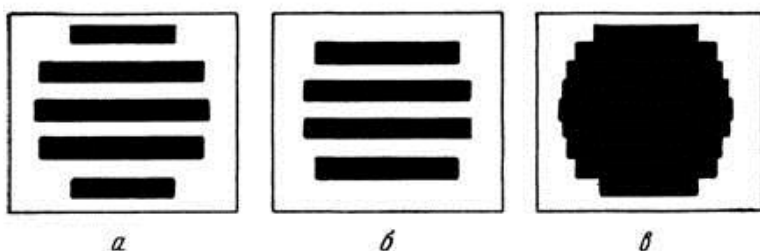


Рис. 4.36. Чересстрочная развертка. а — первое поле; б — второе поле; в — полный кадр.

Энгстрем показал экспериментально связь междустрочного мерцания с разрешением строк; с учетом этой связи решается компромиссная проблема обеспечения приемлемых характеристик мерцания и разрешения в системе. Энгстрем также указал, что моргание, быстрые движения глаз или головы могут стать причиной восприятия наблюдателем только одного поля. Это очень неприятный эффект, который усиливается с увеличением кратности чересстрочной развертки. Субъективное впечатление таково, что картина расчленена на полосы.

Если по каким-либо причинам, например из соображений сохранения ширины полосы или телевизионного стандарта, необходимо устранить мелькания протяженных участков, применяя чересстрочную развертку, а не увеличение частоты кадров, то нужно рассмотреть компромиссные решения. С одной стороны, можно выбрать такое увеличение изображения, чтобы полностью использовать разрешающую способность системы, допустив при этом междустрочное мерцание. С другой стороны, можно уменьшить

увеличение в такой мере, чтобы устранить междустрочное мерцание, пожертвовав при этом разрешением. Другой эффект был отмечен Шаде, который наблюдал, что четкий растр тонкой структуры существенно ухудшает видимость и шумов, и деталей картины. Когда Шаде устранял растровую структуру путем расфокусировки или увеличения дистанции наблюдения, заметно повышался видимый уровень шума, но при этом существенно улучшалось и восприятие деталей изображения.

Хороший обзор дефектов, вносимых растром в изображение при кадровой частоте 30 Гц и чересстрочной развертке с кратностью 2 : 1, дан Брауном. Он заметил, что если оптическим путем заэкранировать все строки, кроме одной, то эта неэкранированная строка представляется стабильной и немигающей, а если оставить неэкранированными две соседних строки, то наблюдается осцилляция строк. При рассматривании полной картины междустрочное мерцание воспринимается только на малых участках равномерной яркости, и мелькания особенно заметны на границах этих участков.

Браун описал также явление сползания строк при чересстрочном разложении, когда создается впечатление, что строки сползают вверх или вниз, причем кажущееся направление сползания зависит от индивидуальных особенностей глаза, в частности от направления, в котором глаз преимущественно осуществляет отслеживание картины. Сползание строк наблюдается в условиях восприятия междустрочного мерцания и становится более заметным при увеличении яркости картины и углового расстояния между строками. Другие исследователи установили, что сползание строк проявляется сильнее и становится особенно неприятным при повышении кратности чересстрочной развертки.

Браун исследовал также субъективное влияние сужения видеополосы в телевизионной системе при введении чересстрочной развертки (кратность 2 : 1) и сохранении постоянной кадровой частоты. Он сравнивал картину, полученную с обычной разверткой при числе строк на высоту кадра от 189 до 135, изменяя число строк ступенями в 21/9 раза, с картиной, сформированной в кадре с числом строк 225 и чересстрочной разверткой, чтобы исследовать влияние освещенности. Браун сравнивал также изображение в кадре с числом строк от 225 до 135, изменяя число строк ступенями в 21/4 раза при обычной развертке с изображением, полученным с чересстрочной разверткой при числе строк 225, чтобы исследовать влияние шумов и связанных с их восприятием параметров.

Наиболее интересный вывод Брауна заключается в том, что субъективно междустрочное мерцание воспринимается наблюдателем как шум. В этом легко убедиться, наблюдая изображение с высоким отношением сигнала к шуму при высокой яркости (150—300 кд/м<sup>2</sup>) на экране телевизора с близкого расстояния и обращая внимание на видимое наличие шумов по вертикали.

Часто по экономическим соображениям выгодно использовать чересстрочную развертку с кратностью более 2:1, однако эффекты ухудшения изображения в этом случае недостаточно хорошо известны. Индерхиз [50] исследовал пороги мерцания, используя осциллограф с экраном из люминофора типа Р1 и формируя 12-строчный прямоугольный растр с чересстрочной разверткой с кратностью 2 : 1, 3 : 1 и 4 : 1 (с чередованием полей 1—2—3—4 и 1—3—2—4). Он использовал кадровые частоты 20, 25, 30 и 40 Гц и определял порог междустрочного мерцания в зависимости от яркости экрана и типа развертки (фиг. 4.14).

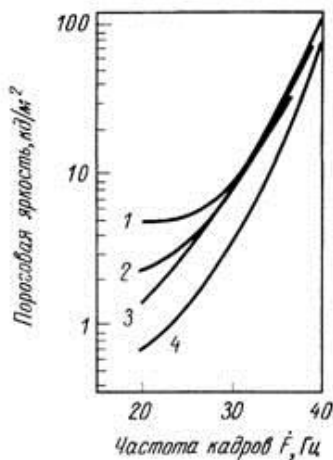


Рис. 4.37. Порог междустрочного мерцания в зависимости от типа чересстрочной развертки и частоты кадров

1 — кратность развертки 2:1; 2 — кратность развертки 3 : 1; 3 — кратность развертки 4 : 1 (чередование строк 1—2—3—4); 4 — кратность развертки 4 : 1 (чередование строк 1—3—2—4).

Индерхиз также наблюдал эффект сползания строк в том случае, когда междустрочное чередование идет в одном направлении. Глаз при этом имеет тенденцию воспринимать каждую строку отдельно, в результате чего возникает кажущееся движение всего растра в вертикальном направлении.

### **4.12.3. Мелькания края**

При использовании систем тепловидения многие наблюдали еще один кадровый эффект, проявляющийся в мелькании края линии сканирования при сканировании в двух направлениях с малым мертвым временем сканирования. Точки близ каждого края растра освещаются дважды в течение короткого промежутка времени при прямом и обратном ходе линии сканирования, и, если интервал времени между этими двумя засветками мал, мозг может воспринять их как одну засветку.

Рассмотрим простой случай линейной развертки в двух направлениях с мертвым временем сканирования  $t_0$  секунд/кадр, временем кадра  $T_f$  и шириной индикатора  $W$ . Предположим, что мертвое время поровну поделено между правым и левым краями, и рассмотрим изменение во времени яркости произвольной точки  $N$  экрана индикатора (рис. 4.38), где точки 1 и 2 определяют границы индикатора, но не концы линии сканирования.

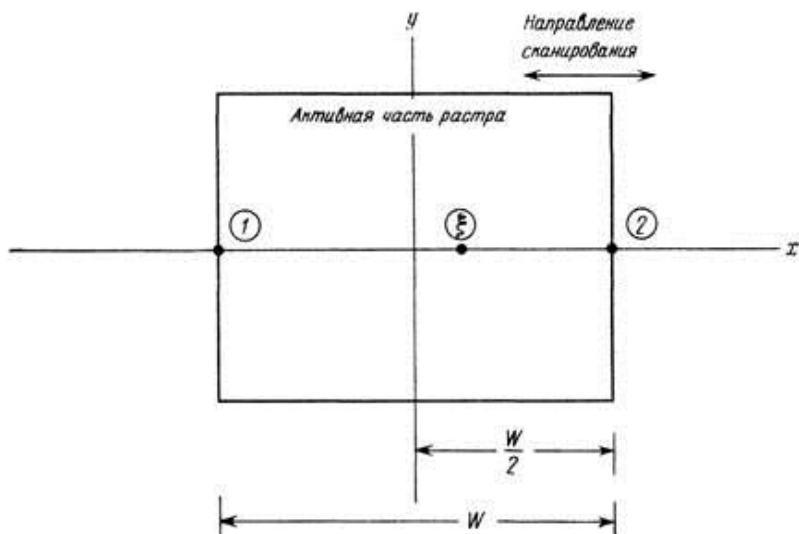


Рис. 4.39. К рассмотрению мелькания края.

На рис. 4.40 показано положение этих точек в моменты времени, когда точки 1,2 и  $\xi$  освещены.

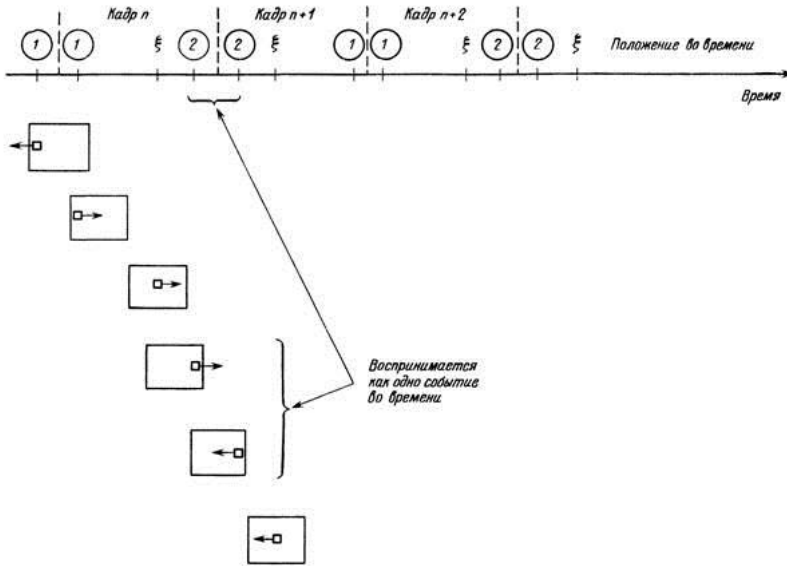


Рис. 4.40. Последовательность событий при мельканий края.

При высокой скважности и малом мертвом времени точка 2 будет освещена дважды в течение короткого промежутка времени, и глаз может воспринять эти две вспышки как одно событие. Такой же эффект наблюдается в точке 1 на другом краю индикатора и может также наблюдаться в произвольной точке  $\xi$ , если она окажется достаточно близко к краю- индикатора.

Если две последовательные засветки в точке  $\xi$  воспринимаются слитно, то легко убедиться, что кажущаяся частота кадров  $F'$  будет ниже фактической частоты  $F$ . Кажущаяся частота кадров  $F'$  в точке  $\xi$  определяется выражением

$$\dot{F}' = \frac{\dot{F} (W - \xi)}{2 (W/2)} = \frac{\dot{F} (W - \xi)}{W}. \quad (4.13)$$

Частота кадров снижается не в каждой точке  $\xi$ , а только в точках, близких к краю. Например, для  $\xi = W/2$  (т. е. на каждом

краю)  $\dot{F}' = \dot{F}/2$ . Влияние мелькания края на восприятие изображения недостаточно ясно, чтобы предсказать его последствия, однако это еще один фактор, который заставляет отдать

предпочтение высоким частотам кадровой развертки и сканированию в одном направлении.

Энгстрем смоделировал изображения телевизионного типа без чересстрочной развертки при частоте 24 кадр/с и числе строк на высоту кадра 60, 120, 180, 240 и бесконечность. Используя высоту индикатора 150, 300 и 600 мм и освещенность от 50 до 60 лк, Энгстрем определял оптимальную дистанцию наблюдения.

Он установил, что наблюдатели обычно выбирают дистанцию, на которой растр едва заметен, и что меньшие дистанции отвергаются именно из-за видимости раstra. Результаты приведены на рис. 4.41 и 4.42.

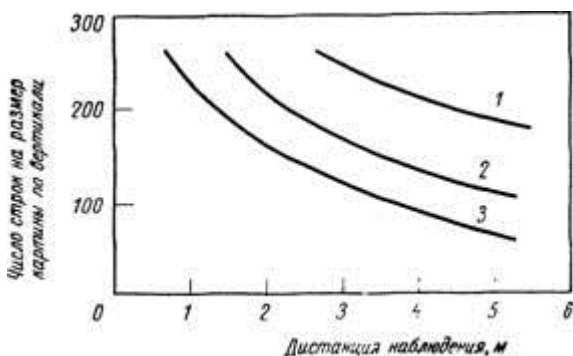


Рис. 4.41. Видимость строк раstra в зависимости от размера картины по вертикали и дистанции наблюдения.

Размер" по вертикали: 1 — 600 мм; 2 — 300 мм; 3 — 150 мм.

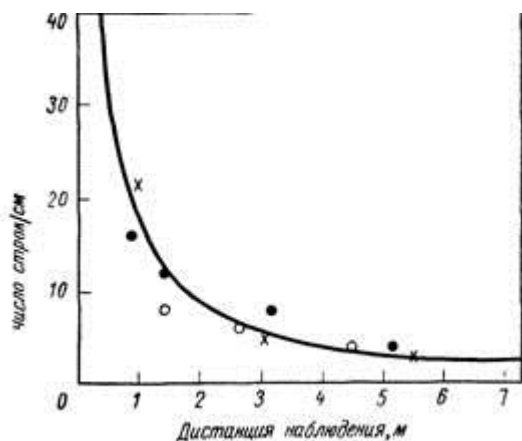


Рис. 4.42. Разрешаемое число строк раstra на сантиметр в зависимости от дистанции наблюдения для трех размеров картины по вертикали.

Кривая соответствует угловому расстоянию между строками  $2'$ ; размер картины по вертикали: #150 мм; O 300 мм; X 600 мм.

Кривая на рис. 4.42 показывает, что наблюдатели произвольно выбирают дистанцию, с которой расстояние между строками видно под углом  $0,58$  мрад ( $2'$ ). Энгстрем также нашел, что если изображения, полученные с использованием раstra и без него, рассматриваются с дистанции, обеспечивающей одинаковую видимость, то эта дистанция примерно на 50% превышает оптимальное расстояние наблюдения изображения с растром. В более поздних экспериментах Томпсон определял оптимальные дистанции наблюдения для телевизионного изображения с растром и изображения, в котором строчная структура раstra подавлена колебаниями электронного луча. Он установил, что для 480 активных строк, 60 полей и частоты 30 кадр/с средние оптимальные дистанции были таковы, что угловой размер картины с растром составлял по вертикали  $7,6^\circ$ , а картины без раstra  $13,1^\circ$ . Это соответствовало примерно  $0,28$  мрад на строку в первом случае и  $0,48$  мрад на строку во втором. Первая цифра расходится с результатами Энгстрема, что, возможно, объясняется большим числом наблюдателей у Томпсона. В этом отношении весьма



показательным является распределение по наблюдателям, представленное на фиг. 4.19.

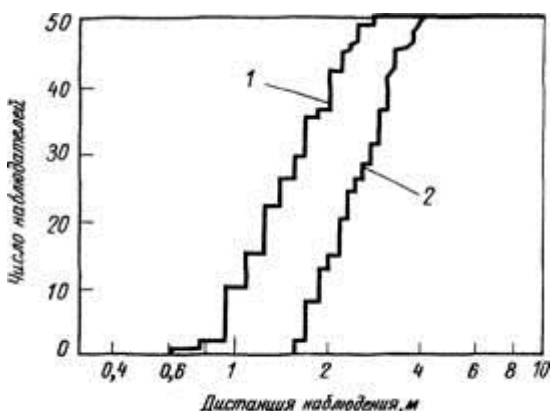


Рис. 4.43. Число наблюдателей, выбирающих дистанцию менее указанной.

1 — изображение, в котором строчная структура раstra подавлена колебаниями электронного луча; 2 — обычное изображение.

Один из выводов, который можно сделать на основании этого распределения, заключается в том, что система с фиксированным увеличением (или с фиксированной дистанцией наблюдения) удовлетворит только небольшую часть наблюдателей.

Ясно, что неограниченное уменьшение числа строк на высоту кадра в конечном счете приведет к недопустимому для данного класса картин ухудшению качества изображения. Энгстрем на основании своих исследований указывает, что для телевизионного вещания 240 строк являются удовлетворительными, 180 — недостаточными, 120 — приемлемыми на пределе, 60 — недопустимо малыми. В большинстве случаев применения FLIR аналогичных оценок не делалось, однако для решения таких задач, как навигация и разведка поля боя, следует, по-видимому, принять цифры, близкие к указанным. Таким образом, рекомендации Энгстрема применимы и для FLIR.

#### **4.12.4. Роль яркости окружающего фона**

Опыт специалистов, использующих оптико-электронные изображающие приборы, показывает, что теоретически рассчитанные характеристики не всегда достигаются в практических условиях. Часто ухудшение характеристик связано с сильным влиянием яркости окружающего фона на восприятие информации с экрана индикатора. Глаз адаптируется к средней яркости окружающего фона, поэтому попытка обеспечить хорошее восприятие за счет высокой яркости экрана индикатора не приведет к желаемым результатам, если окружающий фон будет темным. Глаз будет адаптироваться к среднему (низкому) уровню яркости и, следовательно, будет работать не в оптимальных условиях. Для учета этого явления Люксенберг и Кюн ввели коэффициент окружающего фона  $F_s$  как отношение яркости окружающего фона к яркости рабочей поверхности. Например, окружающим фоном может быть внутренность кабины летчика, а рабочей поверхностью — экран индикатора. По мнению Люксенберга и Кюна, коэффициент  $F_s$  влияет на визуальное восприятие следующим образом:

1. При  $0,1 < F_s < 1$  обеспечиваются оптимальные условия зрительного восприятия.
2. При  $F_s \ll 0,1$  условия зрительного восприятия хуже, чем в предыдущем случае.
3. Условие  $F_s > 1$  соответствует наихудшему случаю.

Важность коэффициента  $F_s$  применительно к системам тепловидения убедительно показал Кийя. Характеристики обнаружения и опознавания цели оператором FLIR существенно улучшаются, когда экран индикатора FLIR окружен равномерным фоном примерно такой же яркости, что и экран. Этот факт имеет большое значение, поскольку при использовании FLIR типичным является наблюдение через светонепроницаемый окуляр или непосредственное наблюдение экрана индикатора на темном фоне. Таким образом, оценивая требуемый уровень яркости индикаторов тепловизионных систем, необходимо знать и учитывать световой уровень окружающего фона, чтобы можно было обеспечить хороший коэффициент окружающего фона.



### **4.13. Обнаружение объектов на фоне случайных шумов**

Обнаружение простых объектов на фоне случайных шумов является хорошо изученным визуальным процессом. Исследовано маскирующее действие двух основных типов шумов. Это — не зависящие от сигнала аддитивные гауссовы шумы, типичные для фотонных приемников излучения, работающих при высоком уровне фона, и зависящие от сигнала мультипликативные пуассоновы шумы, присущие оптическим сигналам и типичные для приемников излучения, работающих при низком уровне фона. Попытки объяснить сущность обнаружения визуальной системой оптических сигналов на фоне шумов, распределенных по законам Гаусса и Пуассона, и теоретически предсказать результаты эксперимента делаются на основе **флуктуационной теории**. История развития и основные положения флуктуационной теории рассмотрены Лего . В последующих разделах данной главы рассмотрены отдельно два типа шумов, суммированы результаты экспериментов и показана их взаимосвязь.

#### **4.13.1. Обнаружение на фоне не зависящих от сигнала шумов**

Вероятность обнаружения различных простых объектов на фоне аддитивных белых гауссовых шумов исследовалась Кольтманом , Кольтманом и Андерсоном , Шаде , а также Розеллом и Вильсоном . Кольтман и Андерсон получали прямоугольную волну на телевизионном экране на фоне белого гауссова шума и определяли порог обнаружения в зависимости от пространственной частоты. Шаде определял условия обнаружения на фотографиях трехштрихового тест-объекта на фоне шумов. Розелл и Вильсон определяли пороги обнаружения прямоугольных тест-объектов на фоне «живых» шумов на телевизионном экране. Некоторые из этих экспериментальных результатов представлены на рис. 4.44 для конкретных значений постоянной времени глаза  $T_e$ , частоты обновления информации  $F$ , площади объекта на индикаторе  $A_t$ , площади корреляции шумов на индикаторе  $A_c$  (номинально соответствующей элементу разрешения), спектра напряжения шума  $g$  (/) и МПФ

видеоконтрольного устройства гш. Все эти эксперименты убедительно показывают, что вероятность обнаружения является однозначной функцией отношения сигнала к шуму, если остальные параметры качества изображения остаются постоянными.

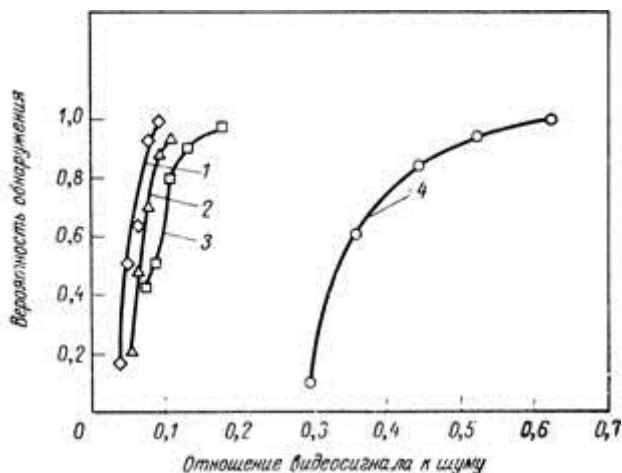


Рис. 4.44. Вероятность обнаружения в зависимости от отношения видеосигнала к шуму для прямоугольных тест-объектов. Размеры тест-объектов: 1 — 4 x 180 строк; 2 — 4 x 128 строк; 3 — 4 x 64 строк; 4 — 4x4 строк.

Кольтман с Андерсоном, Шаде, а также Розелл с Вильсоном обобщили эти результаты на широкий класс условий, используя концепции о пространственных и временных интегрирующих свойствах системы. Эффект пространственного интегрирования учитывается предположением, что глаз улучшает отношение сигнала к шуму изображения в  $(AtIAc)1/*раз$ , а улучшение за счет временного интегрирования учитывается коэффициентом  $(TeF)1!2$ . Тогда можно определить воспринимаемое отношение сигнала к шуму  $(C/Ш)_{p1}$  формулой

$$(C/Ш)_p = (C/Ш)_i (T_e \dot{F} A_i / A_c)^{1/2}, \quad (4.14)$$

где  $(C/Ш)_i$  — отношение сигнала к шуму в точке изображения, т. е. в области корреляции  $A_c$ , а

$$A_c = \beta \left[ 2 \int_0^\infty g^2(f) \tilde{r}_m^2(f) df \right]^{-1}. \quad (4.15)$$

Экспериментальные данные такого рода описываются универсальной кривой, показанной на рис. 4.45 и устанавливающей связь между вероятностью обнаружения и  $(C/Ш)_p$ . Нормализованные данные с рис. 4.44 показаны в виде точек, наложенных на теоретическую кривую рис. 4.45.

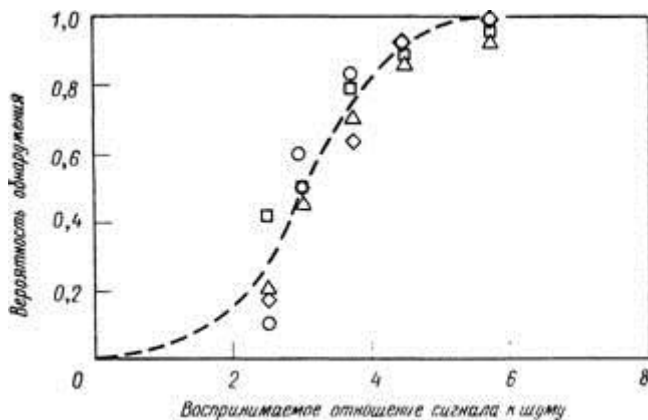


Рис. 4.45. Вероятность обнаружения прямоугольных тест-объектов в зависимости от  $(C/Ш)_p$ . Размеры тест-объектов: O  $4 \times 180$  строк; д  $4 \times 128$  строк; □  $4 \times 64$  строк; o  $4 \times 4$  строк.

Розелл относит эту величину к индикатору  $(C/Ш)$ . Мы считаем такое обозначение неточным, поскольку речь идет об отношении сигнала к шуму, воспринимаемому визуальной системой. Эта кривая представляет интегральный закон распределения гауссовой плотности вероятности. Обозначая вероятность обнаружения как функцию  $(C/Ш)_p$  через  $P(c/ш)_p$ , имеем

$$P_{(C/Ш)_p} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(C/Ш)_p - \mu} e^{-\xi^2/2\sigma^2} d\xi. \quad (4.16)$$

Данные Розелла и Вильсона дают среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  порядка 1 и среднюю величину  $\mu$  порядка 3,2. Уравнение (4.16) можно сформулировать следующим образом. Величина  $P_{(C/Ш)_p}$  есть вероятность того, что сигнал плюс мгновенное значение шума превышают  $3,2\sigma$ . Другой смысл этой функции распределения вероятности заключается в том, что вероятность правильного обнаружения сигнала на экране индикатора равна вероятности того, что отношение сигнала к шуму равно  $3,2$  или больше.

Различные эквивалентные выражения для этой функции имеют вид

$$P_{(C/Ш)_p} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(C/Ш)_p - 3,2} e^{-\xi^2/2} d\xi,$$

$$P_{(C/Ш)_p} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{3,2 - (C/Ш)_p}^{\infty} e^{-\xi^2/2} d\xi,$$

$$P_{(C/Ш)_p} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(C/Ш)_p} e^{-(\xi - 3,2)^2/2} d\xi,$$

$$P_{(C/Ш)_p} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{(C/Ш)_p - 3,2}^{\infty} e^{-(\xi - (C/Ш)_p)^2/2} d\xi. \quad (4.17) - (4.20)$$

Для  $(C/Ш)_p > 1$  эта функция может быть аппроксимирована более простым выражением (4.17) (4.18) (4.19) (4.20)

$$P_{(C/Ш)_p} \approx 1 - \exp[-B((C/Ш)_p - A)^2], \quad (4.21)$$

где пары параметров  $A$  и  $B$  могут иметь различные значения. Проще всего принять  $A = 1$ ,  $B = 0,15$ . Использование при анализе приближенной формулы (4.21), по-видимому, внесет небольшую погрешность по сравнению с точной формулой.

При этом принимается гипотеза, что визуальная система устанавливает порог отношения сигнала к шуму как средство оценки

значимости нервных импульсов. В результате при низком отношении сигнала к шуму оптические сигналы не обнаруживаются, однако и шумы очень низкого уровня не принимаются за сигналы. Таким образом, мы не воспринимаем периодически возникающие несуществующие объекты (ложные тревоги).

Необходимо отметить, что данные Розелла и Вильсона дают среднюю характеристику для различных наблюдателей. Интервал изменения отношения сигнала к шуму от условий обнаружения с малой вероятностью к условиям обнаружения с высокой вероятностью для отдельных наблюдателей может быть уже, чем это следует из рис. 4.45, и полученное гауссово распределение является следствием различий в индивидуальных порогах и изменений условий наблюдения во времени. Читатели, имеющие дело с тепловизионными системами, могут экспериментально определить собственный порог, используя регулируемый тепловой источник для получения различных значений отношения сигнала к шуму.

#### **4.13.2. Обнаружение на фоне зависящих от сигнала шумов**

Источник света, испускающий  $N$  фотонов в секунду, характеризуется пуассоновым распределением эмиссии фотонов со средним значением  $N$  и среднеквадратичным отклонением  $\sqrt{N}$ . Поэтому любой оптический сигнал не свободен от шумов; шумы всегда присутствуют как следствие случайного характера эмиссии фотонов. Отношение средней величины сигнала к среднеквадратичной величине шума равно  $N/\sqrt{N} = \sqrt{N}$ ; такой фотонный шум называется зависящим от сигнала. Любая оптическая система обнаружения, в том числе и глаз, в конечном счете ограничивается шумами оптических сигналов.

Блэкуэлл опубликовал результаты многочисленных экспериментов, в которых он определял способность глаза выделять простые сигналы на равномерном фоне в условиях, когда источники не имели других шумов, кроме фотонных. Эти классические эксперименты позволили определить предельные способности глаза обнаруживать простые объекты на равномерных фонах. Объекты представляли собой круглые диски различных размеров и яркости, фоном служили большие (от 10 до 60°), равномерно освещенные поля переменной яркости. В



ходе экспериментов изменялись яркость фона (поля адаптации)  $L_B$ , продолжительность предъявления объекта  $t$  и угловой диаметр объекта  $\theta$ . Для группы наблюдателей определялась 50%-ная вероятность обнаружения объекта за время наблюдения. Все данные выражены в величинах порогового контраста  $C = (L_T - L_B)/L_B$ .

В первой серии экспериментов 1946 г. наблюдателям предлагалось определить, в каком из восьми возможных положений находится объект, предъявляемый в известный наблюдателю момент времени. Яркость фона изменялась от  $3 \cdot 10^{-6}$  до  $4 \cdot 10^2$  кд/м<sup>2</sup>, угловые размеры объектов — от 1,05 до 35,1 мрад, продолжительность предъявления составляла 6 с. Результаты представлены графически на рис. 4.47.

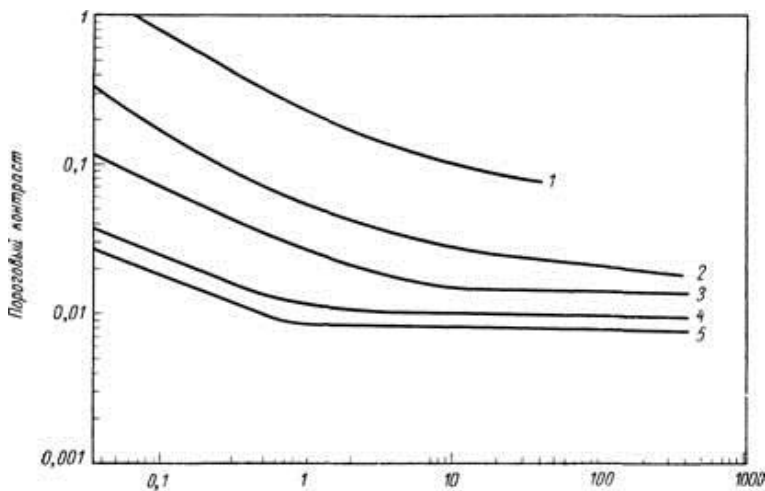


Рис. 4.47. Пороговый контраст в зависимости от яркости фона и размера объекта.

Продолжительность предъявления 6 с; размеры объекта, мрад: 1 — 1,05; 2 — 2,81; 3 — 5,29; 4 — 16,1; 5 — 35,1.

/ в, пд/м<sup>2</sup>

Аналогичные результаты были получены для отрицательных

контрастов. Во второй серии экспериментов 1946 г. наблюдателю были известны положение объекта и момент его предъявления, а продолжительность предъявления  $t$  выбиралась достаточной для максимально возможной временной суммации, но не превосходила 15 с. Угловые размеры объектов изменялись от 0,173 до 105 мрад, а яркость — от 3 -10~6 до 2,5 -102 кд/м<sup>2</sup>. Результаты представлены на фиг. 4.23.

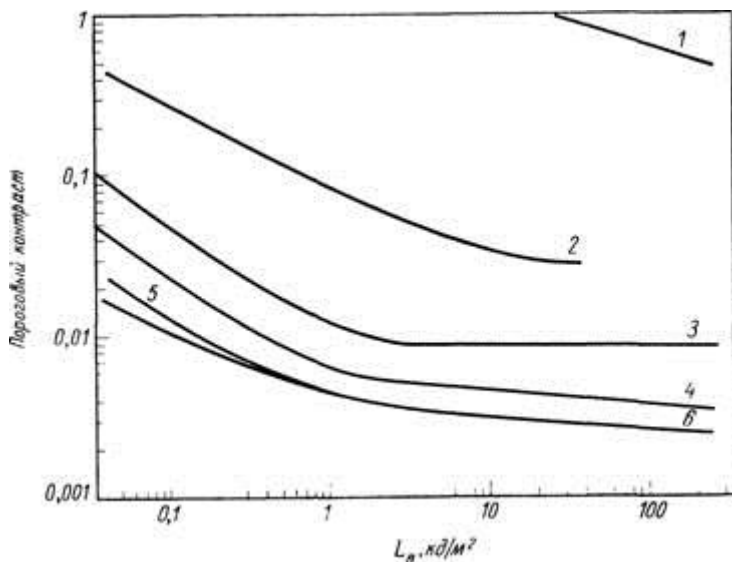


Рис. 4.48. Пороговый контраст в зависимости от яркости фона и размера объекта.

Продолжительность предъявления до 15 с; размеры объекта, мрад: 1 — 0,173; 2 — 1,05; 3 — 2,81; 4 — 5,29; 5 — 16,1; 6 — 35,1.

В экспериментах, проводившихся в период с 1950 по 1952 г., наблюдателям предлагалось выбрать интервал времени предъявления объекта с известным положением и размером из четырех известных интервалов. Яркость изменялась от 0 до 300 кд/м<sup>2</sup>, размеры объекта — от 0,233 до 14,9 мрад, продолжительность предъявления — от 10~3 до 1 с. В экспериментах 1956—1957 гг. диапазон изменения яркости фона

составлял  $0,3—1000$  кд/м<sup>2</sup>, диапазон размеров объекта  $0,29—16,98$  мрад, а время предъявления составляло  $1, 0,1$  и  $0,01$  с. Результаты этих экспериментов аналогичны данным 1946 г. Интересно представить данные 1950—1952 гг. в координатах, использованных для построения рис. 4.49 и 4.50.

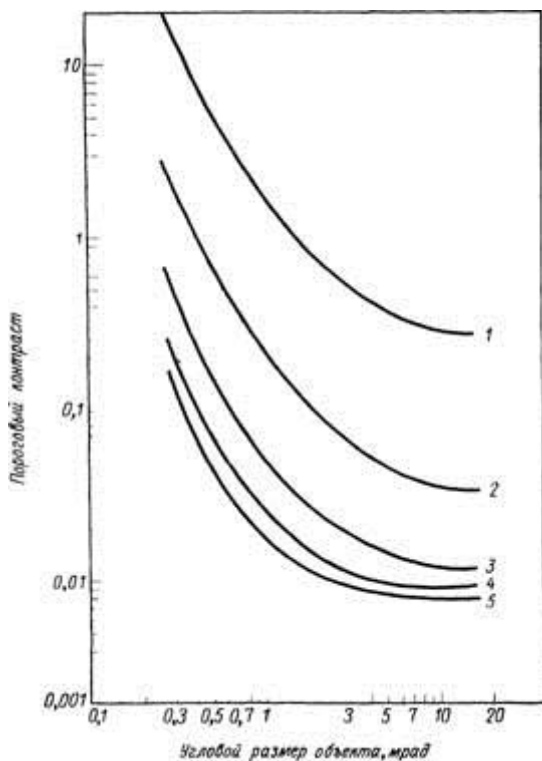


Рис. 4.49. Пороговый контраст в зависимости от размера объекта и яркости фона.

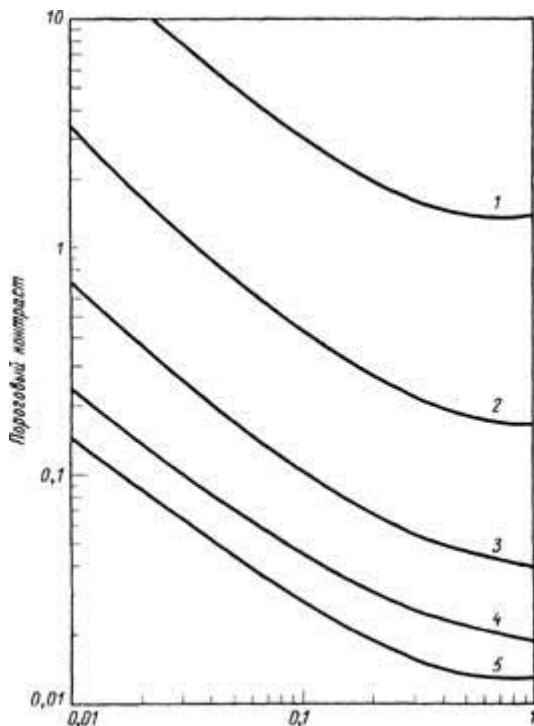


Рис.4.50. Пороговый контраст в зависимости от продолжительности предъявления и яркости фона. Размер объекта 1,16 мрад; яркость фона, кд/л<sup>2</sup>; j — 0,03; 2 — 0,3; 3 — 3; 4 — 30; 5 — 300.

Продолжительность предъявления 1 с; яркость фона, кд/м<sup>2</sup>;

1—0,03; 2 — 0,3; 3 — 3; 4—30; 5—300.

На рис. 4.49 зависимость порогового контраста от углового размера объекта при постоянной яркости фона ясно показывает, что механизм пространственной суммации действует до угловых размеров ~10 мрад. Из рис. 4.50 следует, что временное суммирование также оказывает существенное влияние до интервалов времени 0,5 с.

$$P_c = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(C - C_{\text{пор}})/\sigma} e^{-t^2/2} dt,$$

Из опытов 1946 г. Блэкуэлл сделал важный вывод, что вероятность обнаружения в функции контраста имеет форму нормальной кривой, описываемой уравнением (4.22), где среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  равно 0,5, а  $C_{\text{пор}}$  — измеренный пороговый контраст.

Таким образом, обнаружение сигналов на фоне зависящих от сигнала шумов описывается как случайный гауссов процесс, механизм которого сходен с механизмом, наблюдаемым в случае аддитивных шумов. Блэкуэлл предположил, что среднее воздействие на нервную систему, или возбуждение  $E$  стимулом  $L$ , есть линейная функция  $L$ .

При решении задачи обнаружения  $AL$  на фоне  $L$  в предположении Блэкуэлла визуальная система оценивает разброс  $E$  относительно среднего значения  $E_b$ , соответствующего яркости фона  $L$  в, и устанавливает критерий сравнения  $E_c$ , пропорциональный  $E_b$ . Критерий  $E_c$  используется затем для оценки, насколько существенны отклонения мгновенных значений  $E$  от  $E_b$ . Предполагается, что каждое возбуждение  $E = E_b - \Delta E$  сравнивается с  $E_c$  и время (в процентах от общего времени наблюдения), в течение которого  $E$  превышает  $E_c$ , определяет вероятность принятия решения о присутствии сигнала  $AL$ , соответствующего  $\Delta E$ . Другими словами, величина  $\Delta E$  должна превысить  $E_c - E_b$ , чтобы вероятность обнаружения превысила 50%. Такой же механизм предлагался Шаде, а также Розеллом и Вильсоном для объяснения своих экспериментов. В более поздней статье Блэкуэлл указал, что кривые порога  $AL$  в функции  $L$  в, углового размера объекта и продолжительности предъявления достаточно точно описываются уравнениями вида

$$\frac{\Delta L}{L_b} = a_1 \left( 1 + \frac{a_2}{L_b} \right), \quad (4.23)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  — сложные функции продолжительности предъявления и размера объекта.

Рассмотрим теперь выводы Ори, относящиеся к проблеме визуального обнаружения объектов. Выше было указано, как эксперименты Шаде, Розелла и Вильсона, а также Блэкуэлла подтверждают гипотезу, что визуальная система обнаруживает

наличие или отсутствие оптического сигнала на фоне гауссовых шумов на основе принципов теории статистических решений. Ори выдвинул гипотезу, что вероятность обнаружения  $P$  (т. е. **принятия правильного решения о присутствии или отсутствии сигнала**) определяется в пространстве нервных возбуждений, так что

$$P = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} \int_K^{\infty} e^{-(E-E_T)^2/2\sigma_T^2} dE = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(E_T-K)/\sigma_T} e^{-z^2/2} dz, \quad (4.24)$$

где  $E$  — нервные возбуждения. Величины  $E$  или  $\xi$  представляют собой переменные интегрирования;  $E_T$  — мгновенное значение общего числа нервных возбуждений, состоящих из  $E_B$  возбуждений, соответствующих фону, и  $\Delta E$  возбуждений, соответствующих сигналу;  $E_T = E_B + \Delta E$ . Среднеквадратичное отклонение изменений (шума) относительно  $E_T$  равно  $\sigma_T$ . Величина  $P$ , определяемая уравнением (4.24), есть вероятность того, что мгновенное значение общего числа нервных возбуждений  $E_T$  превосходит пороговую величину  $K$ . Смысл величины  $K$  в том, что глаз устанавливает порог, при превышении которого возбуждение имеет природу сигнала. Это прямое развитие гипотезы Шаде и Блэкуэлла с тем отличием, что Ори постулирует сложную зависимость порогового критерия от уровня освещенности, что позволяет глазу работать в диапазоне изменения яркости на шесть порядков. Используется нормальный (гауссов) закон распределения шумов, поскольку считается, что на всех уровнях яркости фотонный поток достаточно велик, чтобы можно было аппроксимировать распределение Пуассона распределением Гаусса. Таким образом, как фотонный шум, связанный с дискретной природой света, так и электронные шумы системы могут рассматриваться как процессы, подчиняющиеся нормальному (гауссову) закону. В случае чисто фотонных шумов

$$\sigma_T = \sqrt{E_T} = \sqrt{E_B + \Delta E}. \quad (4.25)$$

Ори предположил, что пороговая величина  $K$  описывается выражением вида  $K = E_B + C$ , где  $C$  зависит от шума и может быть выражена формулой

$$C = x + y\sigma_T + z\sigma_T^2 = x + y\sigma_T + z(E_B + \Delta E). \quad (4.26)$$

При такой записи верхний предел второго интеграла в уравнении

(4.24) равен

$$\frac{E_T - K}{\sigma_T} = \frac{\Delta E - C}{\sigma_T} \quad (4.27)$$

Первый член в правой части формулы (4.26) определяет абсолютный нижний предел обнаружения сигнала; второй — порог обнаружения компоненты сигнала, пропорциональной шумам, так что обнаружение зависит от определенного уровня отношения сигнала к шуму; третий — зависимость порога от контраста. Таким образом, модель Ори объясняет три известных из литературы случая зависимости обнаружения сигнала от уровня яркости:

1. Абсолютный порог обнаружения.
2. Зависимость обнаружения от отношения сигнала к шуму при средних уровнях яркости.
3. Ограниченное значением контраста обнаружение при высоких уровнях яркости.

Анализ исследований и данных Блэкуэлла проводился также Бейли, Оврингтоном и Лейвином, Корнфельдом и Лоусоном. В этих работах приведены формулы, согласующиеся с данными Блэкуэлла и связывающие пороговую яркость объекта, его угловой размер, время наблюдения и яркость фона. Испытания Блэкуэлла проводились в идеальных лабораторных условиях, и поэтому полученные результаты нельзя непосредственно применять к практическим задачам обнаружения объектов, ограниченных значением контраста. Блэкуэлл привел рекомендации для практического использования в более поздней работе. Де Вое и др. провели эксперименты, аналогичные опытам Блэкуэлла, но в условиях, более близких к реальным. Они указали верхний и нижний пределы порогов (вместо одного (50%) у Блэкуэлла), требуемые для решения различных практических задач. Основы флуктуационной теории были в первом приближении изложены Роузом. По его наблюдениям квантовые флуктуации шумов становятся практически незаметными при яркости порядка  $3 \cdot 10^{-2}$  кд/м<sup>2</sup>. При этой и более высокой яркости белая поверхность кажется ровной и свободной от шумов. Роуз указал, что статистические флуктуации играют важную роль в диапазоне яркостей от  $3 \cdot 10^{-6}$  до  $3 \cdot 10^{-2}$  кд/м<sup>2</sup>, а при яркости более  $3 \cdot 10^2$

кд/м<sup>2</sup> в области, ограниченной значением контраста, роль флуктуаций сравнительно невелика.



#### 4.14. Субъективное восприятие резкости изображения и соответствующие ей объективные характеристики

Давно установленной мерой резкости изображения являлся **критерий разрешения Релея**, определяемый как угловое расстояние между двумя точечными источниками, начиная с которого они разрешаются как две точки при определенном наборе условий. Угловое расстояние между точками на 50%-ном уровне импульсной реакции является другой, тоже давно применяемой **мерой резкости**, зависящей от формы функции рассеяния. Несколько более сложным определением разрешения, связанным с ОПФ, является «разрешающая сила», или «предельное разрешение». **Предельным разрешением** называется максимальная пространственная частота синусоидальной или прямоугольной волны, которую можно визуальнo разрешить, используя систему при определенном наборе условий.

Широко используемая для фотографических систем **объективная характеристика резкости** — «**острoсть**» при определенных обстоятельствах хорошо согласуется с оценками резкости изображения, которые дают наблюдатели. Острoсть определяется по реакции (в **единицах фотографической плотности D**) на ступенчатую функцию. Если реакция фотографической системы на перепад яркости на краю равна  $D(x)$ , то острoсть  $A$  определяется, как показано на рис. 4.51, выражением

$$A = \overline{G_x^2} / D', \quad (4.28)$$

где

$$\overline{G_x^2} = 1/N \sum_{i=1}^N \left( \frac{\Delta D_i}{\Delta x_i} \right)^2. \quad (4.29)$$

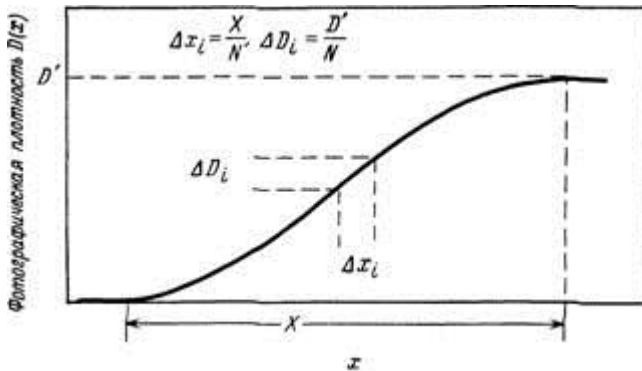


Рис. 4.51. Реакция на перепад яркости на краю.

Острота является, таким образом, **мерой крутизны воспроизведенного края**. Ретлинг и др. показали, что острота пропорциональна величине  $N_e$ ; так что эти два различных способа описания разрешения эквивалентны друг другу. Хиггинс показал различие между остротой и разрешающей силой при воспроизведении **изображения штриховых мир и квадратов** с высокой разрешающей силой и низкой остротой в одном случае и низкой разрешающей силой и высокой остротой — в другом.

Ранее было введено понятие **оптической передаточной функции (ОПФ)**. Связь качества изображения с модуляционной передаточной функцией (МПФ) исследовалась довольно широко, но влиянию фазовой передаточной функции уделялось относительно мало внимания. Поскольку ОПФ является преобразованием Фурье **импульсной реакции системы**, ясно, что в самом общем случае, чем уже функция рассеяния линии (ФРЛ), тем лучше МПФ. Таким образом, разрешение в самом общем смысле характеризует МПФ. Предельное разрешение в идеальных условиях соответствует частоте, на которой МПФ падает до малой величины (обычно 2-5%).

МПФ действительно в определенных пределах может дать представление о характеристиках изображения, однако надежные данные, которые непосредственно связывали бы форму кривой МПФ с качеством изображения, отсутствуют. Тем не менее можно провести общую линию при классификации МПФ различных типов, показанных на рис. 4.52.

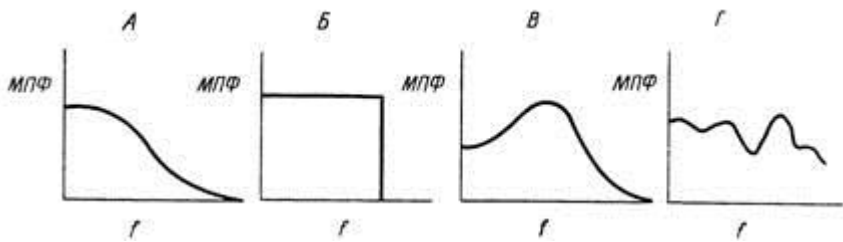


Рис. 4.52. Возможные типы МПФ.

Шаде считает, что МПФ примерно гауссовой формы (кривая А) является предпочтительной для изображения телевизионного типа, поскольку она соответствует МПФ глаза и обеспечивает естественность изображения. Шаде далее рассматривает основные отклонения МПФ от гауссовой формы, приводящие к искажениям изображения. МПФ, представленная кривой Б, вызывает неприятное двоение («звон») на резких краях изображения. МПФ, представленная кривой Б, подавляет крупномасштабные детали фона и подчеркивает детали средней пространственной частоты, делает более резкой реакцию на перепад яркости на краю и в некоторых случаях может вызывать отрицательные выбросы за малым объектом высокой интенсивности. МПФ необычной формы, подобной кривой Г, следует избегать, поскольку в этом случае невозможно заранее оценить влияние МПФ на особенности субъективного восприятия изображения. Хоппер наблюдал, что в случаях, когда МПФ системы опускается ниже кривой, приведенной на рис. 4.53, изображение становится неприемлемо плохим, т. е. становится вялым, как будто не хватает усиления или градаций яркости.

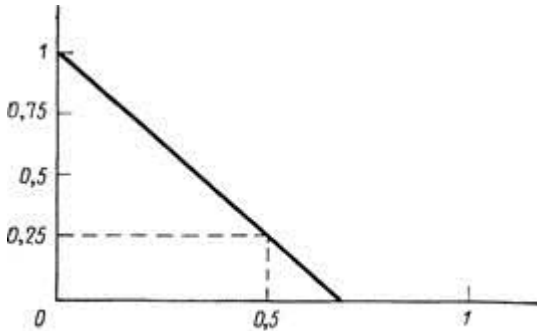


Рис. 4.53. Предельные МПФ.

Отсюда следует, что параметр  $N_e$  можно применять главным образом для сравнения систем с одинаковыми по форме МПФ.

Наиболее универсальной объективной характеристикой резкости является введенная в разд. 3.11 эквивалентная полоса частот  $N_e$ , называемая также **эквивалентным числом линий** и имеющая другие наименования. Шаде первый ввел величину  $N_e$  и объяснил ее значение. По его словам, **«интеграл от квадрата реакции системы на синусоидальную волну... является мерой, правильно определяющей ширину перехода на краю и хорошо согласующейся с общим субъективным впечатлением о резкости изображения»**. Позднее Шаде указывал: «Различаемая на пределе разница... в резкости... соответствует изменению эквивалентной ширины полосы на 3,5%». Этот вывод опирается на данные Болдуина и Шаде. Математически

$$N_e = \int_0^{\infty} \tilde{r}_s^2(f) df, \quad (4.30)$$

где  $r_s$  — МПФ всей системы. Заметим, что влияние фазового сдвига величина  $N_e$  не учитывает.

Важность параметра  $N_e$  была подтверждена опытами Скотта. Скотт использовал четыре аэрофотоснимка участка земной поверхности размером  $150 \times 150$  м с числом градаций от 1 до 3000 и ухудшал их качество с помощью фотографического зерна и (или) импульсных

реакций, имеющих форму гауссоиды. Операторы рассматривали изображения невооруженным глазом или при желании с увеличением и сортировали их по качеству, учитывая размытие и шумы по отдельности и вместе.

Скотт характеризовал МПФ характеристической частотой  $f_c$ , на которой значение МПФ равно 0,61. Это соответствует среднеквадратичному отклонению функции рассеяния  $\sigma = 0,155/f_c$  и  $N_e = 0,21/f_c$ . Диапазон значений характеристических частот, по данным Скотта, составлял от 107,7 до 11,31 периода на ширину кадра.

Скотт сделал вывод, что для мелкозернистых фотографий, когда зерно не играет роли, порог различения  $f_c$  составляет 5% для одной картины и 10% для нескольких. Эксперимент подтвердил хорошее соответствие между данными, полученными при расшифровке аэрофотоснимков и субъективной их оценкой операторами. Элворт и др. подтвердили, что  $N_e$  согласуется с оценками операторов лучше, чем любой другой количественный критерий разрешения. Однако критерий  $N_e$  нельзя применять безотносительно к пространственно-частотному составу картины. Рассмотрим, например, две МПФ на рис. 4.54.

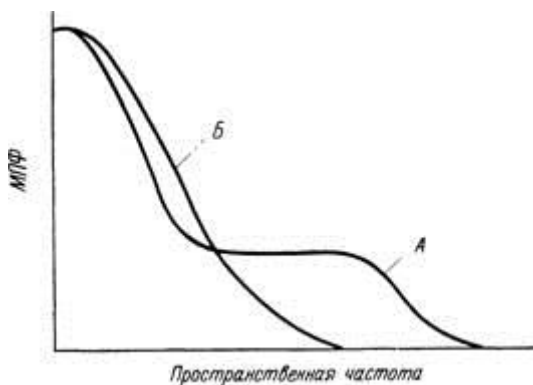


Рис. 4.54. Две различные МПФ с одинаковым значением эквивалентной полосы частот.

Обе кривые (А и Б) имеют одинаковую величину  $N_e$ . Кривая Б обеспечит несколько лучшее изображение, чем А, для объектов с очень низкими частотами, однако А будет лучше, чем Б, для

объектов с очень высокими частотами.

Выше мы отмечали, что Шаде использовал данные Болдуина. Опыты Болдуина заслуживают более подробного рассмотрения, поскольку он определял, насколько различимы изменения функции рассеяния при непрерывном изменении качества изображения на киноплёнке. Болдуин формировал прямоугольные функции рассеяния шириной  $a$  (что соответствовало  $N_e = 1/2 a$ ) в поле зрения от  $14$  до  $19^\circ$ , рассматриваемом с расстояния  $75$  см. Величины  $A_{ге}$  менялись от  $0,175$  до  $0,75$  мрад $^{-1}$  для глаза, что соответствовало частотам первого нуля от  $0,35$  до  $1,5$  мрад $^{-1}$ . Результаты, полученные Болдуином, выражены в единицах пороговой различимости изменений разрешения.

Единичный порог соответствует 50%-ной вероятности различения изменений, и примерно 3—4 порога соответствуют 100%-ной вероятности различения. Полученная Болдуином зависимость различимости от  $N_e$  представлена на рис. 4.55.

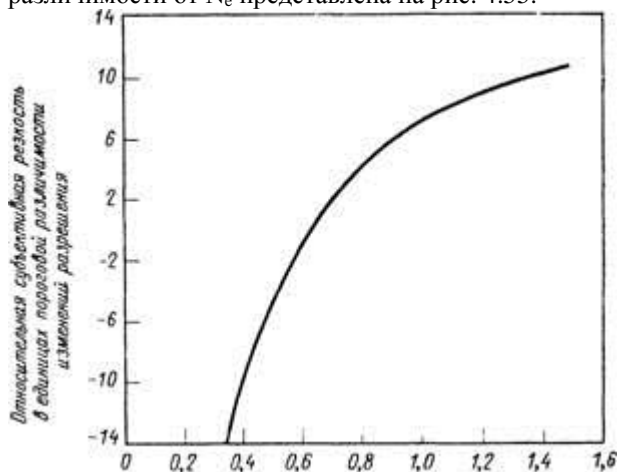


Рис. 4.55. Предельная резкость в зависимости от граничной частоты для прямоугольной функции рассеяния.

По данным Болдуина, можно определить диапазон  $AN_jN_e$  на одно пороговое приращение. Отношение  $AN_jN_e$  изменяется от  $0,175$  мрад $^{-1}$  для  $1/a = 0,35$  мрад $^{-1}$  до  $0,075$  для  $1/a = 1,33$  мрад $^{-1}$ . Таким образом, для системы с фиксированным увеличением с ростом разрешения становится все труднее заметить его улучшение. Так, при  $1/a = 1,33$

град<sup>-1</sup> (система с разрешением 3/4 град) нужно улучшить разрешение на 7,5%, чтобы заметить это с вероятностью 50%, и на ~20%, чтобы обеспечить существенное различие. Болдуин менял также вертикальное и горизонтальное разрешение, используя прямоугольные функции рассеяния, и обнаружил небольшое преимущество горизонтального направления по сравнению с вертикальным (рис. 4.56).

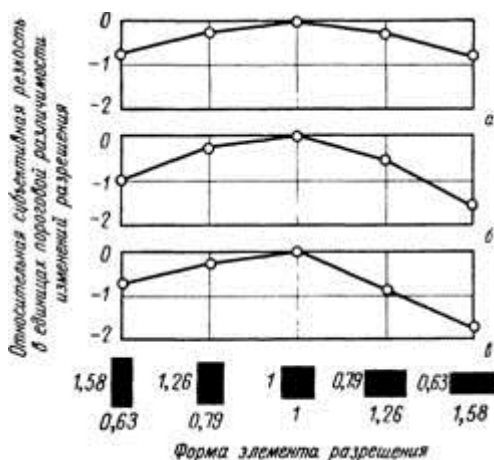


Рис. 4.56. Предельная резкость в зависимости от формы элемента разрешения.

Число элементов разрешения на кадр: а — 115000; б — 36000; в — 8750.

### Применение положений физиологии зрительного восприятия к проектированию систем тепловидения

В этой главе были отмечены пять главнейших особенностей поведения глаза, который

1. подобен совокупности стохастически независимых, перемещающихся и перекрывающихся узкополосных фильтров, из которых строится близкий к оптимальному фильтр для решения определенной зрительной задачи;
2. суммирует сигналы, распределенные в пространстве и повторяющиеся во времени;
3. обнаруживает и опознает объекты вероятностным образом;
4. характеризуется двумя режимами работы, при которых обнаружение лимитируется величиной контраста и шумами;

5) чувствителен к параметрам покадрового и чересстрочного разложения изображения.

Каждая из этих особенностей оказывает соответствующее влияние на разработку систем, которое необходимо учитывать, а именно:

1. обеспечить согласование увеличения системы и МПФ воспроизведения изображения, чтобы пространственно-частотный спектр объекта соответствовал полосе пропускания глаза;
2. учесть влияние временного и пространственного суммирования на характеристики проектируемой системы для обеспечения повышения отношения сигнала к шуму;
3. обеспечить отношение сигнала к шуму, достаточное для достижения требуемых вероятностных характеристик обнаружения;
4. обеспечить соответствующие значения коэффициента окружающего фона  $F_s$  и яркости экрана индикатора, динамического диапазона и контраста, с тем чтобы получить уровень характеристик системы, при котором ее возможности будут ограничиваться шумами;
5. устранить восприятие глазом чередования кадров и строк.

При надлежащем учете указанных требований характеристики системы будут весьма близки к оптимальным. Нет необходимости устранять дефекты полностью, поскольку глаз допускает без ущерба для качества видения небольшие дефекты в изображении телевизионного типа. Уже проверено, что влияние воспринимаемых шумов и паразитных сигналов уменьшается с ростом числа деталей



картины, тогда как восприятие резкости контуров улучшается. Так, небольшие паразитные сигналы, оказывающие нежелательное воздействие на телевизионное изображение с малым количеством деталей, становятся менее заметными при наблюдении детализированной картины.

## 5. Обобщенные критерии

В предыдущих главах были рассмотрены такие фундаментальные характеристики и параметры систем, как оптическая передаточная функция, отношение сигнала к шуму в изображении, частота кадров и увеличение. Каждый из перечисленных параметров лишь частично характеризует возможности системы применительно к решению практических задач. Эти параметры полезны при проектировании систем, однако требуются обобщенные критерии, учитывающие ряд параметров, чтобы оценивать их сравнительную важность при инженерном решении конкретной задачи. Необходимо, чтобы в идеальном случае такой обобщенный критерий учитывал предельные возможности наблюдателя, чтобы его можно было рассчитать по основным параметрам системы и легко измерить и чтобы, наконец, он описывал поведение системы применительно к ее назначению и использованию. В этой главе мы рассмотрим некоторые обычно применяемые обобщенные критерии и попытаемся оценить особенности их использования и типичные ошибки, которые могут при этом возникнуть.

### 5.1. Эквивалентная шуму разность температур

Давно введенной и наиболее широко применяемой (часто неправильно) характеристикой способности системы различать слабые сигналы на фоне шумов является эквивалентная шуму разность температур. Эту величину обозначают по-разному. Мы будем обозначать ее  $A_{\text{пор}}$  (В тексте оригинала принято сокращение NETD — по первым буквам названия noise-equivalent temperature difference. Это сокращение аналогично по построению английскому сокращению для порогового потока — NEP (noise equivalent power). Поскольку для порогового потока общепринятым обозначением в отечественной литературе является  $P_{\text{пор}}$ , то и для NETD логично принять обозначение  $A_{\text{пор}}$ .)

Наиболее простое и часто используемое определение следующее: величина  $\Delta T_{\text{пор}}$  представляет разность температур объекта и фона, излучающих как черные тела в стандартном тест-объекте, при которой отношение пикового значения сигнала к среднеквадратичной величине шума на выходе стандартного эталонного электронного

фильтра системы, рассматривающей тест-объект, равно единице. Таким образом подразумевается, что необходимо найти величину  $\Delta \Gamma$ , обеспечивающую  $C/\text{Ш} = 1$  на выходе эталонного фильтра в нормальных условиях, при работающей системе сканирования. Тест-объект, используемый при определении  $\Delta \Gamma_{\text{пор}}$ , показан на рис. 5.1, где размер  $W$  в несколько раз превышает угловой размер приемника излучения, чтобы обеспечить получение полной реакции приемника на сигнал.

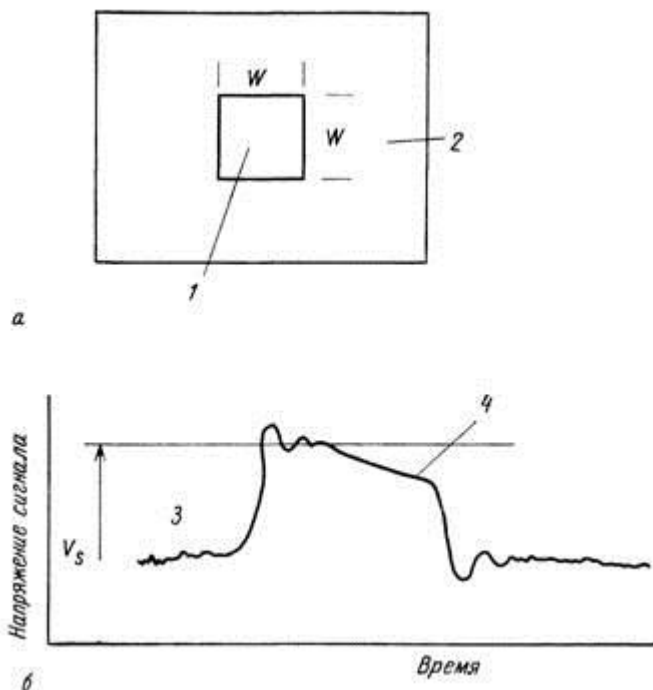


Рис. 5.1. Тест-объект для определения  $A_{\text{пор}}$  (а) и вид результирующего напряжения сигнала (б).

1 — объект с равномерной кажущейся температурой  $T_{\text{т}} > T_{\text{в}}\% \text{ К}$ ;  
 2 — фон с равномерной кажущейся температурой  $T_{\text{в}}$ , К; 3 — уровень шума; 4 — спад постоянного уровня.

Для стандартизации условий и целей сравнения желательно использовать при измерениях внешний фильтр, так чтобы МПФ всей электроники, включая внешний фильтр, соответствовала эквивалентной МПФ с

$$\tilde{f}_R = [1 + (f/f_R)^2]^{-1/2}, \quad (5.1)$$

где

$$f_R = 1/2\tau_d \quad (5.2)$$

и  $\tau_d$  — время элемента разложения на приемнике излучения. Для целей анализа МПФ всех компонентов электронной системы приписываются этому фильтру.

Среднеквадратичное напряжение шума  $V_n$  определяется с помощью вольтметра, измеряющего среднеквадратичное значение напряжения в течение активного времени сканирования. Напряжение сигнала  $V_s$  обычно определяется по импульсу от тест-объекта на экране осциллографа (рис. 5.1). Для получения надежных результатов разность  $\Delta T = T_r - T_b$  для объекта должна быть по крайней мере в несколько раз больше, чем ожидаемая величина  $\Delta T_{\text{пор}}$ , чтобы обеспечить выполнение условия  $V_s \gg V_n$ . Величина  $\Delta T_{\text{пор}}$  вычисляется при этом по формуле

$$\Delta T_{\text{пор}} = \frac{\Delta T}{V_s/V_n}. \quad (5.3)$$

## 5.2. Вывод выражения для пороговой разности температур $\Delta T_{\text{пор}}$

Вайе, Хоукинс, Хадсон и Соболева приводят вывод формул для определения  $\Delta T_{\text{пор}}$ , используя те исходные параметры, которые каждый из указанных авторов считает наиболее целесообразными. Ниже приводится простой вывод, который, по мнению ряда авторов, является наиболее полезным для практики. Чаще всего формулу для  $\Delta T_{\text{пор}}$  выводят для случая, когда электронный тракт обработки сигнала приемника излучения имеет плоскую частотную характеристику в пределах полосы частот системы и все ограничения по электрической полосе определяются внешним измерительным фильтром. Это позволяет связать напряжения сигнала и шума на выходе видеотракта

непосредственно с характеристиками приемника излучения. Результирующее выражение легко видоизменить для более сложных случаев, вводя понятие об эквивалентной шумовой полосе. Предлагаемый вывод основан на следующих предположениях:

1. чувствительность приемника излучения одинакова в пределах площади его прямоугольного чувствительного элемента;
2. обнаружительная способность приемника  $D^*$  не зависит от других параметров, входящих в выражение для  $\Delta T_{\text{пор}}$  ;

(Это предположение упрощает сравнительный анализ выражения для  $\Delta T_{\text{пор}}$ . Если приемник излучения работает в режиме ограничения флуктуациями числа фотонов фона (режим ОФ), то это допущение может нарушаться, и тогда следует использовать формулы, которые будут приведены позже .)

3. потери при прохождении излучения через атмосферу между объектом и приемным устройством пренебрежимо малы;
4. объект и фон излучают как черные тела;
5. угловой размер чувствительного элемента приемника излучения, угловой размер объекта и угол, соответствующий относительному отверстию собирающей оптики, могут полагаться малыми;
6. электронная обработка сигнала не вносит дополнительных шумов.

В формулу для  $\Delta T_{\text{пор}}$  входят следующие параметры:  $a, b$  — размеры чувствительного элемента приемника излучения, см;  $\alpha, \beta$  — угловые размеры чувствительного элемента приемника излучения, рад;  $T_b$  — температура фона, К;  $D^*(X)$  — удельная обнаружительная способность в зависимости от длины волны, определенная при электрической частоте, при которой спектр напряжения шума приемника приведен к единице (рис. 5.2), см<sup>-1</sup>ГцВт;  $g(f)$  — нормализованный спектр напряжения шума приемника излучения (безразмерная величина);  $A_0$  — эффективная площадь входного зрачка инфракрасной оптической системы с учетом экранирования; см<sup>2</sup>;  $\tau_0(A, \lambda)$  — коэффициент пропускания оптической системы в

зависимости от длины волны  $X$  (безразмерная величина);  $f$  — эффективное фокусное расстояние оптики, см;  $\Delta f_R$  — эквивалентная шумовая полоса стандартного фильтра, используемого при определении  $\Delta \Gamma_{\text{пор}}$ , при спектре шума источника  $g(f)$ , Гц:

$$\Delta f_R = \int_0^{\infty} g^2(f) \tilde{r}_R^2(f) df. \quad (5.4)$$

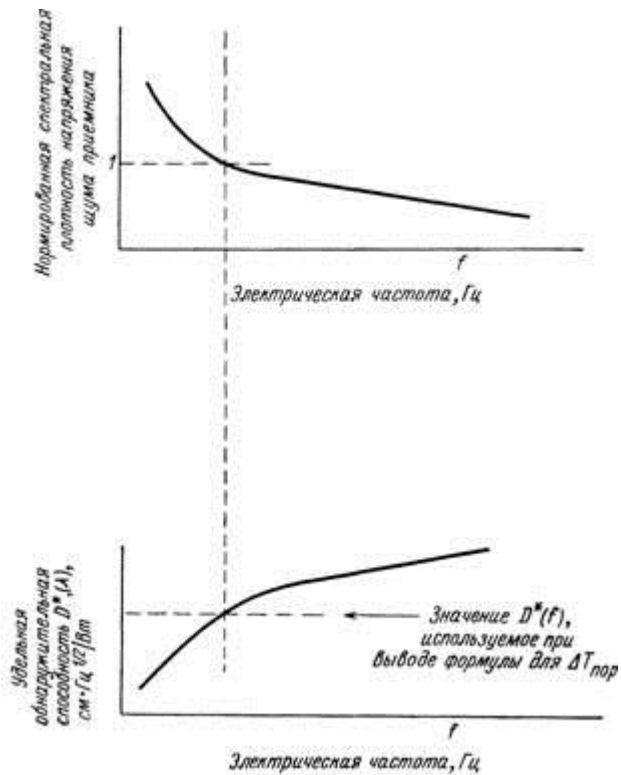
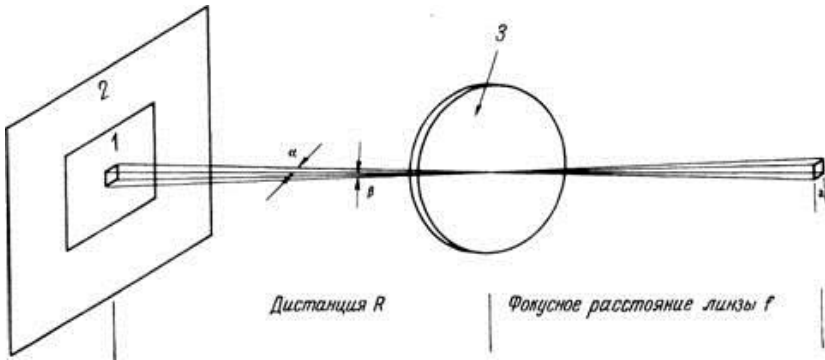


Рис. 5.2. Нормализация спектра напряжения шума.

Рассмотрим схему сканирования системой FLIR тест-объекта (рис.

5.3).



Фиг. 5.3. К выводу выражения для  $\Delta T_{\text{пор}}$ .

1 — объект; 2 — фон; 3 — оптическая система с эффективной площадью входного зрачка  $L_0$ .

Объект предполагается диффузным черным излучателем, подчиняющимся закону Ламберта. Объект имеет спектральную плотность потока излучения  $I_\lambda$ , Вт/(см<sup>2</sup>·мкм), и спектральную яркость

$$N_\lambda = W_\lambda / \pi, \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср}). \quad (5.5)$$

Входной зрачок оптической системы стягивает телесный угол  $\Omega_0 \approx R^2$  (расстояние R измеряется от объекта), так что спектральная облученность на входном зрачке равна  $W_\lambda \Omega_0 / \pi R^2$  Вт/(см<sup>2</sup>·мкм). В некоторый момент времени в процессе сканирования приемник воспринимает излучение от площади объекта  $\pi r^2$ , так что спектральный поток, трансформированный в результате пропускания излучения оптической системой с коэффициентом пропускания  $T_0(X)$ , равен

### Недостатки $\Delta T_{\text{пор}}$ как обобщенного критерия

Пороговая разность температур  $\Delta T_{\text{пор}}$  как обобщенный критерий имеет ряд недостатков:

1. В видеоканале часто возникают нестационарные процессы, которые не видны на индикаторном устройстве, а на шкале вольтметра, измеряющего среднеквадратичное напряжение шума, приводят к завышенным отсчетам, если только эти процессы не подавляются и в вольтметре.
2. Уровень пикового напряжения сигнала  $V_s$  требует пояснения и определяется с известной долей произвола (рис. 5.1).
3. Пороговая разность температур  $\Delta T_{\text{пор}}$ , измеренная на выходе электронной системы, не всегда показательна для всей системы в целом, потому что между точкой измерения  $\Delta T_{\text{пор}}$  и конечным изображением имеются свои пространственные фильтры и источники шумов.
4.  $\Delta T_{\text{пор}}$  учитывает полный шум в полосе, а глаз по-разному воспринимает шумы различных типов и частоты.
5. Проектирование системы в расчете на минимум измеренного значения  $\Delta T_{\text{пор}}$  без рассмотрения других факторов, влияющих на качество изображения, может привести к совершенно неудовлетворительным результатам. Например, часто оказывается возможным улучшить  $\Delta T_{\text{пор}}$ , измеренное в лабораторных условиях, за счет расширения спектрального диапазона, а в результате характеристики системы в реальных условиях могут резко ухудшиться. Одна из возможных причин ухудшения  $\Delta T_{\text{пор}}$  заключается в том, что при расширении спектрального диапазона система становится чувствительной к солнечным бликам. Если фотоприемник работает в режиме ОФ, может также оказаться, что высокое отношение сигнала к шуму, полученное в лабораторных условиях, резко уменьшится в реальных условиях из-за ослабления сигнала атмосферой и будут восприниматься одни шумы фона.
6. Величина  $\Delta T_{\text{пор}}$  не учитывает влияния на отношение сигнала к шуму различий в излучательной способности.
7. Величина  $\Delta T_{\text{пор}}$  практически бесполезна при сравнении систем, работающих в разных спектральных диапазонах, с различными характеристиками пропускания излучения атмосферой.

Кроме того, критерий  $\Delta T_{\text{пор}}$  не учитывает следующих факторов:

1. Зрительный аппарат работает как фильтр нижних частот, отсекающий шумы на высоких пространственных частотах.



2. Зрительный аппарат состоит из множества узкополосных фильтров, работающих независимо.

### 5.3. Минимальная разрешаемая разность температур

В гл. 4 указывалось, что на субъективное восприятие качества изображения сильное влияние оказывают следующие факторы: резкость, зернистость, передача контраста и искажения структуры изображения. Влияние каждого из этих факторов описывает соответствующая объективная характеристика в случае, когда три остальных фактора постоянны или незначительны. Обычно все четыре фактора действуют одновременно, и, поскольку точно неизвестно, насколько ухудшение одной характеристики эквивалентно ухудшению другой, предсказание поведения системы для большого многообразия конкретных задач представляет сложную проблему. **Эта проблема является общеизвестной для оптико-электронных приборов, но в тепловых системах она становится особенно острой, поскольку обычно контрасты в тепловом изображении выглядят не совсем так, как в видимой картине, так что трудно предложить набор стандартов, подобный применяемому в вещательном телевидении.** Мы очень чувствительны к изменениям в изображении на домашнем телевизоре или на полутоновых газетных фотографиях, однако в изображении FLIR можно не заметить сравнительно серьезного ухудшения качества из-за несколько необычного вида даже изображения высокого качества и нестандартности различных систем FLIR.

Таким образом, необходимо иметь **обобщенный критерий, включающий все четыре элемента качества изображения, т. е. единый критерий, характеризующий систему прибор — наблюдатель.** Имеется много возможных путей сформировать такой приближенный критерий, учитывающий ограничения порогового восприятия наблюдателя, вызванные случайными шумами, помехами, контрастом, пространственно-частотным спектром или временем наблюдения. В системах FLIR пространственное разрешение и тепловая чувствительность являются доминирующими характеристиками. В этом разделе основное внимание уделяется такому распространенному критерию, как **тепловая чувствительность для данного отношения сигнала к шуму в функции пространственной частоты.**

Шаде вывел такой критерий для **фотографических, кинематографических и тепловизионных систем**. Это — отношение сигнала к шуму в изображении, требуемое наблюдателю для разрешения трехштрихового стандартного тест-объекта ВВС США в присутствии шумов. **Жину и Сендалл обнаружили, что критерий Шаде с весьма небольшими изменениями применим к тепловому изображению**, и вывели выражение, определяющее разность температур штрихового тест-объекта, которая обеспечивает необходимый для разрешения порог отношения сигнала к шуму по Шаде. Теперь общепринятое название этой функции — минимальная разрешаемая разность температур  $\Delta T_{\text{разр}}$  (Чаще всего она определяется не по трехштриховому, а по четырехштриховому тест-объекту.) Важным является случай ограничения шумами, поскольку инфракрасные системы изображения дают максимальную чувствительность, когда шумы видны наблюдателю, как это бывает, когда усиление в системе устанавливается на высоком уровне, чтобы скомпенсировать неблагоприятные особенности картины или внешние условия наблюдения.

В приведенном ниже выводе используются те же допущения, что и при выводе АГ р, и, кроме того, принято, что

1. Временное суммирование в системе глаз — мозг наблюдателя FLIR приблизительно описывается постоянной времени, принятой равной 0,2 с. Предполагается, что глаз линейно суммирует сигналы и оценивает среднеквадратичную величину шума в пределах каждого интервала 0,2 с, хотя на самом деле представление о таком механизме не точное, но удобное.
2. Узкополосная пространственная фильтрация в зрительном аппарате наблюдаемой периодической структуры прямоугольных полос, имеющей частоту /г, приближенно учитывается согласованным фильтром для одной полосы. Форма такого фильтра принимается без доказательств и считается, что для глаза фильтр описывается формулой

$$\text{Sinc} \left( \frac{f}{2f_T} \right) = [\sin (\pi f / 2 f_T)] / (\pi f / 2 f_T).$$

Шаде и др. показали, что **система глаз — мозг действует**

подобно согласованному фильтру (или в данном случае подобно согласованному пространственному сумматору), суммирующему малые участки площади, в связи с чем необходимо брать двойной интеграл от яркости картины на экране индикатора. Для простоты будем полагать, что полосы достаточно длинные, и краевыми эффектами можно пренебречь.

1. Электронная система обработки сигнала и контрольное устройство не вносят дополнительных шумов.
2. Система сравнительно проста, без перекрытия при сканировании и характеризуется определенной МПФ и спектром мощности шума  $g^2(f)$ .
3. Система работает линейно, так что реакция на объект описывается МПФ.
4. Образование изображения пространственно-инвариантно в направлении сканирования.

Соответствующее сокращение на английском языке MRTI (minimum resolvable temperature difference).

Этапы измерения  $\Delta T_{\text{разр}}$  следующие. Пусть система визирует наибольший тест-объект (рис. 5.5), где полосы и промежутки излучают как черные тела с различной, но постоянной температурой и высота полос в семь раз больше ширины.

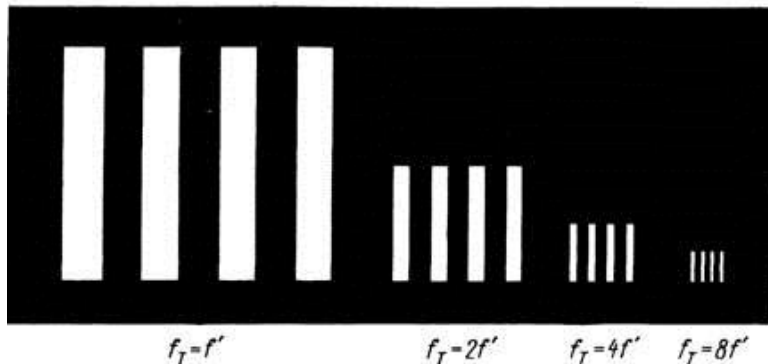


Рис. 5.5. Тест-объекты для определения  $\Delta T_{\text{разр}}$ .

Пусть система отрегулирована таким образом, что шумы ясно

видны на экране индикатора, и пусть начальная разность температур полос и промежутков равна нулю. Затем будем увеличивать разность температур, пока полосы не станут явно разрешимыми для наблюдателя на экране индикатора. Полученная  $\Delta T_{\text{разр}}$  есть  $\Delta T_{\text{разр}}$ , соответствующая основной пространственной частоте тест-объекта. Повторение опыта для последующих более высоких частот дает кривую  $\Delta T_{\text{разр}}$ , показанную на рис. 5.6. Этапы экспериментального определения  $\Delta T_{\text{разр}}$  на данной частоте заключаются в обнаружении тест-объект.

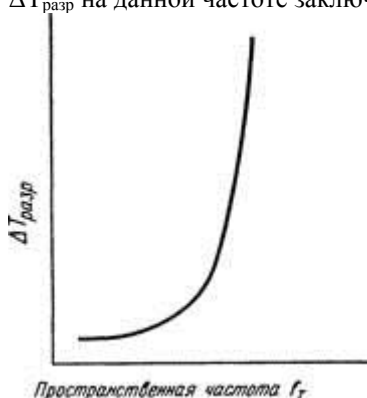


Рис. 5.6. Типичная форма кривой зависимости  $\Delta T_{\text{разр}}$  от  $f_T$ .

### **Факторы, характеризующие коэффициент полезного действия собирающей инфракрасной оптической системы.**

Часто бывает полезно определить и рассчитать различные факторы, характеризующие эффективность оптической системы, для использования их в уравнениях чувствительности систем. Основным свойством оптической системы является функция пропускания  $T(x, y, \lambda, \theta)$ , которая описывает ослабление луча света длиной волны  $R$ , проходящего под углом  $\theta$  к оптической оси через точку зрачка объектива с координатами  $(x, y)$ . Будем считать, что функцию  $T(x, y, \theta, \lambda)$  можно представить действительной (а не комплексной) функцией зрачка  $p(x, y)$  и коэффициентом спектрального пропускания  $\tau_0(\theta, \lambda)$

$$T(x, y, \lambda, \theta) = p(x, y) \tau_o(\theta, \lambda). \quad (5.5)$$

$$A_o = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y) dx dy,$$

Эффективная площадь собирающей оптической системы равна (5.6)

$$\bar{\tau}_o(\theta) = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_o(\theta, \lambda) d\lambda.$$

а средний коэффициент спектрального пропускания  $\tau_o$  для определенного угла поля зрения  $\theta$  определяется уравнением (5.7)

Эффективный коэффициент пропускания можно определить формулой

$$\tau_o = \frac{\int_0^{\infty} \tau_o(\lambda) D^*(\lambda) \frac{\partial W_\lambda(T_B)}{\partial T} d\lambda}{\int_0^{\infty} D^*(\lambda) \frac{\partial W_\lambda(T_B)}{\partial T} d\lambda}. \quad (5.8)$$

Однако для приемников, работающих в режиме ОФ,  $\tau_o$  не очень удачный параметр, поскольку ослабление излучения атмосферой исключает многие спектральные компоненты сигнала, уменьшая тем самым отношение сигнала к шуму. Более подходящей величиной является коэффициент полезного действия  $\eta_s$ , равный

$$\eta_s = \frac{\int_0^{\infty} \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) D^*(\lambda) \frac{\partial W_\lambda(T_B)}{\partial T} d\lambda}{\int_0^{\infty} \tau_a(\lambda) D^*(\lambda) \frac{\partial W_\lambda(T_B)}{\partial T} d\lambda}. \quad (5.9)$$



## **5.4. Параметры эффективности работы**

При анализе и разработке тепловых изображающих систем необходимо иметь возможность выбрать простые параметры, позволяющие определить, удовлетворяет ли система предъявляемым к ней требованиям. Цель этого раздела заключается в том, чтобы наметить пути решения поставленной задачи. Наиболее информативным для рассмотрения этого вопроса является опыт разработки систем тепловидения для военных целей.

Многие простые приемы, которые в первом приближении годились на ранней стадии развития систем тепловидения для военных целей, не пригодны теперь для всего разнообразия имеющихся в настоящее время систем. Если, например, разработка большинства систем идет по тому же пути, что и в приборах с параллельной обработкой информации, угловой размер чувствительного элемента приемника и соответствующий угловой размер элемента разложения на индикаторном устройстве примерно одинаковы и именно они определяют МПФ системы.

В результате можно говорить о «разрешении», понимая под этим угловой размер приемника, равный, например, 1 мрад, и подразумевая в значительной мере, что речь идет об общей характеристике системы. Такие системы будут относительно грубыми по разрешению, и дистанции, на которых возможно различение объектов, будут невелики. Соответственно, если известно, что система с данным разрешением обеспечивает определенную дальность различения, может показаться, что достаточно уменьшить или увеличить разрешение, чтобы соответствующим образом повлиять на результирующую дальность различения. При таком подходе в неявной форме предполагается, что тепловая чувствительность и потери излучения в атмосфере не изменяются, а влияние атмосферы на МПФ системы пренебрежимо мало.

Если за счет усовершенствования систем дальность увеличится и придется отказаться от неточных методов расчета, два последних предположения нарушатся и дистанция различения уже не будет непосредственно связана с разрешением. Теперь уже разрешение, понимаемое как основной параметр, характеризующий дальность



действия системы, в значительной мере теряет смысл. Необходимы другие параметры и разработка более сложных расчетных методов оценки характеристик систем. Бурное развитие систем FLIR чрезвычайно усложнило проблему: в настоящее время системы тепловидения так же, как вид наблюдаемых картин и способности наблюдателей, трудно классифицировать и стандартизовать. Две номинально эквивалентные системы могут иметь различные передаточные функции сигнала, разную степень влияния раstra на изображение, разное увеличение и кадровую частоту. Общие характеристики чувствительны к этим различиям, и очень часто в результате сравнения двух номинально одинаковых систем может оказаться, что одна из них имеет существенные преимущества перед другой.

Эти неопределенности делают абсурдными кажущиеся корректными утверждения типа: система с оговоренными характеристиками и параметрами обеспечит видение человека на фоне кустарника на расстоянии 100 м в условиях умеренных помех ясной теплой ночью. Другой наблюдатель в другую ночь, используя систему с аналогичными паспортными данными, вероятно, не получит точно таких же результатов наблюдения. Однако специалисты, заказывающие и применяющие системы, часто могут выражать свои требования именно в плане приведенного выше утверждения, и разработчики систем вынуждены переводить эти неопределенные требования на язык технических параметров систем. При этом существует опасность проектирования с неоправданно высокой точностью определения параметров, превосходящей требуемую для решения поставленной задачи.

На возможность решения тепловизионной системой любой задачи влияют десятки факторов, определяющие выходные характеристики систем. Некоторые неконтролируемые переменные, которые относятся к характеристикам объектов и фонов, изменяются в широких пределах, как, например, режим работы объектов, помехи, конфигурация объектов, контраст, пропускание атмосферы и ее МПФ, а также радиационный обмен между объектом и его окружением. Кроме того, контролируемые наблюдателем переменные могут изменяться относительно своих номинальных значений, как, например, яркость окружающего экран индикатора фона, фокусировка изображения на приемнике и индикаторном устройстве, уровень яркости и контраста.

Другими факторами, которые в меньшей степени поддаются контролю со стороны наблюдателя и которые оказывают очень большое влияние на выходные характеристики системы, являются обоснованная расшифровка изображения, разумный выбор кадра и умение извлекать информацию из изображения. Существует много способов предварительной оценки характеристик систем тепловидения в реальных условиях. Однако, даже при определенных значениях переменных в данной тактической обстановке нельзя предложить модель, которая точно предсказала бы заранее результаты натуральных испытаний. Успешное последующее теоретическое объяснение этих результатов не должно затемнять того обстоятельства, что восприятие объекта — слишком сложное явление, чтобы его полностью количественно измерить, а тем более точно предсказать, каким оно будет. Это становится совершенно ясным, когда разница в прогнозах с помощью двух сильно различающихся моделей укладывается в пределы разброса оценки выходных характеристик.

Тем не менее специалисты-практики должны знать, какой тип систем необходим для решения данной тактической задачи, но они не всегда могут полагаться на результаты анализа проблемы, проведенного на бумаге. Они зачастую приблизительно представляют из опыта, как изменения параметров приемного устройства влияют на характеристики систем в реальных условиях, и неохотно обращаются к теоретическим методам, полагаясь больше на свои, выработанные на практике представления. Практический выход из этого положения заключается в проведении натуральных испытаний в представляющих интерес условиях с приемным устройством, имеющим характеристики, похожие на характеристики устройства, с которым предполагается работать, и в экстраполяции результатов в ту или другую сторону с целью получения требуемых выходных характеристик системы. Такой подход целесообразен, поскольку к настоящему времени уже имеются опытные данные, показывающие, как различные изменения характеристик влияют на выходное изображение. Это не значит, что мы не должны продолжать поиски простых обобщенных критериев, связанных с результатами натуральных испытаний, мы хотим только подчеркнуть, что нельзя полагаться только на один теоретический анализ. Однако в том случае, когда все параметры системы

рассматриваются в процессе проектирования как переменные, нецелесообразно основывать проектирование систем на экстраполяции результатов натуральных испытаний. При этом трудно оценить влияние изменения одного или двух параметров, поскольку остальные параметры не сохраняются постоянными. При анализе систем можно применять простые критерии, только когда определенное число переменных параметров имеют фиксированные значения. Обычно для обеспечения такой возможности делают следующие предположения:

1. Заданы размер кадра и размер элемента разрешения, а также  $L_{\text{пор}} = 0 > 2 \text{ } ^\circ\text{C}$  на индикаторном устройстве, за исключением наиболее тяжелых условий применения.
2. Требования к однородности изображения на экране по крайней мере такие же, что и в телевизионном вещании; желательно, чтобы не было помех от раstra и фиксированных или движущихся помех на экране.
3. Кадровая частота равна 30 Гц.
4. Увеличение зафиксировано на оптимальном уровне  $\sigma_M = \text{const}$ .
5. Динамический диапазон по разности температур в рассматриваемой картине составляет не менее  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  относительно окружающего фона.
6. Требуемая МПФ системы должна быть лучше или эквивалентна МПФ гауссовой формы с величиной  $a$ , соответствующей половине углового размера приемника излучения.

Эти требования в ряде случаев выполняются в практике проектирования FLIR, если проектирование ведется на высоком уровне.



## 6. Оптика

### 6.1. Элементы оптических систем

**Оптическая система** (англ. *optical system*) — совокупность оптических элементов (преломляющих, отражающих, дифракционных и т. п.), созданная для преобразования световых пучков (в геометрической оптике), радиоволн (в радиооптике), заряженных частиц (в электронной и ионной оптике)<sup>[1]</sup>.

**Оптическая схема** — графическое представление процесса изменения света в оптической системе.

**Оптический прибор** (англ. *optical instrument*) — конструктивным образом оформленная для выполнения конкретной задачи оптическая система, состоящая, по крайней мере, из одного из базовых оптических элементов. В состав оптического прибора могут входить источники света и приёмники излучения. В иной формулировке: **Прибор** называют оптическим, если хотя бы одна его основная функция выполняется оптической системой.

#### **Общие сведения**

В оптических приборах не все взаимодействующие со светом детали являются оптическими, специально предназначенными для его изменения. Такими неоптическими деталями в оптических приборах являются оправы линз, корпус и т. п. Совокупность беспорядочно разбросанных оптических деталей не образует оптической системы. Обычно под оптическими системами подразумевают системы, преобразующие электромагнитное излучение в видимом или близких диапазонах (ультрафиолетовый, инфракрасный). В таких системах преобразование пучков света происходит за счёт преломления и отражения света, его дифракции (являющейся частным случаем явления интерференции (при необходимости учёта ограничения протяженности волновых фронтов), поглощения и усиления интенсивности света (в случае использования квантовых усилителей).

Типы и разновидности оптических систем весьма разнообразны, однако обычно выделяют изображающие оптические системы, которые формируют оптическое изображение и осветительные системы, преобразующие световые пучки от источников света.

### **Базовые оптические элементы**

Также называются оптическими деталями. Исторически такими элементами являлись:

- линзы;
- призмы;
- зеркала;
- светофильтры.

Эта тетрада была дополнена поляризаторами и дифракционными элементами (дифракционная решётка, эшелон Майкельсона).

В XX веке появились:

- элементы волоконной оптики (гибкие световоды);
- интерференционные элементы (как, например, узкополосные светофильтры и интерференционные зеркала);
- элементы голографической техники (например — толстослойные фотопластинки);
- элементы нелинейной оптики, (например — кристаллы, используемые для преобразования частоты света).

### **Принцип действия**

Оптическая система предназначена для пространственного преобразования поля излучения **до** оптической системы (в «пространстве предметов») в поле **после** оптической системы (в «пространстве изображений»). Такое разделение «пространств» весьма условно, поскольку эти различные с точки зрения изменения структуры поля «пространства» могут в некоторых случаях (например при использовании зеркал) совпадать в трёхмерном физическом пространстве.

Преобразование поля из пространства предметов в пространство изображений производится, как правило, путём использования надлежащим образом осуществляемого явления интерференции излучения, определяющего структуру поля в пространстве предметов.

Такая организация и достигается путём использования имеющих определённую форму оптических элементов, действие которых проявляется в явлении преломления, отражения и рассеяния излучения. Физической причиной всех этих явлений является интерференция.

Во многих случаях для объяснения действия оптического элемента вполне достаточно применения понятий о сущности этих явлений, без раскрытия роли интерференции, что позволяет описывать поле излучения его формализованной геометрической моделью, основанной на интуитивно понятном представлении о «луче света» и постулате о бесконечно малости длины волны излучения и оптической однородности среды, заполняющей всё пространство, в котором действуют законы геометрической оптики.

Но в случае, когда оказывается необходимым учитывать волновые свойства излучения и принимать во внимание сравнимость размеров оптического элемента с длиной волны излучения, геометрическая оптика начинает давать ошибки, что носит название дифракции<sup>[2]</sup>, по сути своей не являющейся самостоятельным явлением, а лишь той же интерференцией.

### **Параксиальное приближение**

Даже в случае возможности пренебречь влиянием дифракции, геометрическая оптика позволяет с удовлетворительной точностью предсказать ход лучей в пространстве изображений лишь для тех из них, которые падают на рабочую поверхность очередного оптического элемента под малыми углами по отношению к оси и на малом расстоянии точки падения от оси параксиальные лучи.

В противном случае наблюдаются существенные отклонения хода луча, носящие название аберраций. Их роль может быть уменьшена за счёт усложнения оптической системы (добавления компонентов),

отказа от использования сферических поверхностей и их заменой на поверхности образованные кривыми, описываемыми уравнениями более высокого порядка, что связано с существенным усложнением технологии их производства, а также расширения номенклатуры оптических сред в сторону создания прозрачных сред во все более широком спектральном диапазоне и имеющих все более высокие значения показателя преломления<sup>[2]</sup>. В этом направлении действует специальная отрасль оптико-механической промышленности, исторически связанная с производством оптического стекла, а затем и других оптических сред как аморфных, так и кристаллических. Здесь проявили себя такие специалисты как Шотт и Аббе, а в России — Гребенщиков, Лебедев и др.

Некоторые аберрации (например, хроматическая) проявляются и в параксиальных пучках.

### **Потери излучения за счет отражения**



Блики из-за переотражений в линзах объектива

Граница двух оптических сред с разными показателями преломления всегда отражает какую либо часть излучения. Так поверхность стекла с показателем преломления 1,5 в воздухе отражает примерно 4 % света. Для снижения этих потерь используется просветление оптики, основанное на возникновении интерференционных эффектов в тонких слоях прозрачных материалов, наносимых на рабочие поверхности. Так, например, для сравнительно простых объективов типа Триплет или Тессар, имеющих 6 границ стекло/воздух, потери на отражение, без использования просветления, составили бы примерно 20 %. С потерями, как таковыми, ещё можно было бы мириться, но



отраженный свет, повторно отражаясь от других поверхностей, попадает на изображение и искажает его. Такие блики, даже несмотря на просветление, хорошо заметны на фотографиях, снятых против света.

## **Поглощение излучения**

Кроме пространственного преобразования поля излучения любой оптический элемент всегда ослабляет его интенсивность за счёт потерь, вызванных поглощением излучения материалом, из которого сделан оптический элемент. Использование оптических материалов с минимальным показателем поглощения на длине волны излучения является чрезвычайно важным в волоконной оптике, на использовании которой основано создание волоконных линий связи.

В зеркальных и зеркально-линзовых оптических системах часть излучения поглощается на металлических зеркалах.

Ослабление интенсивности излучения в ряде случаев является полезным (например в солнцезащитных очках), тем более в случае избирательного поглощения излучения цветными светофильтрами.

В настоящее время стало также возможным усиление света за счёт использования внешнего источника энергии.

Используя простейшую классификацию оптических систем, можно разделить их на линзовые, зеркальные и комбинированные зеркально-линзовые. Выбор оптической системы на основании предъявляемых к ней требований осложняется тем, что каждому типу систем присущи свои достоинства и недостатки.

При определенном диаметре и фокусном расстоянии потери на отражение и поглощение в линзовой системе будут больше, чем в зеркальной, однако суммарная эффективность зеркальной системы может оказаться выше или ниже эффективности линзовой системы в зависимости от степени экранирования зеркала в центре.

Зеркальная (отражающая) оптическая система обычно легче по весу и дешевле, чем линзовая оптическая система тех же размеров, однако зеркальные системы могут и не обеспечить столь качественное изображение, как линзовые. Например, сферические

зеркала нельзя исправить по внесосевым аберрациям, не применяя преломляющую коррекционную пластину, в то время как систему линз со сферическими поверхностями легче сбалансировать по аберрациям при расчете. Поскольку сферические поверхности изготавливать дешевле, чем асферические, это важное преимущество. С другой стороны, линзовые системы в отличие от зеркальных имеют хроматические аберрации. При проектировании систем FLIR существует тенденция отдавать предпочтение линзовым системам в связи с тем, что в этом случае существует много способов получить в компактных конструкциях изображение высокого качества. Однако преимущество отражательной оптики по стоимости заставляет вновь пересматривать обоснованность этой тенденции всякий раз, когда начинается разработка новой оптической системы.

Рассматривать оптическую систему независимо от системы сканирования трудно, поскольку обе системы тесно связаны: выбор второй в значительной мере влияет на разработку первой и наоборот. Таким образом, нужно кратко рассмотреть системы сканирования. Они разделяются на два типа в зависимости от того, осуществляется сканирование в сходящемся или параллельном пучке лучей.

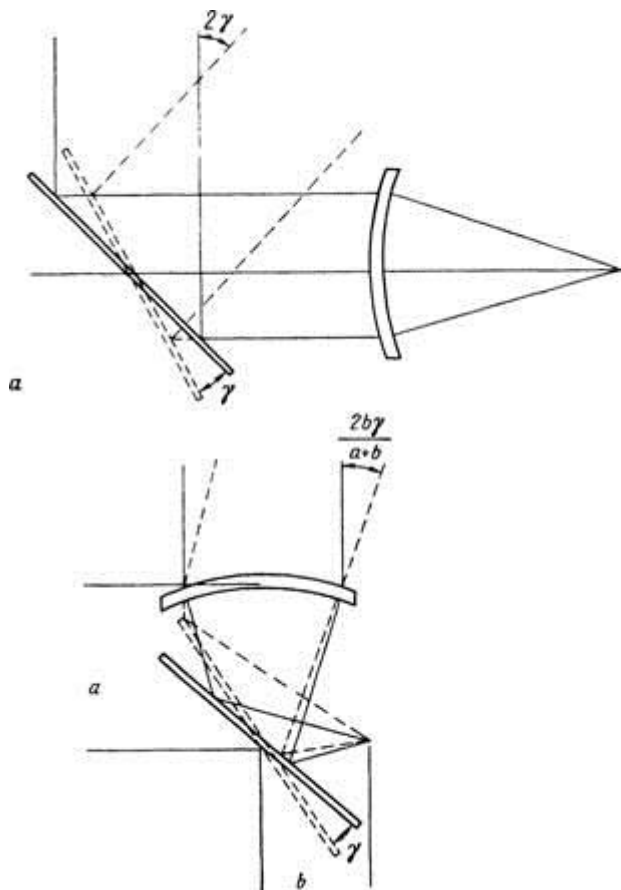


Рис. 6.1. Сканирующие устройства в параллельном (а) и сходящемся (б) пучках.

В первом случае сканирующее устройство работает в той части оптической системы, где лучи сходятся, т. е. вблизи фокуса. В типичных схемах сканирующее устройство располагается между ближайшим к фокусу преломляющим элементом и линейкой чувствительных элементов приемника излучения. При работе сканирующего устройства в параллельном пучке оно располагается

в той части оптической системы, где лучи параллельны или специально коллимируются. Если сканирующее устройство расположено перед оптической системой, его иногда называют сканирующим устройством в пространстве объектов. Сканирующее устройство может быть также расположено между парой линз оборачивающей системы. Два примера приведены на рис. 6.1. Выбор того или другого вида сканирующей системы для конкретного применения производится по результатам сравнительного анализа. Для сканирующей системы в сходящемся пучке в общем случае требуется меньше элементов, однако она вносит аберрации и искажения в сходящийся пучок, которые необходимо корректировать.

Для системы сканирования в параллельном пучке в общем случае требуется более сложная и громоздкая оптика, но качество изображения не столь чувствительно к отклонениям зеркал от плоскостности, как в сходящемся пучке. Сканирующий элемент в параллельном пучке должен соответствовать максимальному размеру проекции входного зрачка, поскольку обычно требуется разместить сканирующее устройство в пределах оптической системы. Имея в виду эти различия, можно перейти теперь к рассмотрению оптических систем.

## **6.2. Основные законы геометрической оптики**

Рассмотрим в идеализированном виде два интересующих нас оптических явления: преломление на границе двух прозрачных диэлектрических сред, как в линзе, и отражение от поверхности идеального проводника, как в зеркале. Рассмотрим рис. 6.2, на которой показана граница между двумя диэлектриками.

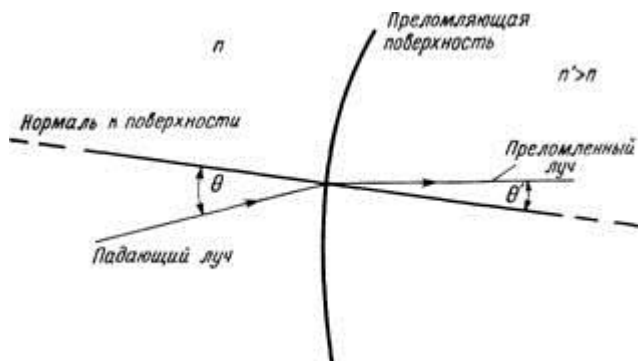


Рис. 6.2. Преломление.

Каждый материал характеризуется параметром, который называется показателем преломления  $n$  и представляет собой отношение скорости света в вакууме к скорости света в материале. Для немагнитных материалов величина  $n$  равна корню квадратному из диэлектрической постоянной, соответствующей данной оптической частоте. Показатели преломления оптических материалов, применяемых в тепловидении, приведены в разд. 6.8. На рис. 6.2 иллюстрируется закон преломления (закон Снеллиуса), согласно которому углы падения  $\theta$  и преломления  $\theta'$ , измеряемые от нормали к поверхности, связаны при переходе из среды с показателем  $n$  в среду с показателем  $n'$  соотношением

$$\sin \theta / \sin \theta' = n / n', \quad (6.1)$$

или

$$\theta' = \arcsin \left( \frac{n}{n'} \sin \theta \right). \quad (6.2)$$

Преломленный луч приближается к нормали, когда  $n' > n$ . Отражение от идеального проводника (зеркала) иллюстрируется на рис. 6.3.



Рис. 6.3. Отражение

Согласно закону отражения,

$$\theta = \theta'. \quad (6.3)$$

### 6.2.1. Оптический клин

Полезным оптическим элементом является преломляющий клин (рис. 6.4).

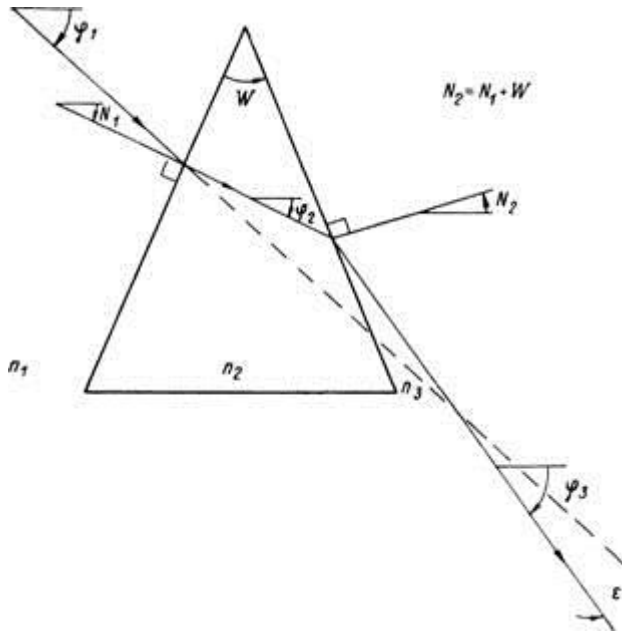


Рис. 6.4. Преломление луча оптическим клином.  
 $W$  — угол при вершине клина;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  — углы между падающим, преломленным и выходящим лучами соответственно и горизонталью;  $N_1, N_2$  — углы между нормальными к поверхности и горизонталью;  $n_1, n_2, n_3$  — показатели преломления.

Формулу, определяющую отклонение луча клином, можно вывести следующим образом. С учетом обозначений, приведенных на рис. 6.4, используя закон преломления для первой и второй поверхностей, получаем

$$\frac{\sin(\varphi_2 - N_1)}{\sin(\varphi_1 - N_1)} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{\sin(\varphi_3 - N_2)}{\sin(\varphi_2 - N_2)} = \frac{n_2}{n_3} \quad (6.4)-(6.5)$$

Из уравнений (6.4) и (6.5) имеем

$$\begin{aligned} \sin (\varphi_3 - N_2) &= \frac{n_2}{n_3} \sin (\varphi_2 - N_2) = \frac{n_2}{n_3} \sin (\varphi_2 - N_1 - W) = \\ &= \frac{n_2}{n_3} \sin [(\varphi_2 - N_1) - W] = \\ &= \frac{n_2}{n_3} \sin \left\{ \arcsin \left[ \frac{n_1}{n_2} \sin (\varphi_1 - N_1) \right] - W \right\}. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Тогда

$$\varphi_3 = \arcsin \left\{ \frac{n_2}{n_3} \sin \left\{ \arcsin \left[ \frac{n_1}{n_2} \sin (\varphi_1 - N_1) \right] - W \right\} \right\} + N_2. \quad (6.7)$$

Для малых углов  $\varphi_1 - N_1$  и  $W$  при  $n_2 > n_1$  получим

$$\varphi_3 \approx \frac{n_1}{n_3} (\varphi_1 - N_1) - \frac{n_2}{n_3} W + N_2. \quad (6.8)$$

При  $n_1 = n_3 = 1$

$$\varphi_3 \approx \varphi_1 - W (n_2 - 1) \quad (6.9)$$

и угол отклонения луча клином  $\varepsilon$  равен

$$\varepsilon = \varphi_3 - \varphi_1 \approx -W (n_2 - 1). \quad (6.10)$$

Для германия с показателем преломления  $n_2 = 4,003$

$$\varphi_3 = \arcsin \left\{ 4,003 \sin \left\{ \arcsin \left[ \frac{1}{4,003} \sin (\varphi_1 - N_1) \right] - W \right\} \right\} + N_2.$$

При  $W = 10^\circ$  для равносоставленного клина ( $N_1 = -5^\circ$ ,  $-N_2 = +5^\circ$ )

$$\begin{aligned} \varphi_3 &= \arcsin \{ 4,003 \sin \{ \arcsin [0,2498 \sin (\varphi_1 + 5^\circ)] - 10^\circ \} \} + 5^\circ \approx \\ &\approx \varphi_1 - 10^\circ \cdot 3,003 = \varphi_1 - 30,03^\circ. \end{aligned}$$

Значения  $\varphi_3$ , соответствующие некоторым значениям  $\varphi_1$ , в этом случае равны

$\varphi_1$	$\varphi_2$ (точные значения)	$\varphi_3$ (приблизительные значения)
$0^\circ$	$-32,526^\circ$	$-30,03^\circ$
5	$-26,564$	$-25,03$
10	$-21,026$	$-20,03$
15	$-15,840$	$-15,03$

Таким образом, данное приближение является не очень точным



даже для малых значений углов.

Клин является полезным оптическим элементом, поскольку при вращении клина вокруг какого-либо выходящего луча происходит сканирование падающего луча в пространстве объектов по кругу. Как показано в разд. 7.5, это свойство можно использовать в сканирующих системах.

### 6.2.2. Простая линза

Простейшая преломляющая фокусирующая оптическая система состоит из одиночной линзы со сферическими поверхностями (рис. 6.5).

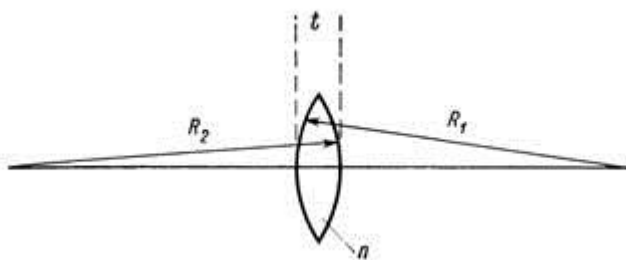


Рис. 6.5. Простая линза со сферическими поверхностями.

Простая линза характеризуется четырьмя параметрами: радиусами кривизны  $R_1$  и  $R_2$ , показателем преломления  $n$  и толщиной  $t$ . В соответствии с общепринятым правилом знаков радиус поверхности считается положительным, когда центр кривизны расположен справа от поверхности, и отрицательным, когда центр кривизны расположен слева от поверхности.  $R_1$  — положительный радиус левой, а  $R_2$  — отрицательный радиус правой поверхности. Простая линза называется тонкой, если толщиной  $t$  можно пренебречь. Представляют интерес три способа получения изображения с помощью простой линзы (рис. 6.6).

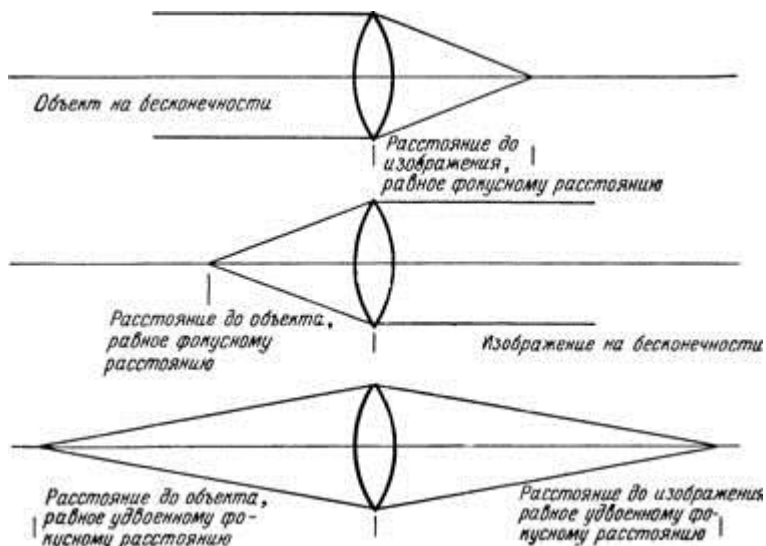


Рис. 6.6. Способы получения изображения с помощью простой линзы.

В первом случае параллельный пучок лучей от бесконечно удаленного точечного источника фокусируется за линзой на расстоянии  $f$  от нее. Отрезок  $f$  называется фокусным расстоянием линзы. В первом приближении величина  $f$  определяет сдвиг  $s$  в изображении бесконечно удаленного объекта, лучи от которого попадают на линзу под небольшим углом  $\sigma$  к оси (фиг. 6.7):

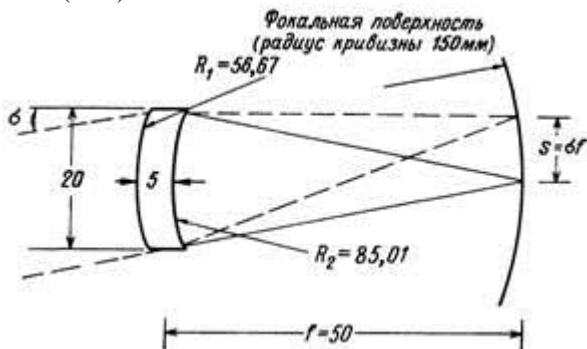
$$s = \sigma f. \quad (6.11)$$


Рис. 6.7. Фокусирующее действие типичной линзы инфракрасной системы.

Во втором случае точечный источник, находящийся на расстоянии  $f$  перед линзой, дает параллельный пучок лучей за линзой. В третьем случае точечный объект, находящийся на расстоянии  $O$  от линзы, отличающемся от бесконечности и от  $f$ , дает изображение в виде точки на расстоянии  $i$  от линзы, определяемом уравнением тонкой линзы

$$\frac{1}{O} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}, \quad (6.12)$$

где

$$\frac{1}{f} \triangleq (n-1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (6.13)$$

или

$$f = \frac{R_1 R_2}{(n-1)(R_2 - R_1)}.$$

(6.14)

Из приведенных уравнений видно, что важную роль играет величина показателя преломления материала, из которого сделана линза. Чем больше показатель преломления, тем больше могут быть радиусы для обеспечения данного фокусного расстояния. С увеличением радиусов облегчается изготовление линзы, появляется возможность получить более равномерное просветляющее покрытие на ее поверхности и уменьшить толщину линзы, что приводит к уменьшению потерь на поглощение излучения. Линза называется положительной, или собирающей, если она фокусирует падающий на нее параллельный пучок лучей, и отрицательной, или рассеивающей, если она рассеивает падающий на нее параллельный пучок лучей.

Фокусное расстояние толстой линзы толщиной  $t$  определяется формулой

$$f = \frac{R_1 R_2}{(n-1) \left[ (R_2 - R_1) + \frac{n-1}{n} t \right]}.$$

Можно показать, что увеличение фокусного расстояния  $\Delta f$  линзы с увеличением ее толщины  $t$  описывается соотношением

$$\Delta f = - \frac{f_0}{(R_2 - R_1) \frac{t}{n} + 1}, \quad (6.16)$$

где  $f_0$  — фокусное расстояние тонкой линзы с  $t = 0$ .

## 6.3. Глаз как оптическая система

### 6.3.1. Строение глаза

На рисунке 6.8. изображен разрез глазного яблока и показаны основные детали глаза.

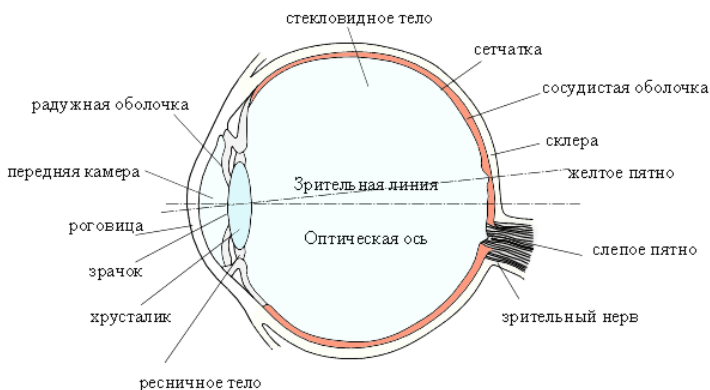


Рис. 6.8. Горизонтальный разрез правого глаза.

Глаз представляет собой шаровидное тело (**глазное яблоко**), почти полностью покрытое непрозрачной твердой оболочкой (**склерой**). В передней части глаза оболочка переходит в выпуклую и прозрачную **роговицу**. Склера и роговица обуславливают форму глаза, защищают его и служат местом крепления глазодвигательных мышц. Диаметр всего глазного яблока около 22-24 мм, масса 7-8 г.

Тонкая сосудистая пластинка (**радужная оболочка**) является диафрагмой, ограничивающей проходящий пучок лучей. Через

отверстие в радужной оболочке (**зрачок**) свет проникает в глаз. В зависимости от величины падающего светового потока диаметр зрачка может изменяться от 1 до 8 мм.

*Помимо сосудов радужная оболочка содержит большое количество пигментных клеток, в зависимости от их содержания и глубины залегания радужная оболочка имеет различный цвет. Когда в радужной оболочке нет никакого цветного вещества, то она кажется красной от крови, заключенной в пронизывающих ее кровеносных сосудах. В этом случае глаза плохо защищены от света и иногда страдают светобоязнью (альбинизмом), но в темноте превосходят по остроте зрения глаза с темной окраской.*

**Хрусталик** представляет собой двояковыпуклую эластичную линзу, которая крепится на мышцах **ресничного тела**. Ресничное тело обеспечивает изменение формы хрусталика. Хрусталик разделяет внутреннюю поверхность глаза на две камеры: **переднюю камеру**, заполненную водянистой влагой, и **заднюю камеру**, заполненную стекловидным телом.

Внутренняя поверхность задней камеры покрыта **сетчаткой**, представляющей собой светочувствительный слой. Получаемое светочувствительными элементами сетчатки раздражение передается волокнам **зрительного нерва** и по ним достигает зрительных центров мозга. Между сетчаткой и склерой находится тонкая **сосудистая оболочка**, состоящая из сети кровеносных сосудов, питающих глаз.

Место входа зрительного нерва представляет собой **слепое пятно**. Немного выше расположено **желтое пятно** – участок наиболее ясного видения. Линия, проходящая через центр желтого пятна и центр хрусталика, называется **зрительной осью**. Она отклонена от оптической оси глаза на угол около  $5^\circ$ .

### 6.3.2. Упрощенная оптическая схема глаза

Поток излучения, отраженный от наблюдаемого предмета, проходит через оптическую систему глаза и фокусируется на внутренней поверхности глаза – сетчатой оболочке, образуя на ней обратное и уменьшенное изображение (мозг «переворачивает»

обратное изображение, и оно воспринимается как прямое). Оптическую систему глаза составляют роговица, водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело (рис. 6.9). Особенностью этой системы является то, что последняя среда, проходимая светом непосредственно перед образованием изображения на сетчатке, обладает показателем преломления, отличным от единицы. Вследствие этого фокусные расстояния оптической системы глаза во внешнем пространстве (переднее фокусное расстояние) и внутри глаза (заднее фокусное расстояние) неодинаковы.

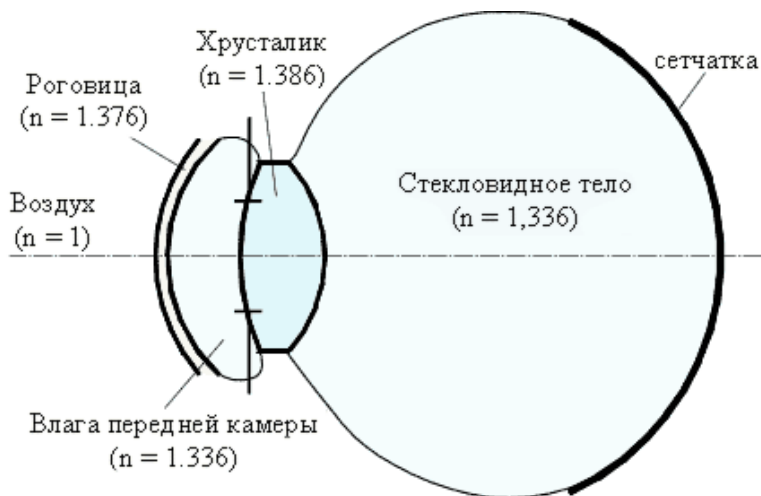


Рис. 6.9. Оптическая система глаза.

Преломление света в глазу происходит главным образом на его внешней поверхности – роговой оболочке, или роговице, а также на поверхностях хрусталика. Радужная оболочка определяет диаметр зрачка, величина которого может изменяться произвольным мышечным усилием от 1 до 8 мм.

Оптическая система глаза чрезвычайно сложна, поэтому при расчетах хода лучей обычно пользуются упрощенными, эквивалентными истинному глазу «схематическими глазами». В таблице 6.1 приведены данные для аккомодированного и не аккомодированного глаза.

№	В состоянии покоя			В состоянии наибольшей аккомодации		
	радиус кривизны	осевое расстояние	показатель преломления	радиус кривизны	осевое расстояние	показатель преломления
1	7,7	0,5	1,376	7,7	0,5	1,376
2	6,8	3,1	1,336	6,8	2,7	1,336
3	10,0	3,6	1,386	5,33	4,0	1,386
4	-6,0	15	1,336	-5,33	15	1,336
	Оптическая сила $\Phi = 58$ дптр			Оптическая сила $\Phi = 70$ дптр		

Таблица 6.1. Данные «схематического глаза».

Оптическая сила глаза вычисляется как обратное фокусное расстояние:

$$\Phi = \frac{1}{f'}, [\text{дптр}]$$

где  $f'$  – заднее фокусное расстояние глаза, выраженное в метрах.

### 6.3.3. Аккомодация

**Аккомодация** – это способность глаза приспосабливаться к четкому различению предметов, расположенных на разных расстояниях от глаза.

Аккомодация происходит путем изменения кривизны поверхностей хрусталика при помощи натяжения или расслабления ресничного тела. Когда ресничное тело натянуто, хрусталик растягивается и его радиусы кривизны увеличиваются. При уменьшении натяжения

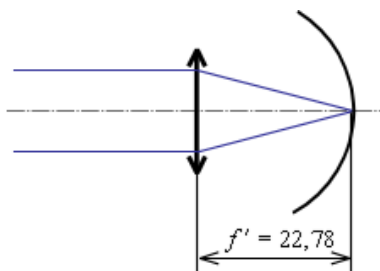
мышцы хрусталик под действием упругих сил увеличивает свою кривизну.

В свободном, ненапряженном состоянии нормального глаза на сетчатке получают ясные изображения бесконечно удаленных предметов, а при наибольшей аккомодации видны самые близкие предметы.

Положение предмета, при котором создается резкое изображение на сетчатке для ненапряженного глаза, называют **дальней точкой глаза**.

Положение предмета, при котором создается резкое изображение на сетчатке при наибольшем возможном напряжении глаза, называют **ближней точкой глаза**.

При аккомодации глаза на бесконечность задний фокус совпадает с сетчаткой. При наибольшем напряжении на сетчатке получается изображение предмета, находящегося на расстоянии около 9 см (рис. 6.10).



а) дальняя точка



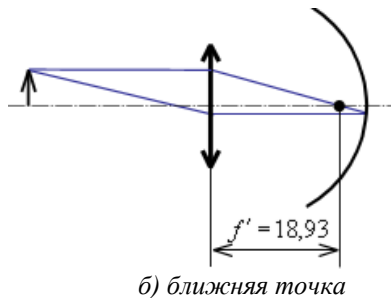


Рис. 6.10. Изображение ближней и дальней точки.

Разность обратных величин расстояний между ближней и дальней точкой называют **диапазоном аккомодации глаза** (измеряется в дптр).

С возрастом способность глаза к аккомодации постепенно уменьшается. Скажем, в возрасте 20 лет для среднего глаза ближняя точка находится на расстоянии около 10 см (диапазон аккомодации 10 дптр), в 50 лет ближняя точка располагается на расстоянии уже около 40 см (диапазон аккомодации 2.5 дптр), а к 60 годам уходит на бесконечность, то есть аккомодация прекращается. Это явление называется **возрастной дальнозоркостью** или **пресбиопией**.

**Расстояние наилучшего зрения** – это расстояние, на котором нормальный глаз испытывает наименьшее напряжение при рассматривании деталей предмета.

В среднем расстояние наилучшего зрения составляет около 25-30 см, хотя для каждого человека оно может быть индивидуальным.



## **6.4. Оптические материалы для тепловизионных систем**

Для линз и окон в тепловидении обычно используются три класса оптических материалов: полупроводниковые материалы кремний и германий (как в монокристаллической, так и в поликристаллической форме); поликристаллические соединения II — IV групп, полученные горячим прессованием, типа керамических оптических материалов «Иртран» (фирма «Истмен кодак»); полученные химическим путем слои ZnSe и ZnS, а также халькогенидные стекла типа П1 1173 (фирма «Тексес инструменте»). Кремний и германий используются особенно широко, поскольку высокий показатель преломления, большая механическая прочность и твердость облегчают проектирование оптических деталей из этих материалов.

В идеальном случае желательно, чтобы материал линз, используемых в тепловизионных системах, обладал высоким показателем преломления, не зависящим от температуры и не меняющимся с длиной волны, т. е. имел бы нулевую дисперсию. Материал должен иметь нулевой коэффициент теплового расширения, высокую поверхностную твердость, высокую механическую прочность, совместимость с просветляющими покрытиями, не растворяться в воде и слабо поглощать инфракрасное излучение. Высокий показатель преломления требуется для уменьшения кривизны линз и их толщин, а также числа линз в системе с данным относительным отверстием. Низкий температурный коэффициент показателя преломления необходим для предотвращения дополнительных aberrаций и изменений фокусного расстояния линз с изменением температуры. Малая дисперсия необходима для минимизации хроматической aberrации и числа линз для ее компенсации. Сохранение размеров линз при изменении температуры нужно для исключения несбалансированных aberrаций и изменений фокусных расстояний, а также для упрощения монтажа линз в оправках.

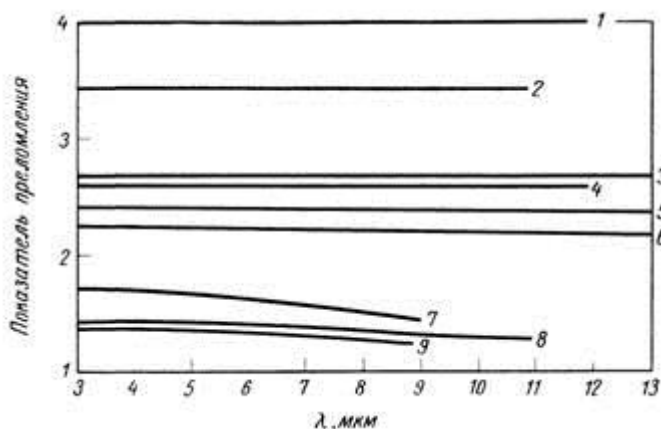


Рис. 6.11. Показатели преломления оптических материалов, используемых обычно для изготовления линз в тепловидении. 1 — германий; 2 — кремний; 3 — «Иртран» 6; 4 — ТИ 1173; 5 — «Иртран» 4 и селенид цинка; 6 — «Иртран» 2 и сульфид цинка; 7 — «Иртран»; 8 — «Иртран» 23; 9 — «Иртран» 1.

Высокая твердость предохраняет поверхность от царапин и истирания, а высокая механическая прочность позволяет применять тонкие линзы (с большим отношением диаметра к толщине). Совместимость с просветляющими покрытиями совершенно необходима, поскольку потери на отражение от поверхности увеличиваются с ростом  $n$ . Нерастворимость в воде нужна для того, чтобы линзы не разрушались под дождем и при высокой влажности. Низкий показатель поглощения снижает потери на поглощение и обеспечивает эффективное проектирование систем. Ни один из известных материалов не обладает всеми этими качествами, однако кремний, германий, селенид цинка  $ZnSe$ , сульфид цинка  $ZnS$  и стекла ТИ 1173 наиболее близки к совершенству. Эти материалы имеют высокие показатели преломления, высокую твердость и прочность, совместимы с просветляющими покрытиями, нерастворимы и характеризуются малым поглощением. Чаще всего для изготовления линз систем тепловидения применяются кремний и германий. Важнейшие свойства наиболее употребительных оптических материалов приведены в табл. 6.1.

Герцбергер и Зальцберг установили, что дисперсия инфракрасных оптических материалов достаточно точно описывается уравнением

$$n = A + BL + CL^2 + DL^3 + EL^4,$$

$$L = (\lambda^2 - 0,028)^{-1}.$$

где

Свойства наиболее употребительных влагостойких инфракрасных оптических материалов

Материал	Состав, структура	Рабочий ИК-диапазон длин волн, мкм	Показатели преломления							
			71(3 МК М)	п(4 мкм)	п(5 мкм)	71(8 мкм)	7J(9 мкм)	71(10 МК М)	7i(11 МК М)	71(12 МК М)
Германий	гс-типа с низким сопротивлением	2-23	4,049	4,0244	4,0151	4,0053	4,0040	4,0032	4,0026	4,0023
Кремний	р- или я-типа с низким сопротивлением	1,5-15	3,4324	3,4254	3,4221	3,4184	3,4180	3,4177	3,4177	—
«Иртран» 1	Горячее прессование	0,5-9,0	1,3640	1,3526	1,3374	1,2634	1,2269	—	—	—
«Иртран» 2	е, MgF2 Горячее прессование, ZnS	0,4—14,5	2,2558	2,2504	2,2447	2,2213	2,2107	2,1986	2,1846	2,1689
Сульфид цинка	Химическое осаждение из паровой	0,4-14,5	2,2558	2,2504	2,2447	2,2213	2,2107	2,1986	2,1846	2,1689

	фазы									
«Иртран» 3	Горячее прессование, CaF <sub>2</sub>	0,4-11,5	1,4179	1,4097	1,3990	1,3498	1,3269	1,3002	1,2694	—
«Иртран» 4	Горячее прессование, 7пЧр	0,5-22	2,440	2,435	2,432	2,418	2,413	2,407	2,401	2,394
Селенид цинка	Химическое осаждение из паровой фазы	0,5—22	2,440	2,435	2,432	2,418	2,413	2,407	2,401	2,394
«Иртран» 5	Горячее прессование, MgO	0,4-9,5	1,6920	1,6684	1,6368	1,4824	1,406	—	—	—
«Иртран» 6	Горячее прессование, ГНТр	0,9-31	2,695	2,688	2,684	2,677	2,674	2,672	2,669	2,666
Теллурид кадмия	VjU JL с Химическое осаждение из паровой фазы, CdTe	0,9—15	—	—	2,67	—	—	2,56	—	—
Сульфид кадмия	Химическое осаждение из паровой фазы, CdS	1—14	—	—	2,27	—	—	—	—	—
TI 1173	Аморфный Ge <sub>28</sub> Sb <sub>12</sub> Se <sub>60</sub>	1—14	2,6263	2,620	2,6165	2,6076	2,604	2,600	2,596	2,592
TI 20	Аморфный Ge <sub>33</sub> Asi <sub>2</sub> Se <sub>55</sub>	0,8—16	—	—	2,49	—	—	3,135	3,045	—
Арсенид галлия	Ga As	0,9—11	—	—	—	3,34	—	-3,1	—	—
Трисульф	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ,	1—11	2,41	2,41	2,40	2,39	2,38	2,38	2,37	2,36

фид мышьяк а	стекло		68	18	77	37	78	11	35	50
--------------------	--------	--	----	----	----	----	----	----	----	----

Материал	$\frac{\partial n}{\partial T}$ 300 $10^{-6}$	$\alpha = \frac{1}{l} \frac{dn}{dT}$ $10^{-6}$ см/(см·град)	Твердость По Кнупу	Показатель поглощения при 300 К и при $\lambda = 3, 4$ и 5 мкм, см-1 (приблизительные значения)	Показатель поглощения при 300 К и при $\lambda = 8, 9, 10, 11$ мкм, см-1 (приблизительные значения)	Модуль Юнга, ГПа при 25°С	Показатель дисперсии	
							-Г-5 мкм	-Г-11 мкм
Германий	280—300	5,5-6,1	692—850	0,0047; 0,0048; 0,0051	0,015; 0,018; 0,021; 0,029	103,5	88,44	111 2,59
Кремний	162-168	4-4,15	1150	—	—	131,1	235,65	345 4,36
«Иртра-н» 1	—	10,4—12,0	576	0,31; 0,19; 0,24	—	114,5	13,18	—
«Иртра-н» 2	51	6,9—7,4	250	0,22; 0,12; 0,07	0,07; 0,08; 0,11; 0,45	96,6	112,64	32,7 8
Сульфид цинка	—	—	250	0,22; 0,12; 0,07	0,07; 0,08; 0,11; 0,45	—	112,64	32,7 8
«Иртра-н» 3	—	18,9—20	200	0,16; 0,12; 0,06	—	98,7	21,61	3,85 1
«Иртра-н» 4	48-58	7,4—8	100	—	0,14; 0,19; 0,13; 0,13	71,07	179,5	82,9 1
Селенид цинка	100	8,53	100	<0,003	<0,003	67,3	179,5	82,9 1
«Иртра-н» 5	—	10,4-12	640	0,24; 0,18; 0,16	—	332,6	12,04	—

«Иртра н» 6	96	5,3-6	45	—	0,24; 0,25; 0,29; 0,27	35,9	153 ,6	209, 1
Теллур ид кад мия	93— 107	5,9	45	0,005 при 10 мкм	0,002 при 10 мкм	22,1	—	—
Сульф ид кад мия	—	3	120	—	0,03 при 10 мкм	—	—	—
ТИ 1173	80	15-16	150	—	0,059 при 11 мкм	21,3 9	165 ,45	138, 09
ТИ 20	-80	13	171	—	0,075 при 10 мкм 0,091 при И мкм	20,7	—	—
Арсени д гал лия	149	5,7—6	750	—	0,02 при 10 мкм	88,8	—	—
Трисул ьфид мышья ка	— 8,6ч- 4-10	24,6	109			15,8 7	155 ,2	68,5

Коэффициенты дисперсии оптических материалов, применяемых & телевизионных системах

Материал	Диапазон длин волн, мкм	A	B	C	D	E
Германий	2,0-13,5	3,99931	0,391707	0,163492	— 0,0000060	0,0000000 53
Кремний	1,3— 11,0	3,41696	0,138497	0,013924	— 0,0000209	0,0000001 48
«Иртра н» 1	1,0— 6,7	1,37770	0,001348	0,000216	— 0,0015041	0,0000044 1
«Иртра н» 2	1,0— 13,5	2,25698	0,032586	0,000679	— 0,0005272	0,0000006 04
«Иртра	1-10	1,42780	2,280696	-	—	—



н» 3		71	6-10-3	9,1939015-10-5	1,1165792-Ю'3	1,5949659-10-6
«Иртра н» 4	1—10	2,4350823	5,1567472-10-2	2,4901923.10-3	— 2,7245212.10-8	— 9,8541275-10-8
«Иртра н» 5	1—10	1,7200516	5,6119400-Ю-3	— 1,0986148-10-5	— 3,0994558-10-3	— 9,6139613-10-6
«Иртра н» 6	1—10	2,682384	1,180290-10"1	3,27680М0-2	— 1,202984-Ю-4	2,177336-10-8

Значения коэффициентов приведены в табл. 6.2. Уравнение такого вида полезно для получения интерполяцией промежуточных значений показателя преломления, заключенных между измеренными значениями  $n$ . Дисперсия некоторых материалов показана на рис. 6.11.

## 7. Сканирующие устройства

Сканирующее устройство в системе FLIR используется для перемещения изображения, сформированного оптической системой в плоскости линейки чувствительных элементов приемника излучения, с тем чтобы обеспечить полное последовательное разложение изображения. Существуют два основных типа сканирующих систем (рис. 7.1): осуществляющие сканирование в параллельном и в сходящемся пучках лучей.

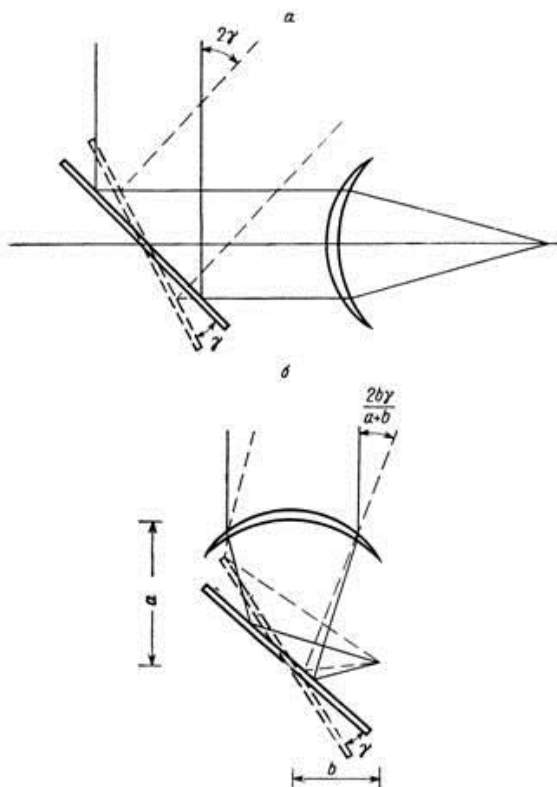


Рис. 7.1. Сканирующие системы в параллельном (а) и сходящемся (б) пучках лучей.

Системы сканирования в параллельном пучке состоят из оптического отклоняющего устройства, например движущегося зеркала, расположенного перед объективом, формирующим выходное изображение. Системы сканирования в сходящемся пучке лучей состоят из движущегося зеркала или другого сканирующего элемента, расположенного между объективом, создающим выходное изображение, и изображением. Обычно используются следующие типы оптических сканирующих устройств: качающееся зеркало, вращающийся зеркальный барабан, вращающаяся призма, вращающийся клин, перемещающийся объектив, вращающееся приемное устройство и вращающееся V-образное зеркало. Различные комбинации этих устройств позволяют создать как одномерные, так и двумерные системы сканирования.

### 7.1. Плоское качающееся зеркало

Качающееся зеркало (рис. 7.2) периодически качается между двумя ограничителями хода и может использоваться как в параллельном, так и в сходящемся пучке лучей. Угол отклонения луча качающимся зеркалом вдвое больше угла поворота самого зеркала (рис. 7.2).

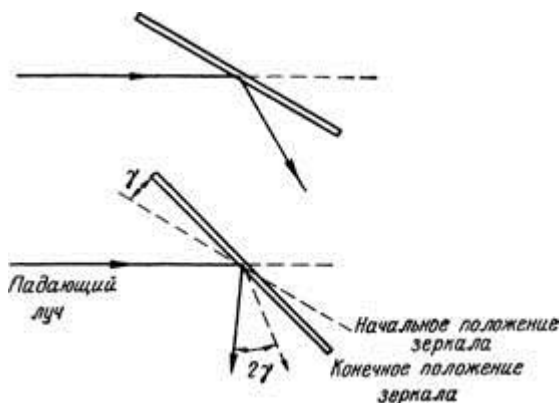


Рис. 7.2. Отклонение луча на двойной угол при качании зеркала.

В этом можно убедиться с помощью закона отражения.

Рассмотрим рис. 7.3, где показаны два положения зеркала ( $M_1$  и  $M_2$ ) с углом  $\gamma$  между ними и соответствующие нормали к поверхности зеркала  $N_1$  и  $N_2$ . Показаны также два падающих луча  $I_1$  и  $I_2$ , которые после отражения распространяются в одном направлении  $E$ .

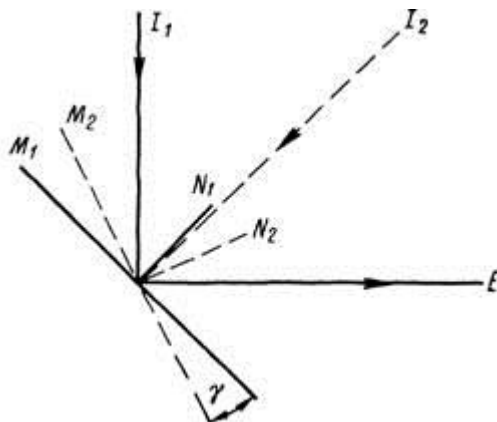


Рис. 7.3. К выводу выражения для угла отклонения луча в зависимости от угла поворота зеркала при качании.

Угол между  $I_1$  и  $I_2$  равен

$$\angle(I_1, I_2) = \angle(E, I_1) - \angle(E, I_2). \quad (7.1)$$

По закону отражения

$$\angle(I_1, I_2) = 2\angle(E, N_1) - 2\angle(E, N_2). \quad (7.2)$$

Поскольку угол между нормальми к поверхности зеркала равен  $-\gamma$ , получим

$$\angle(I_1, I_2) = 2\{\angle(E, N_1) - [\angle(E, N_1) - \gamma]\} = 2\gamma. \quad (7.3)$$

## 7.2. Сканирующие системы в сходящемся пучке лучей

Качающееся зеркало в сходящемся пучке лучей — настолько распространенное сканирующее устройство, что имеет смысл рассмотреть подробнее, как угловое перемещение зеркала

обеспечивает сканирование и влияет на фокусировку. Рассмотрим рис. 7.4, на которой для простоты показаны только центральные лучи для двух положений зеркала.

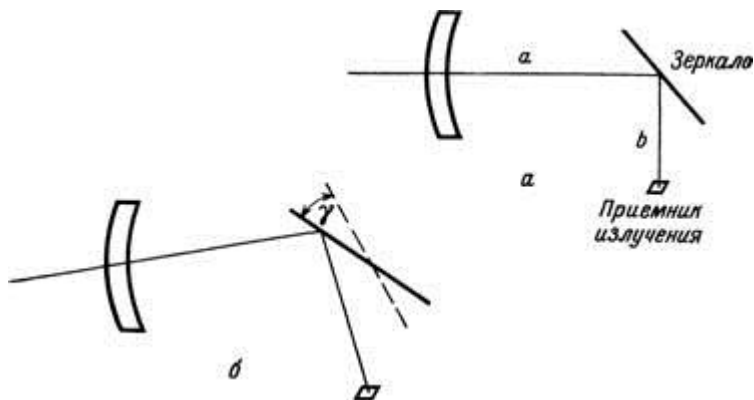


Рис. 7.4. Принцип сканирования качающимся зеркалом, а — неотклоненное зеркало; б — отклоненное на угол  $\gamma$  зеркало.

На рис. 7.5 показаны те же лучи для неотклоненного и отклоненного положений зеркала, а также эквивалентный ход лучей без излома зеркалом.

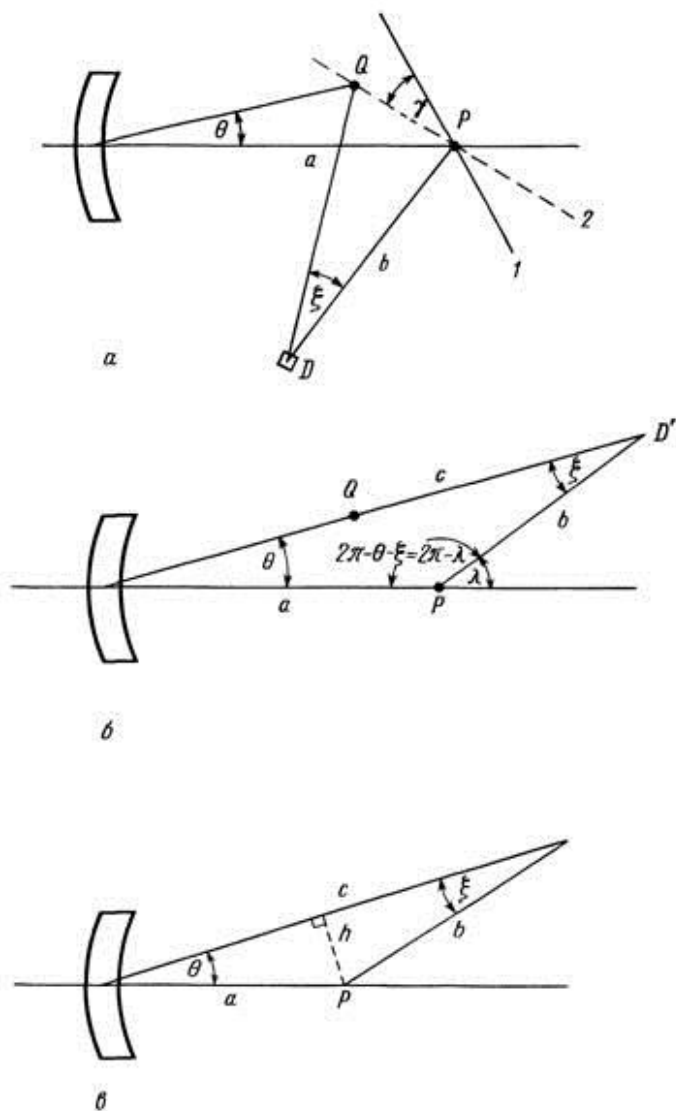


Рис. 7.5. Изменение длины пути луча.

1 — неотклоненное зеркало; 2 — отклоненное на угол  $\gamma$  зеркало.

Такое построение упрощает вывод соответствующих соотношений. Пусть угол сканирования, измеряемый от оптической оси, равен  $\theta$ , и пусть положение зеркала относительно произвольной неподвижной позиции характеризуется углом  $\gamma$ ; центр вращения обозначим  $P$ , а местоположение приемника излучения —  $D$ . Размеры  $a$  и  $b$  показаны на чертеже.

Зависимость угла сканирования  $\theta$  от углового положения зеркала  $\gamma$  можно найти из построения, приведенного на рис. 7.5.

Треугольник  $PDQ$ , соответствующий отражению от зеркала, находящегося в положении, показанном пунктиром, преобразуется в треугольник  $PD'Q$ . Суммарная длина пути луча для смещенного положения зеркала равна  $c = a + b$ . Из чертежа видно, что

$$\lambda = \theta + \xi. \quad (7.4)$$

Так как угловое смещение отраженного от зеркала луча  $PD$  равно удвоенному изменению углового положения зеркала  $\gamma$ , имеем

$$\lambda = 2\gamma, \quad (7.5)$$

так что

$$\gamma = (\theta + \xi)/2. \quad (7.6)$$

Теперь рассмотрим треугольник со сторонами  $a$ ,  $b$  и  $c$  и опустим перпендикуляр  $h$  на сторону  $c$  из точки  $P$  (фиг. 7.5, *е*). Ясно, что

$$\sin \xi = h/b, \quad (7.7)$$

$$\sin \theta = h/a \quad (7.8)$$

и, следовательно,

$$\xi = \arcsin (a \sin \theta/b). \quad (7.9)$$

Подстановка уравнения (7.9) в уравнение (7.6) дает

$$\gamma = \frac{\theta + \arcsin (a \sin \theta/b)}{2}. \quad (7.10)$$

Преобразуя уравнение (7.10), получим

$$\operatorname{tg} \theta = b \sin 2\gamma / (a + b \cos 2\gamma), \quad (7.11)$$

или

$$\theta = \operatorname{arctg} [b \sin 2\gamma / (a + b \cos 2\gamma)]. \quad (7.12)$$

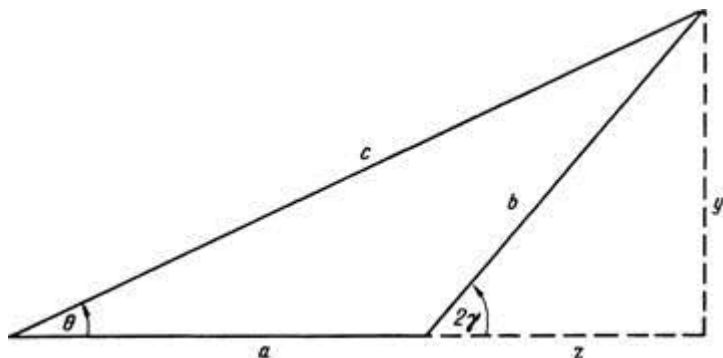


Рис. 7.6. К определению длины пути луча с.

Это и есть искомое соотношение. Для достаточно малых углов  $\theta$  оно приводится к виду

$$\theta = 2b\gamma/(a + b), \quad (7.13)$$

или

$$\gamma = \theta(a + b)/2b. \quad (7.14)$$

Эти выражения можно вывести также из построения, приведенного на фиг. 7.6:

$$\operatorname{tg} \theta = y/(a + z), \quad (7.15)$$

$$y = b \sin 2\gamma \quad (7.16)$$

и

$$z = b \cos 2\gamma. \quad (7.17)$$

Следовательно,

$$\operatorname{tg} \theta = \sin 2\gamma/[(a/b) + \cos 2\gamma], \quad (7.18)$$

или

$$\theta = \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sin 2\gamma}{(a/b) + \cos 2\gamma} \right]. \quad (7.19)$$

Из фиг. 7.6 видно, что длина пути с от объектива до приемника излучения сокращается, когда зеркало отклоняет главный луч от оси, т. е.

$$c < a + b = f \quad (7.20)$$

при  $\theta \neq 0$ . Идеальный объектив формирует изображение на сферической поверхности радиусом  $R$ , определяемым уравнением (6.61). Расстояние от объектива до этой поверхности определяется уравнением (6.62)

$$x(\theta) = \sqrt{R^2 - \sin^2 \theta (R - f)^2} - (R - f) \cos \theta. \quad (7.21)$$

Из рис. 7.7 следует, что если кривизна поля не компенсирует кривизну, вызванную изменением длины пути луча, то возникает расфокусировка.



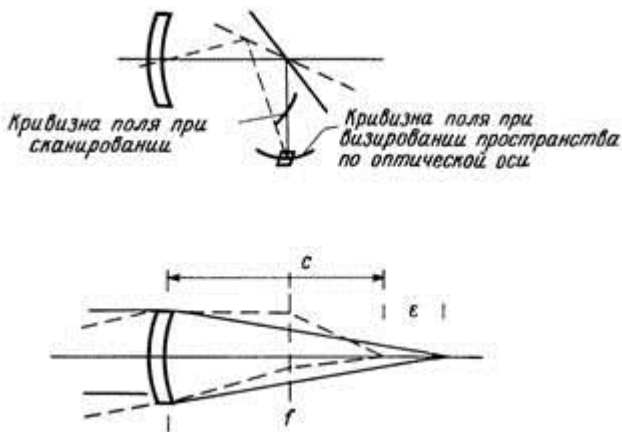


Рис. 7.7. Расфокусировка, вызванная изменением длины пути луча.

Расфокусировка в функции угла сканирования  $\theta$  описывается соотношением

$$\text{Расфокусировка} = c(\theta) - x(\theta). \quad (7.22)$$

Таким образом, чтобы не было расфокусировки, должно удовлетворяться условие

$$c(\theta) = x(\theta). \quad (7.23)$$

Длину пути  $c$  можно найти из фиг. 7.6, заметив, что

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(\pi - 2\gamma), \quad (7.24)$$

и подставив выражение для  $\gamma$ . В результате получим

$$c = \left\{ a^2 + b^2 - 2ab \cos \left[ \pi - \theta - \arcsin \left( \frac{a \sin \theta}{b} \right) \right] \right\}^{1/2}. \quad (7.25)$$

Из построения, приведенного на фиг. 7.6, следует

$$c = y / \sin \theta = b \sin 2\gamma / \sin \theta, \quad (7.26)$$

или

$$c = b \sin \left[ \theta + \arcsin \left( \frac{a}{b} \sin \theta \right) \right] / \sin \theta. \quad (7.27)$$

В заключение выражение

$$c = (a + z) / \cos \theta \quad (7.28)$$

можно переписать в другой эквивалентной форме:

$$c = \frac{a + b \cos \left[ \theta + \arcsin \left( \frac{a \sin \theta}{b} \right) \right]}{\cos \theta}. \quad (7.29)$$

Геометрическое построение, приведенное на рис. 7.8, позволяет вывести выражение для расфокусировки в случае плоской фокальной поверхности.

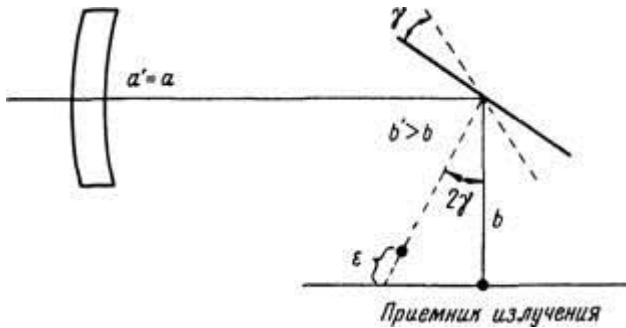


Рис. 7.8. Линейная расфокусировка в сканирующем устройстве в сходящемся пучке лучей.

Здесь мы рассматриваем осевой луч и его отклонение на идеальной плоской фокальной поверхности. Отрезок  $a$  является общим как для отклоненного, так и для неотклоненного лучей, и так как поворот зеркала на угол  $\gamma$  вызывает отклонение луча на  $2\gamma$ , имеем

$$\epsilon = b' - b = \frac{b}{\cos 2\gamma} - b = b(\sec 2\gamma - 1). \quad (7.30)$$

$\epsilon \ll 2b\gamma^2$  для малых  $\gamma$ , или

$$\epsilon \approx \frac{\theta^2 (a+b)^2}{2b}. \quad (7.31)$$

Из подобия треугольников (рис. 7.9) диаметр кружка рассеяния  $d$  получается равным

$$d = \epsilon D / f = \frac{(f-c) D}{f}, \quad (7.32)$$

а соответствующий угловой размер  $\delta$  составит

$$\delta = d/c = \frac{D(f-c)}{fc}. \quad (7.33)$$

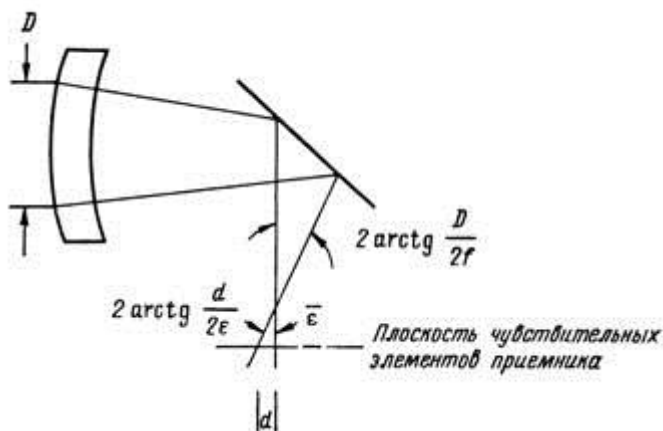


Рис. 7.9. Диаметр кружка рассеяния при расфокусировке в сканирующем устройстве в сходящемся пучке лучей.

Эту расфокусировку можно компенсировать, рассчитав при проектировании фокальную поверхность таким образом, чтобы в горизонтальном направлении она имела кривизну, компенсирующую расфокусировку, а в вертикальном направлении была плоской, что позволило бы расположить на ней плоскую линейку чувствительных элементов приемника излучения. Для этой цели в сходящемся пучке вблизи приемника излучения устанавливают полевую линзу. Другую возможность скорректировать расфокусировку дает следующая схема: ось зеркала монтируют на эксцентрик, который попеременно перемещает зеркало внутрь и наружу, предотвращая расфокусировку.

### 7.3. Сканирующие системы в параллельном пучке лучей

Чаще всего качающееся зеркало используют как сканирующее устройство в параллельном пучке лучей, расположенное между телескопической системой и объективом приемника излучения

(рис. 7.10).

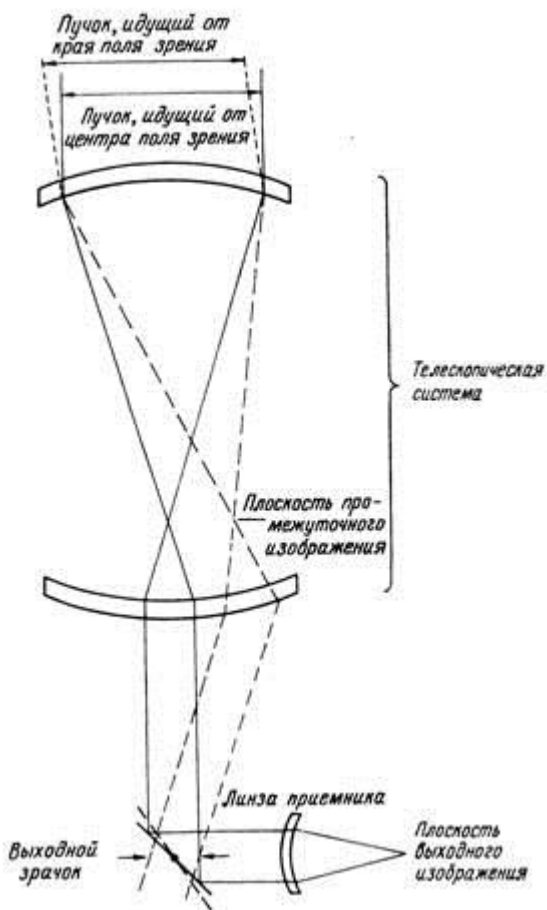


Рис. 7.10. Сканирующее устройство с качающимся зеркалом в параллельном пучке лучей.

Важной особенностью систем этого типа является то, что зеркало сканирует не в пространстве объектов, а близ выходного зрачка телескопа. Пучки, соответствующие определенным углам поля

зрения, совмещаются только в одной плоскости — в выходном зрачке. Таким образом, если требуются небольшие размеры объектива приемника излучения, сканирующее зеркало следует располагать вблизи выходного зрачка, чтобы расхождение сканирующих пучков было малым. Такая схема приведена на рис. 7.10. На рис. 7.11 схема сканирования показана более подробно для случая неподвижного выходного пучка.

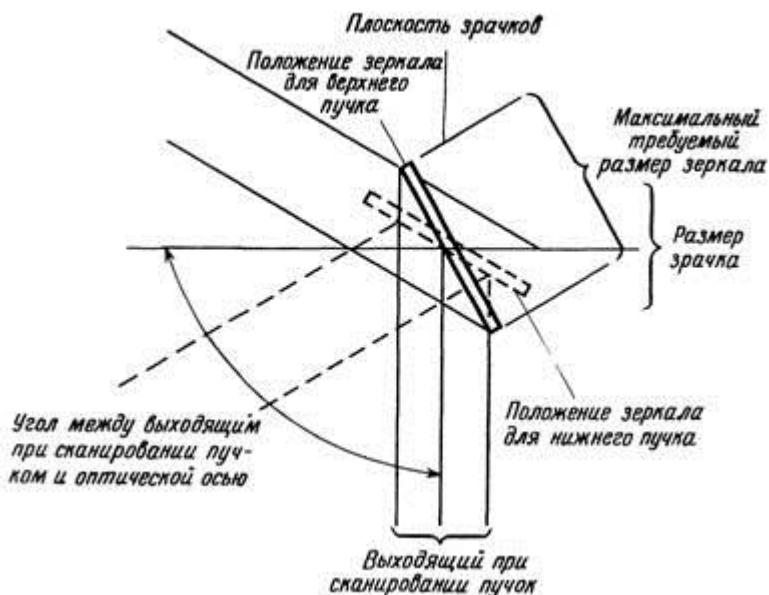


Рис. 7.11. Расположение зеркала для получения несмещающегося пучка.

Начальное и конечное положения зеркала соответствуют противоположным краям поля зрения телескопической системы. Требуемый размер зеркала  $I$  определяется из рис. 7.12 следующим образом.

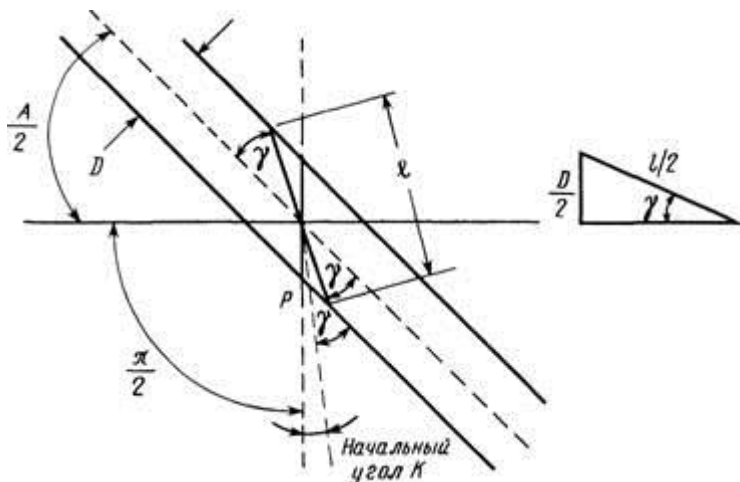


Рис. 7.12. К определению длины зеркала.

В первом приближении диаметр пучка  $D$  для данного половинного угла поля зрения  $A/2$  связан с диаметром выходного зрачка  $P$  соотношением

$$D = P \cos \frac{A}{2}. \quad (7.34)$$

Суммируя углы вокруг оси пучка, получим

$$\frac{A}{2} + \frac{\pi}{2} + K + \gamma + \gamma = \pi, \quad (7.35)$$

или

$$\gamma = \frac{\pi}{4} - \frac{A}{4} - \frac{K}{2}. \quad (7.36)$$

Длина зеркала  $l$  связана с положением зеркала  $\gamma$  и диаметром пучка  $D$  соотношением (фиг. 7.12)

$$l = D / \sin \gamma, \quad (7.37)$$

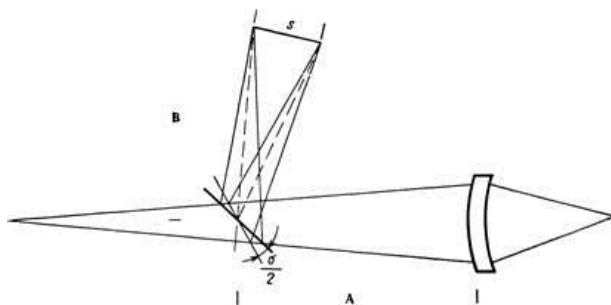


Рис. 7.13. Движение точки, сопряженной с фиксированной точкой изображения, в пространстве объектов.

## 7.4. Сканирующие устройства и траектории сканирования

Как мы говорили, 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.7.14, а), либо за объективом в сходящемся пучке (рис.7.14,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.



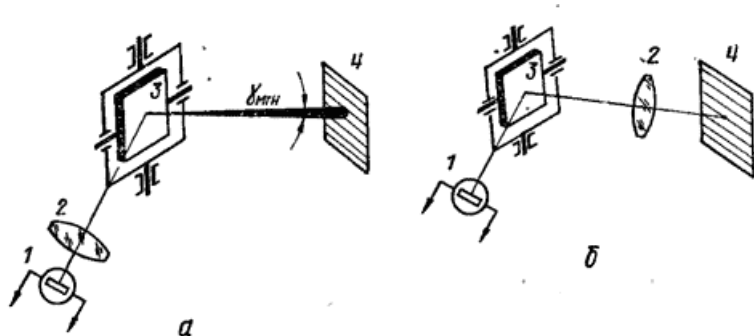


Рис.7.14. Сканирующие устройства с колеблющимся зеркалом, размещенным в параллельном (а) или в сходящемся (б) пучке лучей: 1 — ПИ; 2 — объектив; 3 — сканирующее зеркало; 4 — поле обзора

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 aberrаций увеличивается.

Построчное сканирование с помощью колеблющегося плоского зеркала приводит к отклонению раstra от прямоугольного, если зеркало расположено под некоторым углом  $\gamma$  к оптической оси (рис.7.15,а).

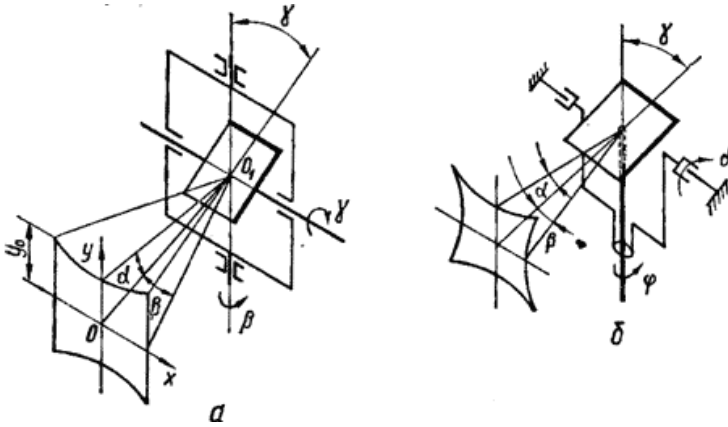


Рис.7.15. Форма раstra при построчном сканировании плоским зеркалом (а) и плоским зеркалом, жестко закрепленным на оси (б)

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  $\alpha_{\max}$  и  $\beta_{\max}$  — максимальные углы поворота зеркала относительно осей  $ox$  и  $oy$  соответственно;  $L_0 = 00$ .

Сканирующее плоское зеркало может быть жестко закреплено на оси под углом  $45^\circ$ , так что сканирование вдоль строки обеспечивается поворотами зеркала относительно этой оси на угол  $\pm\varphi$ , а сканирование по кадру — поворотом зеркала вместе с осью, на которой оно закреплено, на угол  $\pm\gamma$  (рис.7.15,б). В этом случае форма раstra близка к трапеции. При  $\beta = +10^\circ$  и  $\gamma \approx 2,5^\circ$  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.

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. 7.16).

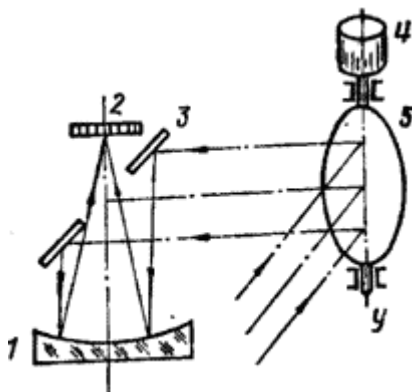


Рис.7.16. Сканирующее устройство с многоэлементным ПИ и расположением сканирующего зеркала в параллельном пучке лучей: 1 — объектив; 2 — ПИ; 3 — отражательное зеркало; 4 — электромагнит; 5 — сканирующее плоское зеркало

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  $\pm 16^\circ$ ; 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. 7.17,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.

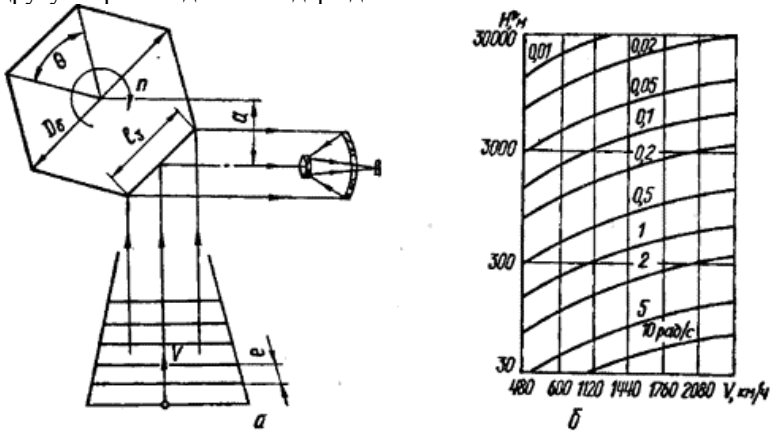


Рис.7.17. Схема сканирующего устройства с вращающимся зеркальным барабаном (а) и графики изменения отношения  $V/H$  (б)

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  $\Delta t$ , большего постоянной времени приемника.

Время  $\Delta t$  определяется частотой и вращения барабана и углом зрения  $\gamma$ :  $60\gamma/(2\pi n)$ , поэтому предельно допустимая частота вращения барабана

$$n_{\text{пред}} \leq \frac{60\gamma}{2\pi k_T \tau}. \quad (1)$$

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

$$n_{\text{пред}} \geq 60bV/(HN\gamma_{\text{мгн}}). \quad (2)$$

Из формул (1) и (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  $3000 \text{ мин}^{-1}$ . Для уменьшения скорости вращения барабана стремятся увеличить число его отражающих граней. Максимальное число граней  $N_{\text{max}} = 2\alpha/0,5(\tau + \Delta\gamma)$ , где  $0,5$  введено из-за удвоения скорости отраженного луча, а  $\Delta\gamma$  — 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  $1 \text{ с}$  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. 7.17,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. 1). 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 обзора.

### **1. Габаритные размеры элементов строчной системы обзора пространства, выраженные через диаметр объектива D**

Число отражающих граней N	Угол, соответствующий числу граней	Диаметр зеркального барабана $D_g$	Расстояние между осями	Число отражающих граней N	Угол, соответствующий числу граней $N_0$	Диаметр зеркального барабана $D_g$	Расстояние между осями
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  $l_3 = 2D$ , ширина зеркала равна  $D$ .

Последнего недостатка лишены система с коническим обзором (рис.7.18), 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.

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

С учетом обозначений, принятых на рис. 7.18, угловая скорость мгновенного поля зрения  
где  $n_{\text{ск}}$  — частота вращения сканирующего зеркала.

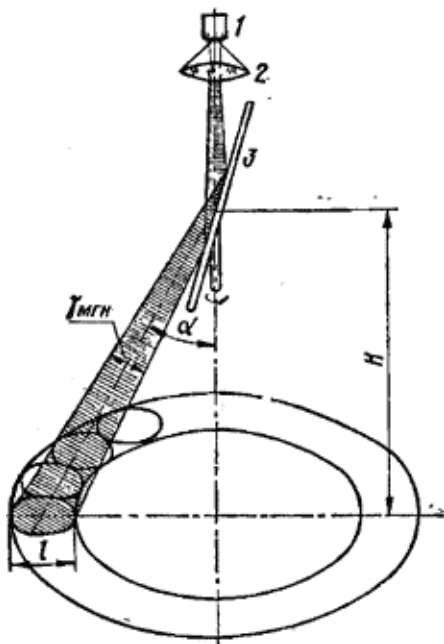


Рис.7.18. Схема сканирующего устройства с коническим обзором: ПИ; 2 — объектив; 3 — вращающееся зеркало

В сканирующем устройстве, изображенном на рис. 7.19, используется вращающаяся усеченная зеркальная пирамида, расположенная перед объективом в пучке параллельных лучей.

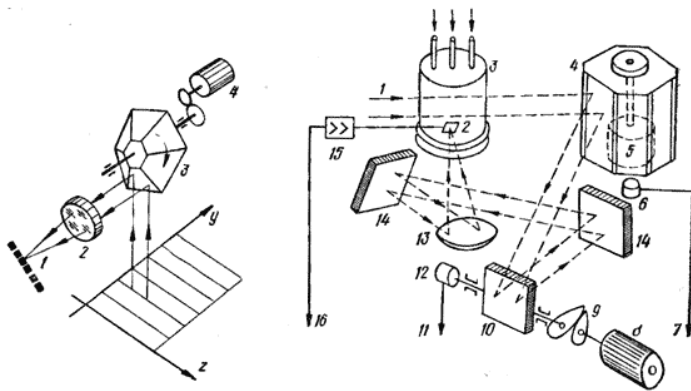


Рис.7.17. Сканирующее устройство с вращающейся усеченной зеркальной пирамидой:  
 1 — многоэлементный (линейный) приемник излучения; 2 — объектив; 3 — зеркальная пирамида; 4 — двигатель, вращающий пирамиду

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:  $уг = уг = 2n \cdot j$ . Этому значению угла соответствует время  $Tг$  обзора одного поля кадра; полное время обзора кадра  $Tгу = 60/и$ , где  $п$  — частота вращения пирамиды.

Разработаны сканирующие устройства (рис.7.20), в которых используются комбинация колеблющегося плоского зеркала и вращающейся призмы, как это сделано в тепловизоре производства Франции, предназначенном для медицинских целей.



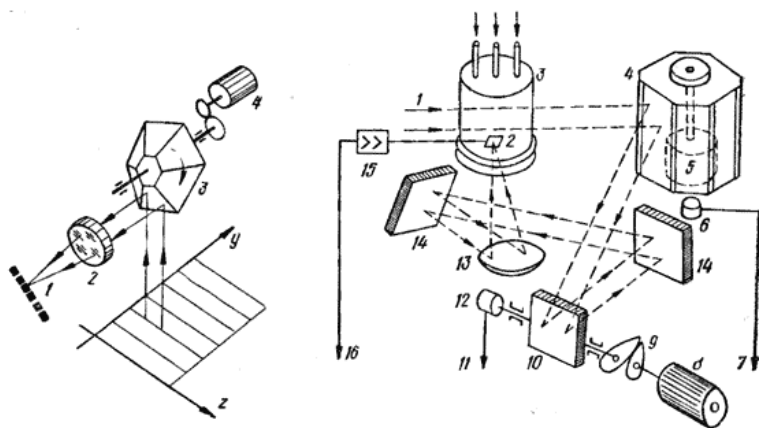


Рис.7.20. Сканирующее устройство с колеблющимся плоским зеркалом и вращающейся призмой, расположенными в пучке параллельных лучей:

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  $2 \text{ с}^{-1}$ ; 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.7.21,а) состоит из двух призм, укрепленных на одной оси и повернутых одна относительно другой на угол  $\text{Tgr}/2$ , и двух каналов, работающих с каждой призмой.

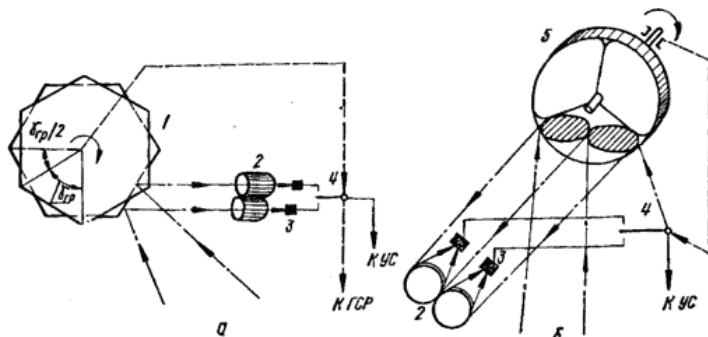


Рис.7.21. Двухканальные схемы сканирующих устройств с многогранными призмами (а) и с многогранной пирамидой (б): 1 — две многогранные призмы; 2 — объектив; 3 — приемник излучения; 4 — переключатель каналов; 5 — многогранная пирамида

В 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.

В двухканальной схеме сканирования с многогранной зеркальной пирамидой (рис.7.21,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  $\gamma/2$ , поэтому общий угол фения соответствует угловому размеру грани, равному  $\gamma$ , т. е. коэффициент использования зеркала  $k) = 1$ .

Сканирование вращающимися преломляющимися клиньями и призмами. Оптический клин с углом  $\alpha$  при вершине отклоняет луч света на угол  $\alpha (n - 1)$ , где  $n$  — показатель преломления материала клина (рис.7.22,а).

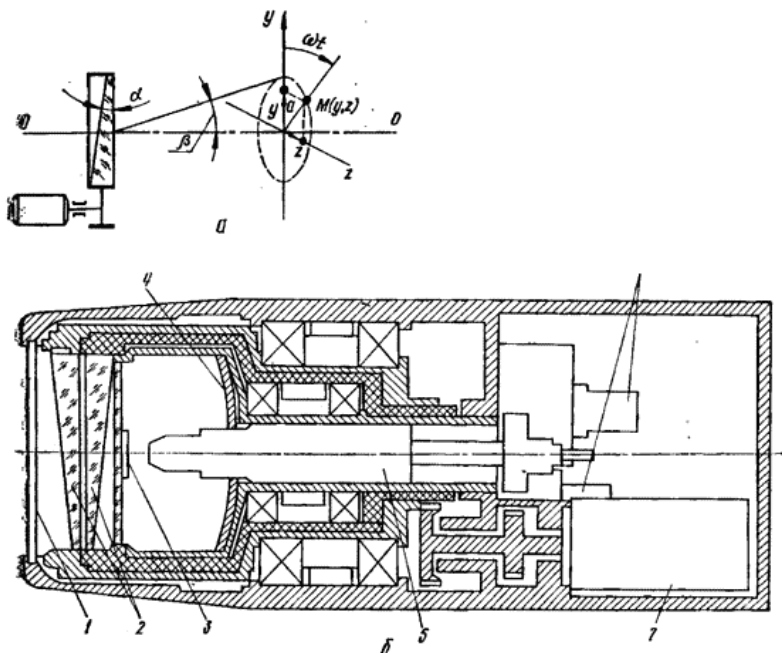


Рис.7.22. Схема сканирования с помощью вращающегося оптического клина (а) и конструкция сканирующего устройства (б): 1 — входное окно; 2 — вращающиеся оптические клинья; 3 — плоское зеркало; 4 — зеркальный объектив; 5 — приемник излучения с криостатом; 6 — элементы синхронизации; 7 — электродвигатель

При вращении клина с угловой скоростью  $\omega$  вокруг оси  $00$ , совпадающей с осью объектива, луч, прошедший через клин, описывает коническую поверхность, а точка встречи луча с фокальной плоскостью — окружность. Текущие координаты точки  $y = a \cos \omega t$ ;  $z = a \sin \omega t$ .

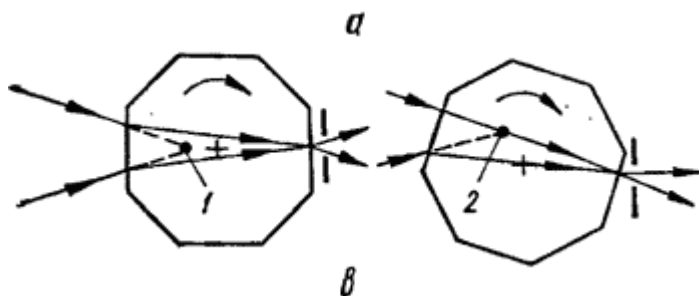
Одним из наиболее перспективных материалов для клиньев сканирующих устройств в диапазоне  $3,4 \dots 5,0$  мкм является кремний. Из него можно изготовить оптические детали диаметром  $80 \dots 100$  мм. Крупногабаритные детали из кремния сложны в производстве и механически прочны.

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.7.22,б. Клинья диаметром 12 мм вращаются с частотой 100 и 101 с<sup>-1</sup>, 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 мм<sup>2</sup> 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<sup>-1</sup>; 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.7.23,а).



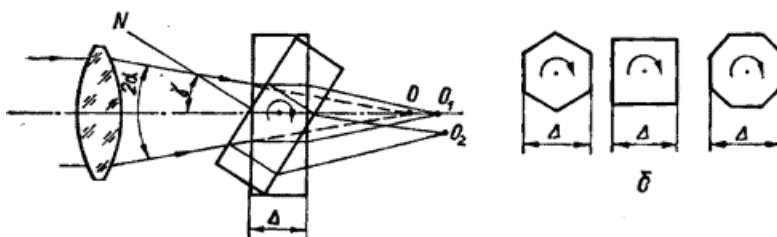


Рис.7.23. Схема сканирования с помощью плоскопараллельной пластины (а) и преломляющей призмы (б, в)

Если пластина отсутствует, изображение наблюдаемого объекта фокусируется объективом в точку  $O$ , находящуюся на оптической оси  $s$  фокальной плоскости. При наличии пластины изображение смещается по оси в точку  $O_1$ , а при повороте пластины на угол  $\gamma$  — в точку  $O_2$ . 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.7.23,б), при вращении которых плавно изменяется угол  $\gamma$ , а переход от одной грани к другой соответствует повторному сканированию той же строки.

В исходном положении восьмигранной призмы (рис.7.23,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). 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  $\gamma$  преломляющей пластины толщиной  $\Delta$  или эквивалентной ей призмы (точка  $o_2$  на рис.7.23,а) зависят не только от величин  $\gamma$ ,  $\Delta$  и показателя преломления, но и от угла расхождения лучей, падающих на пластину. В результате этого гомоцентрический пучок лучей, после выхода из пластины становится негомоцентрическим.



### 7.5. Вращающиеся преломляющие клинья

Вращающийся преломляющий клин является одним из наиболее гибких элементов систем сканирования.

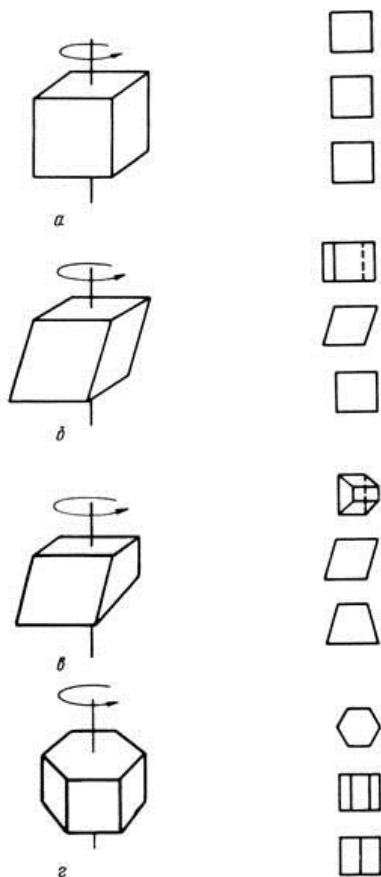


Рис. 7.26. Вращающиеся преломляющие призмы. а — прогрессивная развертка; б — чересстрочная развертка 2:1; в — чересстрочная развертка 4:1; г — чересстрочная развертка 3:1. Справа от каждой призмы приведены вид сверху, вид спереди и вид сбоку (сверху вниз).

Использование двух вращающихся клиньев позволяет получить линейную развертку, развертку по кругу, по эллипсу, розетку или спираль. Устройства сканирования с помощью клина следует применять в параллельном пучке лучей, поскольку в сходящихся пучках они вызывают сильные аберрации. Поэтому рассмотрим только случай применения клиньев в параллельном пучке лучей (рис. 7.27).

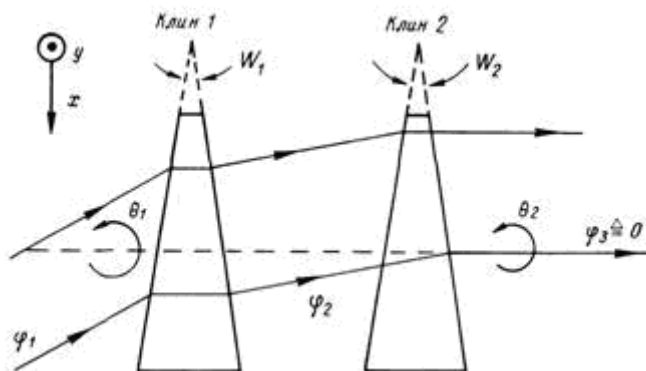


Рис. 7.27. Сканирующее устройство в виде пары вращающихся клиньев

Пусть падающий луч характеризуется углом  $\theta_1$  с компонентами  $(\theta_1^x$  и  $\theta_1^y$ ), и пусть угол между лучом и осью в промежутке между клиньями равен  $\theta_2$  с компонентами  $\theta_2^x$  и  $\theta_2^y$ . Координаты  $(x, y)$  выбраны таким образом, что положительные углы соответствуют повороту вверх от оси. Для показанного на фигуре случая выходящий луч параллелен оси. Направление вращения клиньев вокруг оси считается положительным, если оно происходит против часовой стрелки; углы поворота обозначены  $\theta_1$  и  $\theta_2$ . Движение луча, входящего в систему под углом  $\theta_1$  при изменении углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$  можно описать, проследивая обратный ход луча, вышедшего из системы под углом  $\theta_3$ , и используя известные законы преломления лучей в клине:

1. Найти отклонение  $\theta_3$  луча, выходящего из клина 2, в зависимости от поворота клина  $\theta_2$ .



2. Разделить угол  $\varphi_2$  на две компоненты, связанные с неподвижными и вращающимися координатами клина 1.

3. Найти компоненты отклоненного луча, выходящего из клина 1, во вращающихся координатах.

4. Перейти к неподвижной системе координат для отыскания искомой величины  $\varphi_1$ .

Необходимое построение выполнено на фиг. 7.28. Если следовать справа налево, луч  $\varphi_3$  входит в клин 2 с компонентами

$$\varphi_{3x} = \varphi_{3y} = 0 \quad (7.86)$$

в невращающейся системе координат. Выходя из клина, луч отклоняется на угол  $\delta_2$ . Компоненты его в невращающейся системе координат будут равны

$$\varphi_{2x} = \delta_2 \cos \theta_2, \quad (7.87)$$

$$\varphi_{2y} = -\delta_2 \sin \theta_2. \quad (7.88)$$

Преобразуя эти компоненты во вращающуюся систему координат клина 1, получим

$$\varphi'_{2x} = \varphi_{2x} \cos \theta_1 - \varphi_{2y} \sin \theta_1, \quad (7.89)$$

$$\varphi'_{2y} = \varphi_{2y} \cos \theta_1 + \varphi_{2x} \sin \theta_1. \quad (7.90)$$

Выходя из клина, луч имеет во вращающейся системе координат следующие компоненты:

$$\varphi'_{1x} = \varphi'_{2x} + \delta_1, \quad (7.91)$$

$$\varphi'_{1y} = \varphi'_{2y}. \quad (7.92)$$

Наконец, преобразование этих компонентов в невращающуюся систему координат дает

$$\varphi_{1x} = \varphi'_{1x} \cos \theta_1 + \varphi'_{1y} \sin \theta_1, \quad (7.93)$$

$$\varphi_{1y} = \varphi'_{1y} \cos \theta_1 - \varphi'_{1x} \sin \theta_1. \quad (7.94)$$

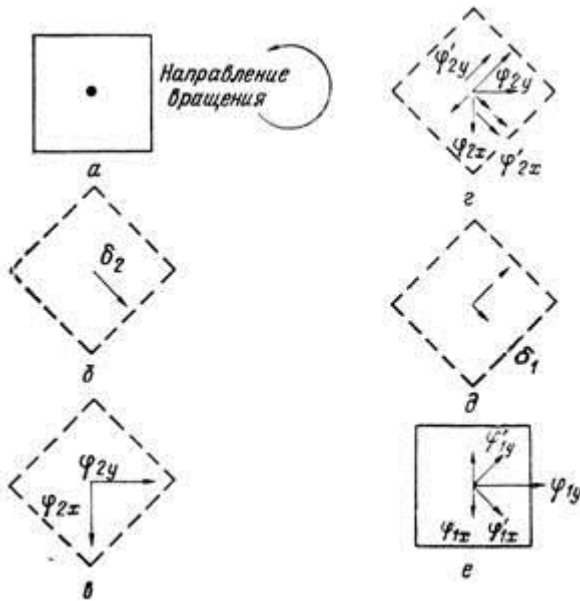


Рис. 7.28. К выводу выражения для угла отклонения луча.  
 а — неотклоненный луч  $\text{срз} = 0$ ; б — луч, выходящий из вращающегося клина 2\ в — преобразование в невращающуюся систему координат; г — преобразование во вращающуюся систему координат клина 1\ д — луч, выходящий из клина J, во вращающейся системе координат; е — луч, выходящий из клина 1, в невращающейся системе координат.

Совместное использование полученных соотношений дает искомые общие уравнения для сканирующего устройства, состоящего из двух клиньев:

$$\varphi_{1x} = [\delta_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \delta_1] \cos \theta_1 + \delta_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \sin \theta_1, \quad (7.95)$$

$$\varphi_{1y} = \delta_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \cos \theta_1 - [\delta_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \delta_1] \sin \theta_1. \quad (7.96)$$

В табл. 7.2 приведены некоторые используемые на практике случаи сканирования с помощью пары вращающихся клиньев, имеющих

постоянные и одинаковые по абсолютной величине скорости вращения. Недостатком систем этого типа при сканировании по линейному закону является более низкий, чем в других системах, коэффициент использования развертки из-за изменения скорости по синусоидальному закону. Покадровая и построчная регистрация требует также высокого постоянства угловой скорости вращения клиньев. При использовании зубчатых передач люфт в них и в связи с этим износ зубьев представляют серьезную проблему.

Таблица 7.2  
Четыре возможных случая сканирования с помощью пары вращающихся клиньев

Случай	Условия	$\Phi_{1x}$	$\Phi_{1y}$	Сканирование
1	$\theta_1 = \theta_2 = \theta$ $\delta_1 = \delta_2 = \delta$	$2\delta \cos \theta$	$-2\delta \sin \theta$	Круговое
2	$\theta_2 = -\theta_1 = -\theta$ $\delta_1 = \delta_2 = \delta$	$2\delta \cos \theta \times$ $\times (1 - \sin^2 \theta) \approx$ $\approx 2\delta \cos \theta$ (для малых $\theta$ )	0	По прямой в двух направлениях, со скоростью, изменяющейся примерно по закону косинуса
3	$\theta_2 = -\theta_1 = -\theta$ $\delta_1 \neq \delta_2$	$2\delta_2 \cos^3 \theta +$ $+ (\delta_1 - \delta_2) \cos \theta$	$(\delta_2 - \delta_1) \sin \theta$	Приблизительно эллиптическое
4	$\theta_2 = \theta_1 + P$ $\theta_1 = \theta$ $\delta_1 = \delta_2 = \delta$	$\delta [\cos \theta +$ $+ \cos \theta \cos P +$ $+ \sin \theta \times$ $\times \sin (2\theta + P)]$	$-\delta [\sin (\theta + P) +$ $+ \sin \theta]$	Такое же, как в случае 2, только линия сканирования вращается со скоростью $P$

## 7.6. Другие системы сканирования

Простейшее решение проблемы обеспечения сканирования заключается в использовании перемещающегося объектива. На рис. 7.29 изображена простая схема такого рода — объектив, прокачивающийся между двумя ограничителями. Другим вариантом подобного устройства является изображенная на рис. 7.30 сканирующая система с вращающимися в револьверной оправе объективами, которая применялась на ранней стадии развития FLIR. Обе системы невыгодны для приборов с большой апертурой, поскольку приходится перемещать слишком большие массы стекла, и кроме того револьверная оправа имеет очень низкий коэффициент использования развертки. Большинство сканирующих устройств дает прямоугольный растр, однако определенный интерес представляют и другие, реже используемые устройства с круглым растром. В последнем случае имеются две возможности: вращение всего приемного устройства с радиальным расположением чувствительных элементов приемника излучения или вращение картины с помощью вращающихся оптических элементов. Первый способ иллюстрируется на рис. 7.31. Недостатками таких сканирующих систем являются необходимость вращения большой массы приемного

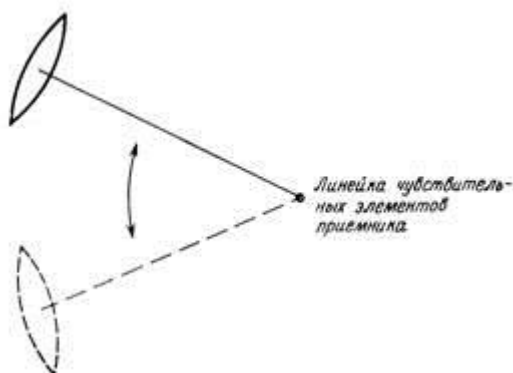


Рис. 7.29. Простая сканирующая система с перемещающимся объективом.

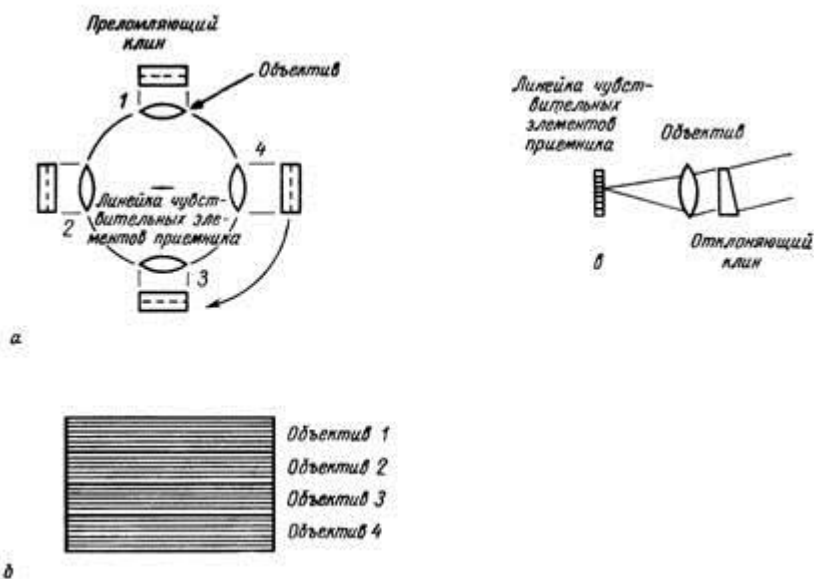


Рис. 7.30. Сканирующая система с вращающимися в револьверной оправе объективами.

а — вид сверху; б — вид раstra; в — вид сбоку на одну телескопическую систему.

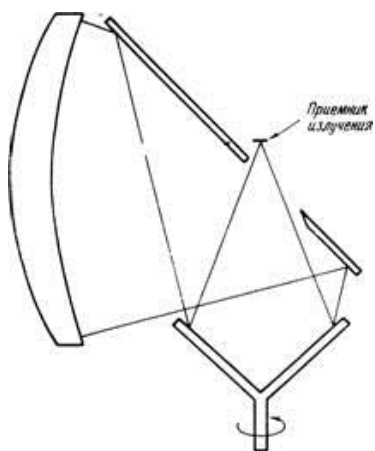


Рис. 7.33. Сканирующая система с круговым сканированием.

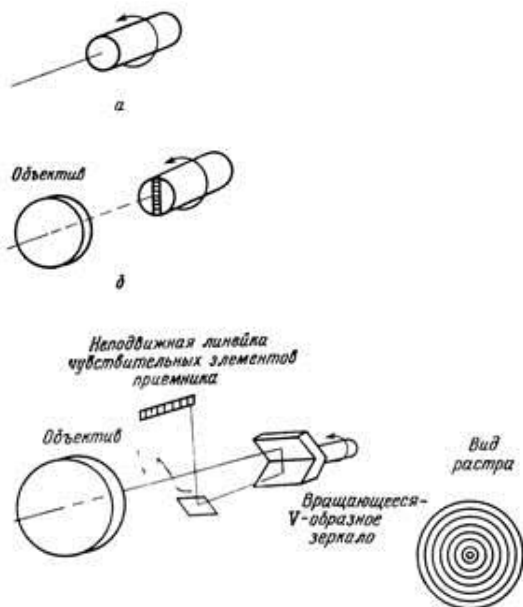


Рис. 7.32. Сканирующая система с вращающимся V-образным зеркалом.

Рис. 7.31. Сканирующие системы с вращающимся приемным устройством.

а — вращающееся приемное устройство в целом; б — вращающийся увел приемника излучения.

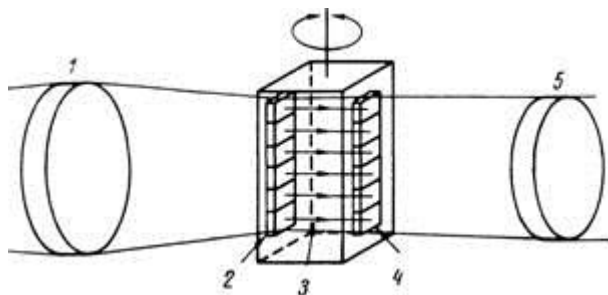


Рис. 7.34. Сканирующая система с вращением в фокальной плоскости.

1 — инфракрасный объектив; 2 — линейка чувствительных элементов приемника; 3 — многоканальное устройство электронной обработки сигнала; 4 — линейка светодиодов; 5 — окуляр. устройства и возникновение гироскопического эффекта, который может усложнить конструкцию подвеса.

Гораздо проще вращать картину, а не приемное устройство. Эффективный метод, который можно для этого использовать, заключается в применении вращающегося V-образного зеркала (рис. 7.32). Другой пример круговой сканирующей системы показан на рис. 7.33. Основное преимущество таких систем заключается в том, что движение непрерывно и что любое вращение изображения, возникающее при сканировании, может быть устранено вращением в обратную сторону компенсирующих поворот оптических элементов. Наконец, можно прокачивать целиком приемник излучения с электронным блоком (рис. 7.34).

## **7.7. Эффекты затемнения**

В определенных типах субоптимальных разработок FLIR на изображение на экране индикатора накладывается медленно изменяющийся большой по площади паразитный сигнал. Этот дефект изображения называется затемнением по аналогии с похожим, но не связанным с ним по существу эффектом в передающих телевизионных трубках. Затемнение возникает, когда наблюдается одно из следующих двух явлений (или оба сразу). Во-первых, если сигнал приемника излучения от однородного источника изменяется в картине в зависимости от угла сканирования, изображение источника на экране индикатора будет казаться изменяющимся по яркости или затемняться. Во-вторых, если меняется сигнал приемника излучения от источников, находящихся вне поля зрения, т. е. сигнал от фона, система FLIR пропустит эти изменения по переменной составляющей в видеоканал, в результате чего возникнет не зависящий от картины эффект затемнения.

Имеются два типа затемнения: зависящее и не зависящее от сигнала. Зависящее от сигнала затемнение возникает по следующим причинам. Во-первых, из-за дисторсии в оптической системе, которая приводит к изменению увеличения в зависимости от угла поля зрения. В результате будет наблюдаться локальное увеличение или уменьшение яркости деталей изображения в фокальной плоскости. Поскольку системы FLIR работают по переменной составляющей сигнала, изменения яркости фона из-за дисторсии будут еще более заметными. Во-вторых, виньетирование в оптической системе вызывает спад сигнала в соответствии с кривой виньетирования. Эти два дефекта часто удается устранить соответствующим выбором оптической системы при проектировании. В-третьих, затемнение равномерно излучающего объекта возникает из-за изменения по закону косинуса проекции площади зрачка оптической системы на плоскость, перпендикулярную оси мгновенного угла поля зрения. В-четвертых, зависящее от сигнала затемнение связано с изменением угла, под которым сходящийся пучок падает на приемник излучения. Эта причина может создать наиболее серьезные проблемы. В первом приближении плоская поверхность чувствительных элементов



приемника воспринимает излучение по закону Ламберта, т. е. выходной сигнал пропорционален косинусу угла между падающим пучком и нормалью к поверхности чувствительного элемента приемника. Все системы со сканированием в сходящемся пучке и системы со сканированием в параллельном пучке, в которых перемещается зрачок, характеризуются изменением угла падения пучка на приемник (рис. 7.35).

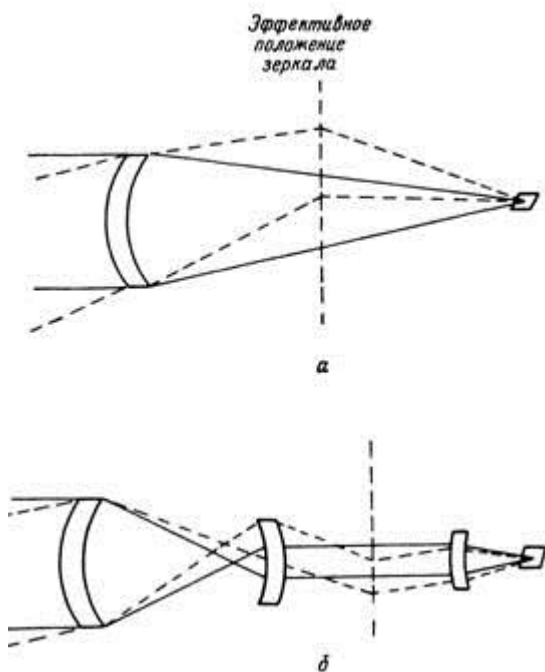


Рис. 7.35. Сдвиг пучка при сканировании. а — сканирование в сходящемся пучке; б — сканирование в параллельном пучке.

Эти изменения угла падения сходящегося пучка вызывают сигнал затемнения, изменяющийся по закону косинуса. В некоторых приемниках увеличение потерь на отражение с ростом угла падения может усугубить этот эффект.

Не зависящее от сигнала затемнение может наблюдаться во всех

тех случаях, когда конфигурация сканирующей системы и оптики такова, что излучение корпуса попадает на приемник. Этим недостатком будут обладать все системы сканирования в сходящемся пучке и системы сканирования в параллельном пучке с перемещающимся зрачком. Простой частный случай показан на рис. 7.36, где для ясности система сканирования в сходящемся пучке изображена в виде эквивалентной качающейся линзы.

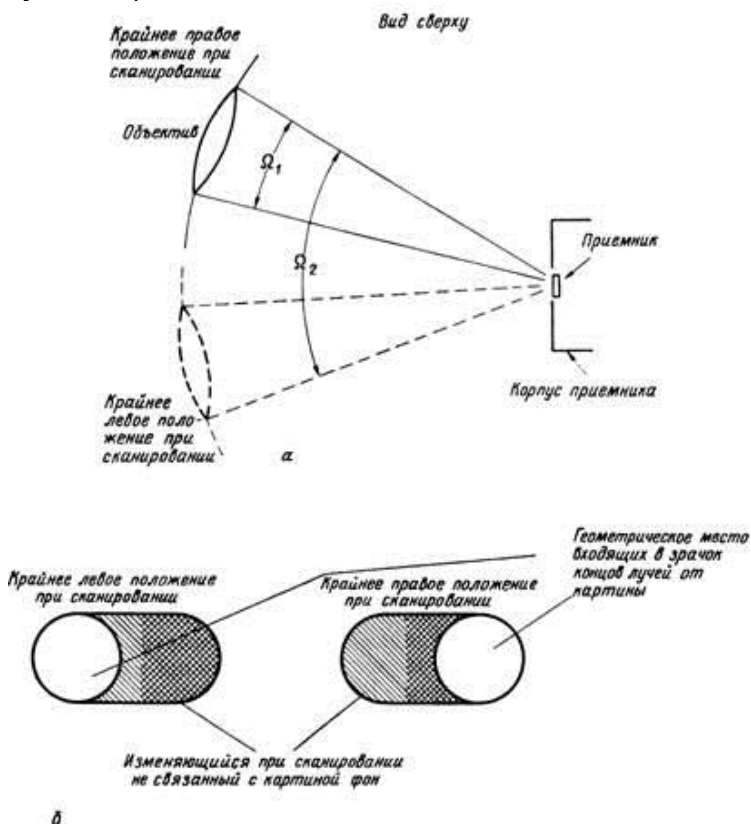


Рис. 7.36. Пример сканирования апертурой.

В любом мгновенном положении сканирующей системы приемник воспринимает излучение в пределах полного телесного угла  $\Omega_1$ , образованного лучами, идущими от линзы. Однако, чтобы правильно работать при всех положениях оптической системы, неподвижный приемник должен воспринимать

излучение в телесном угле  $\Omega_2$ . Таким образом, приемник принимает излучение не только от картины, но и от корпуса прибора. На корпус приемник не сфокусирован, однако поток излучения от корпуса, попадающий на приемник, может меняться в зависимости от положения сканирующей системы, так что в видеосигнал вносятся стационарные сигналы помех.

В случае сканирующей системы с перемещающимся зрчком линза приемника должна иметь запас по размеру, в связи с чем при изменении угла сканирования приемник будет визировать различные части корпуса, что при наличии разности их температур вызовет затемнение. Важно отметить, что устройство, сканирующее в параллельном пучке только в одном направлении, неизбежно будет иметь сдвиг пучка в направлении, в котором сканирование не происходит. Само по себе такое затемнение не вызывает больших неприятностей, если оно ограничено несколькими процентами от максимальной яркости изображения картины на индикаторе. Однако, если система FLIR должна использоваться как входное устройство автоматической системы слежения или в приборе, обеспечивающем автоматическую классификацию наблюдаемых объектов, затемнение должно быть сведено к минимуму. Если проектированием оптической системы затемнение устранить не удастся, можно прибегнуть к диафрагмированию и установке бленд в оптической части прибора и к электронной компенсации.

## **8. Типы тепловизионных систем**

### **8.1. Классификация тепловизоров и получение ими изображения**



Тепловизионные приборы предназначены для наблюдения объектов по их собственному излучению. Принцип действия приборов этого типа основан на преобразовании излучения инфракрасного (ИК) диапазона в видимый диапазон длин волн излучения. Спектральный диапазон, в котором работают тепловизоры, определяется интервалами длин волн в области максимума энергии излучения наблюдаемых объектов в соответствующих окнах прозрачности атмосферы. Обычно это интервалы длин волн от 3,5 до 5,5 мкм или от 8 до 13,5 мкм. Современные тепловизоры позволяют обнаруживать объекты, имеющие температурные контрасты до десятых и даже сотых долей градусов, формируют изображение в телевизионном или близком к телевизионному стандартам и находят, в связи с этим широкое применение в промышленности, медицине и военном деле.

Первым тепловизионным прибором, появившимся в конце 20-х

годов, был эвапорограф, принцип действия которого основан на визуализации фазового рельефа масляной пленки, образующейся на поверхности мембраны при проекции на противоположную сторону этой мембраны теплового изображения. Эвапорографы имели низкую пороговую чувствительность, большую инерционностью и давали изображение с очень малым контрастом. В 40-е годы наметились две тенденции в развитии тепловизионных приборов. К первой группе приборов относятся тепловизоры, в которых для преобразования оптического сигнала ИК-диапазона в электрический сигнал используется принцип оптико-механического сканирования (ОМС), а ко второй группе приборов – тепловизоры с электронным сканированием. В тепловизорах первого типа используются одноэлементные или многоэлементные ИК приемники излучения (ПИ) мгновенного действия, а в тепловизорах второго типа в качестве ПИ используются ИК видиконы, пириконы, а сейчас уже и матричные приемники излучения, так называемые фокальные матрицы, работающие в режиме накопления зарядов и основанные на различных физических принципах.

Большинство используемых в настоящее время тепловизионных приборов построены по первому принципу, но в связи с успехами в технологии производства матричных приемников излучения появились приборы без оптико-механического сканирования, которые не только не уступают, но даже превосходят приборы первого типа по потребительским свойствам.

На рис.8.1 представлена обобщенная функциональная схема тепловизора с фокальной ИК матрицей.

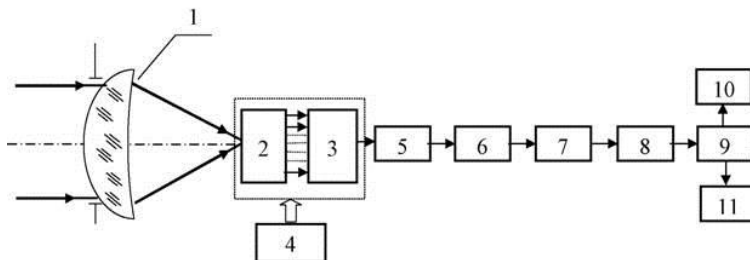


Рис.8.1 Обобщенная функциональная схема тепловизора с фокальной матрицей: 1 – оптическая система; 2 – фокальная матрица с предусилителями; 3 – мультиплексор; 4 – система охлаждения; 5 – корректор неоднородности характеристик

чувствительных элементов; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – цифровой корректор неоднородности; 8 – корректор неработающих ячеек; 9 – формирователь изображения; 10 – дисплей; 11 – цифровой выход.

Фокальные ИК матрицы могут иметь размерность 128x128, 256x256 и даже 512x512 элементов при размере этих чувствительных элементов 30x30 мкм<sup>2</sup>. Фокальные матрицы изготавливаются как функционально законченные фотоприемные устройства (ФПУ), включающие систему охлаждения, предусилители, мультиплексор, корректор неоднородности характеристик чувствительных элементов, аналого-цифровой преобразователь, блоки цифровой обработки и формирователь выходных сигналов. Сигналы с выхода такого ФПУ могут передаваться на видеоконтрольное устройство (ВКУ) телевизионного типа либо в цифровом виде в блоки цифровой обработки.

На рис.8.2 представлена обобщенная функциональная схема тепловизора с системой (ОМС).

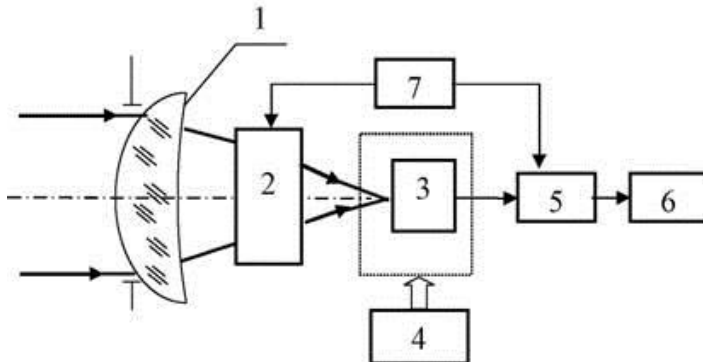


Рис. 8.2 Обобщенная функциональная схема сканирующего тепловизора: 1 – оптическая система; 2 – блок оптико-механического сканирования; 3 – приемник излучения; 4 – система охлаждения; 5 – электронный тракт; 6 – видеоконтрольное устройство; 7 – система синхронизации.

Система ОМС, в общем случае, должна обеспечивать обзор

пространства предметов – сканирование, как в направлении строк (по горизонту), так и по кадру (в вертикальном направлении), что иллюстрируется рис.8.3.

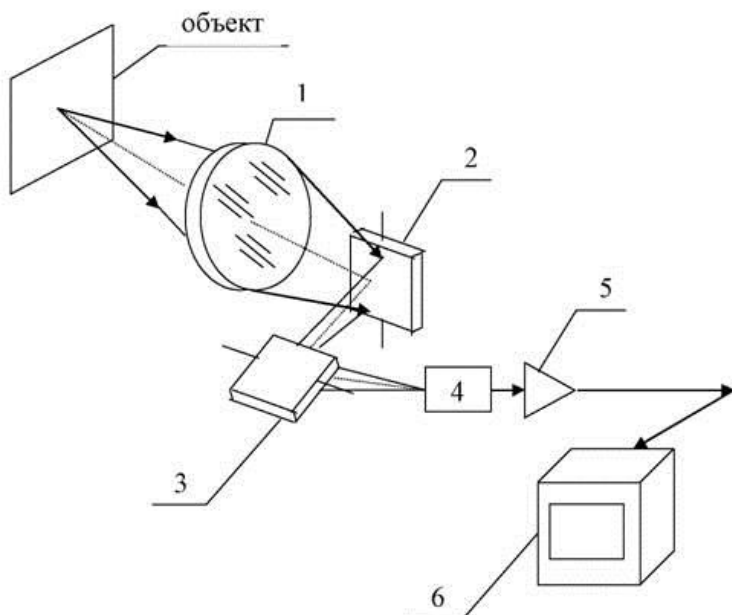


Рис. 8.3 Функциональная схема тепловизора со сканированием по строкам и кадру: 1 – объектив; 2 и 3 – сканирующие зеркала; 4 – приемник излучения; 5 – электронный тракт; 6 – видеоконтрольное устройство.

Существует множество схем сканирующих тепловизоров, различающихся методами сканирования, обработки сигналов и представления выходного изображения. Эти различия, во многом, обусловлены топологией ПИ, используемых в тех или иных приборах. В частности, в тепловизорах с системами ОМС могут использоваться одноэлементные, а также многоэлементные ПИ в виде линеек или матриц (см.рис.8.4). Кроме этого, в качестве видеоконтрольного устройства, помимо широко применяемых ТВ-мониторов, используются различного рода устройства с линейками светодиодов и оптико-механическими системами развертки.

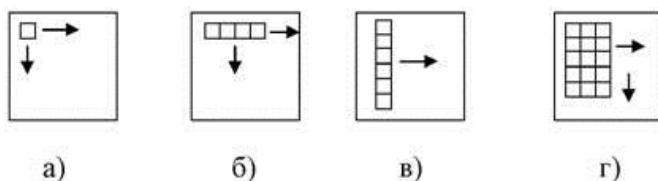


Рис. 8.4 Методы сканирования: а) – сканирование одноэлементным ПИ; б) – последовательное сканирование линейкой чувствительных элементов; в) – параллельное сканирование линейкой чувствительных элементов; г) параллельно-последовательное сканирование матричным ПИ.

Различают следующие методы сканирования пространства предметов и развертки при формировании выходного изображения: последовательное, параллельное и параллельно-последовательное. При последовательном сканировании или развертке осуществляется изменение направления визирной оси и преобразование сигнала поочередно вдоль каждой из строк изображения с последующим переходом на каждую следующую строку. Такое сканирование или развертка могут осуществляться при использовании одноэлементных ПИ или СД, а также ПИ или СД в виде линеек, элементы которых ориентированы вдоль строки. При параллельном сканировании или развертке площадки ПИ или СД, выполненные в виде линейки, ориентированы перпендикулярно направлению движения визирной оси. При параллельно-последовательном сканировании или развертке используются ПИ и СД в виде линеек или матриц, а обзор поля производится последовательно по зонам. В соответствии с наиболее целесообразными сочетаниями типов сканирования, обработки сигналов и развертки тепловизионные приборы с системами ОМС строят на основе следующих 4-х основных принципов:  
– параллельное сканирование, параллельная обработка видеосигналов и параллельная развертка (рис.8.5);



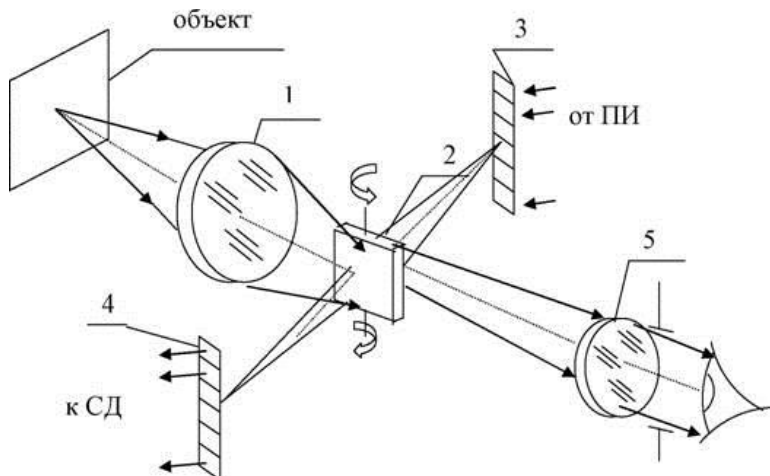


Рис. 8.5 Тепловизор с параллельным сканированием и параллельной разверткой изображения: 1 – объектив; 2 – сканирующее зеркало; 3 – линейка светодиодов; 4 – линейка ПИ; 5 – окуляр.

– параллельное сканирование, параллельная обработка сигналов с последующим их преобразованием (мультиплексированием) для вывода изображения на ТВ-монитор (рис.8.6);

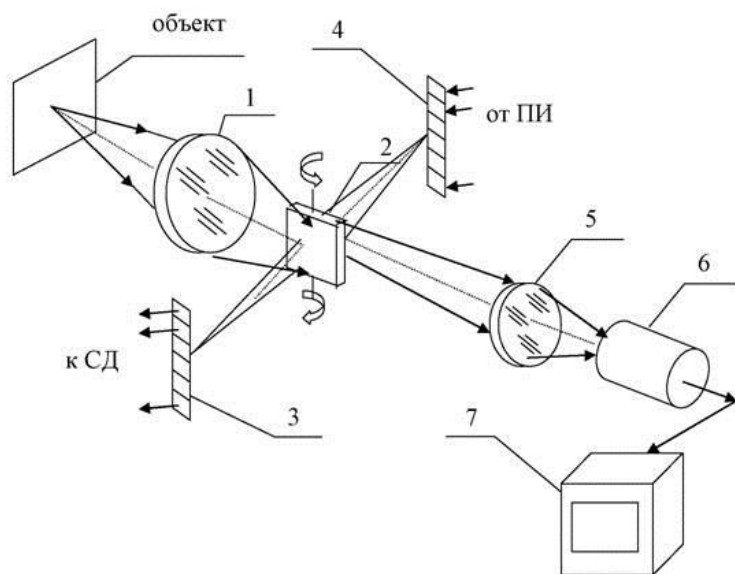


Рис. 8.6 Тепловизор с параллельным сканированием и параллельной обработкой сигналов с последующим мультиплексированием для вывода изображения на ТВ монитор: 1 – объектив; 2 – сканирующее зеркало; 3 – линейка ПИ; 4 – линейка светодиодов; 5 – проекционный объектив; 6 – передающая телевизионная трубка (матрица ПЗС); 7 – ТВ монитор.

– параллельно-последовательное сканирование и развертка с параллельной обработкой сигналов (рис.8.7);

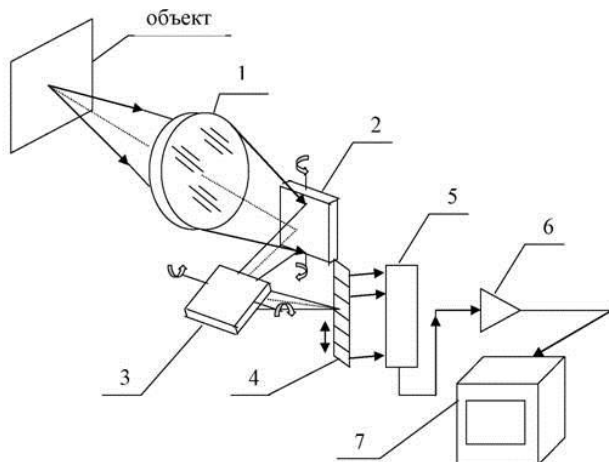


Рис. 8.7 Тепловизор с параллельно-последовательным сканированием, параллельной обработкой сигналов и параллельно-последовательной разверткой изображения: 1 – объектив; 2 – сканирующее зеркало; 3 – матрица светодиодов; 4 – матрица ПИ; 5 – окуляр.

- последовательная обработка сигналов с преобразованием сигнала для вывода на ТВ-монитор (рис.8.8).

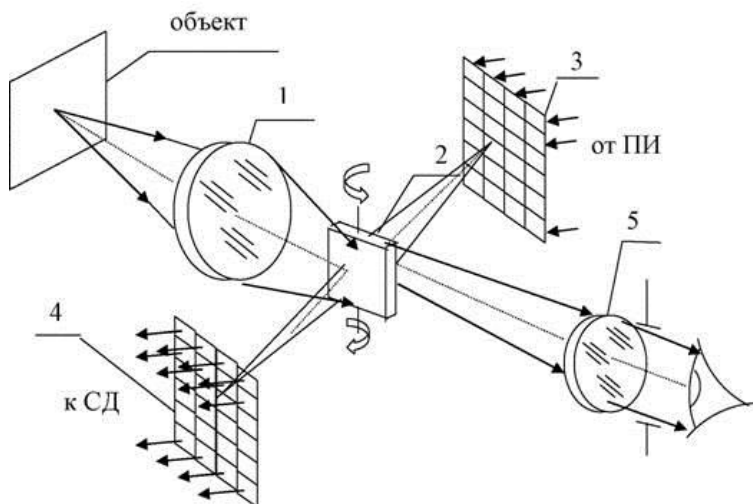


Рис. 8.8 Тепловизор с последовательным сканированием линейкой ПИ и преобразованием сигналов для вывода изображения на ТВ монитор: 1 – объектив; 2 и 3 – сканирующие зеркала; 4 – линейка ПИ; 5 – линии задержки с сумматором; 6 – видеоусилитель; 7 – ТВ монитор.

При увеличении числа чувствительных элементов приемника для каждого элемента требуется как минимум свой предусилитель, так что повышение чувствительности сопровождается увеличением сложности системы. Чтобы не слишком усложнить систему, можно применить метод последовательной обработки сигнала или коммутирование каналов, причем в обоих случаях дг-канальное устройство сводится к системе с одним видеоканалом.

Обычные системы тепловидения отличаются друг от друга по двум принципиальным признакам: способу разложения картины и способу обработки предварительно усиленных сигналов приемника излучения для получения изображения. Отличия в оптике, сканирующих устройствах, системах охлаждения и индикаторах не имеют фундаментального значения, если указанные части системы отвечают минимуму предъявляемых требований. Например, выбор системы охлаждения, работающей по циклу Стирлинга или циклу Виллюмье, может повлиять на стоимость, вес или надежность систем тепловидения в целом, но не дает оснований относить их к системам разного класса. Изменения

же в типе сканирования или обработки сигнала, как мы увидим ниже, могут радикально изменить функционирование системы.

## 8.2. Последовательное и параллельное разложение картины

В дополнение к разделению сканирующих устройств на устройства со сканированием в параллельном и сходящемся пучках и на устройства с одномерным и двумерным сканированием можно разделить их на устройства с параллельным и последовательным разложением картины и соответствующей обработкой сигнала приемника. Различие между этими двумя типами сканирования показано на рис. 8.9.

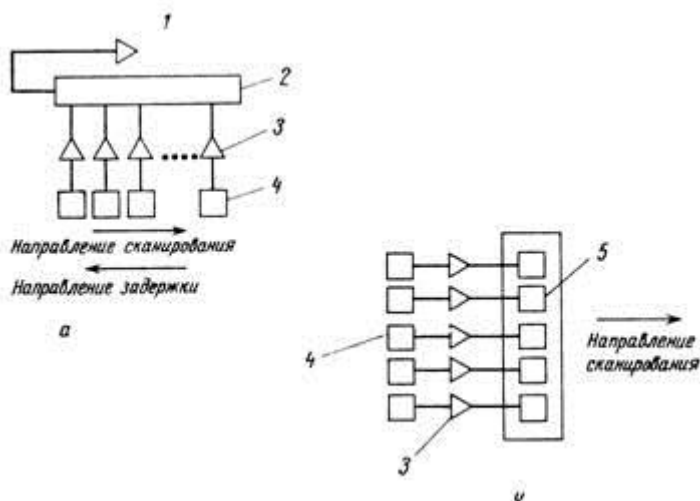


Рис. 8.9. Последовательное (а) и параллельное (б) сканирование. 1 — усилитель; 2 — линия задержки; 3 — предусилители; 4 — чувствительные элементы приемника излучения; 5 — светодиоды.

При параллельном разложении картины чувствительные элементы

приемника ориентированы перпендикулярно линии сканирования, как, например, в линейке чувствительных элементов приемника, используемых в системах с азимутальным сканированием. Выходные сигналы всех чувствительных элементов усиливаются, обрабатываются и подаются на индикатор одновременно, т. е. параллельно. При последовательном разложении картины линейка чувствительных элементов ориентирована параллельно линии сканирования и каждая точка изображения сканируется всеми чувствительными элементами. Выходные сигналы элементов поступают в линию задержки и суммируются на выходе, при этом можно использовать сумму как единый сигнал (как это делается при использовании одноэлементного приемника), а можно направлять сигналы друг за другом на аналогичную линейку сканирующих индикаторных элементов.

Один тип сканирования может оказаться более выгодным, чем другой, в зависимости от таких факторов, как допустимые габаритные размеры приемного устройства, потребление мощности и соотношение эффективности характеристик системы и ее стоимости. Основное преимущество параллельной обработки сигнала заключается в том, что можно создать весьма компактные приемные устройства узкого назначения, используя сканирование в сходящемся пучке как для приемных, так и для индикаторных элементов с помощью одного зеркала. Это преимущество может быть утрачено при использовании системы общего назначения со сканированием в параллельном пучке. Основной недостаток параллельной обработки сигналов заключается в том, что разброс по обнаружительной способности  $D^*$  и чувствительности элементов приемника в линейке приводит к неравномерности изображения. Кроме того, прохождение по переменной составляющей паразитных сигналов, обусловленных различными значениями средней яркости участков картины, и их попадание на разные чувствительные элементы приемника излучения также вызывают неравномерность изображения. Основные преимущества последовательного сканирования заключаются в том, что упомянутые выше неравномерности устраняются, поскольку разложение картины осуществляется на самом деле как бы одним чувствительным элементом и требуемое число чувствительных элементов диктуется не числом линий сканирования, как в системах с параллельным сканированием, а

требуемой чувствительностью системы. Основной недостаток последовательного сканирования заключается в том, что приходится использовать сканирование в параллельном пучке, в результате чего оптическая система получается более сложной и громоздкой. Вид выражения для отношения сигнала к шуму системы FLIR с последовательным сканированием довольно трудно себе представить. Приводимый ниже вывод выражений для эффективной обнаружительной способности  $D^*$  и отношения сигнала к шуму такой системы показывает, как в этом случае улучшаются характеристики, несмотря на неравномерность обнаружительной способности  $D^*$  и чувствительности. Интегрирующая линия задержки (рис. 8.10) линейно суммирует сигналы чувствительных элементов приемника и извлекает корень квадратный из суммы квадратичных значений шумов.

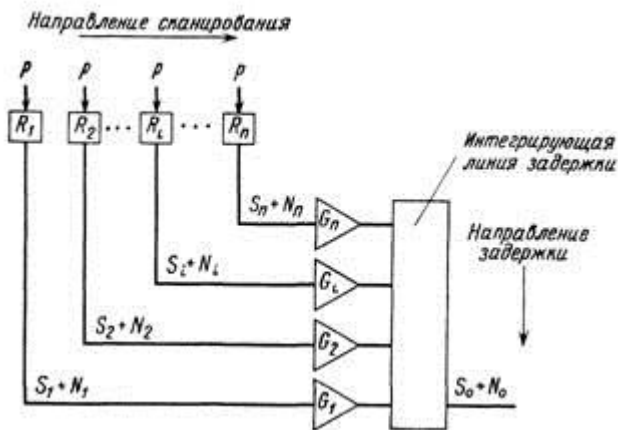


Рис. 8.10. Применение интегрирующей линии задержки при последовательном сканировании.

Эффективная обнаружительная способность  $D^*$  и эффективное отношение сигнала к шуму «эквивалентного» одноэлементного приемника определяются комбинациями характеристик отдельных чувствительных элементов. Характеристики могут быть оптимизированы соответствующим выбором коэффициентов усиления каналов, ведущих в линию задержки.

### **8.3. Сравнение характеристик систем FLIR с параллельным и последовательным сканированием**

Последовательное сканирование имеет преимущество над параллельным для большинства применений систем FLIR. Явное предпочтение, отдаваемое в этом разделе системам с последовательным сканированием, должно рассматриваться прежде всего как выражение этой точки зрения автора. Приведенные здесь утверждения основаны на современном состоянии технологии и прогнозируемых перспективах ее развития, однако они вполне могут оказаться опровергнутыми при радикальном усовершенствовании технологии изготовления приемников излучения. С учетом преимуществ последовательного сканирования можно сделать следующие утверждения:

1. Данный уровень объективных характеристик системы с последовательным сканированием может быть достигнут с числом чувствительных элементов приемника, составляющим не более этого числа в системе с параллельным сканированием.
2. Если системы с параллельным и последовательным сканированием имеют одинаковые объективные характеристики, то система с последовательным сканированием обеспечит лучшее по субъективной оценке качество изображения.

Эти утверждения основаны главным образом на практике использования систем FLIR с последовательным и параллельным сканированием с одинаковыми объективными характеристиками, а также подкрепляются следующими техническими аргументами. Рассмотрим две системы FLIR с последовательным и параллельным сканированием, имеющие следующие одинаковые параметры:

1. диаметр входного зрачка и оптическое пропускание;
2. поле зрения;



3. угловой размер чувствительного элемента приемника;
4. частоту кадров;
5. число активных строк на высоту картины;
6. спектральный диапазон работы;
7. зависимость и чувствительности от длины волны и электрической частоты.

Напомним, как указывалось в гл. 5, что эффективная тепловая чувствительность системы улучшается при уменьшении

отношения  $\Delta T_{\text{пор}}/\sqrt{\dot{V} \dot{F}}$ . Необходимое для сравнения уравнение, определяющее  $\Delta T_{\text{пор}}$ , имеет вид

$$\Delta T_{\text{пор}} = \frac{\pi \sqrt{ab\Delta f_R} \sqrt{\dot{n}}}{\alpha\beta A_0 \tau_0 D^*(\lambda_p) (\Delta W/\Delta T)}, \quad (8.18)$$

где  $n$  — число чувствительных элементов приемника излучения.

Если сравнить две системы по отношению  $\Delta T_{\text{пор}}/\sqrt{\dot{V} \dot{F}}$  при условии, что семь указанных выше параметров одинаковы, то сравнение можно свести к рассмотрению показателя качества  $Q$ , определяемого уравнением

$$Q = \frac{1}{D^*(\lambda_p)} \sqrt{\Delta f_R} \sqrt{\dot{n}}. \quad (8.19)$$

Эталонная эквивалентная шумовая полоса  $A/n$  зависит от времени элемента разложения и шумовых характеристик системы приемник — предусилитель. Обнаружительная способность  $D^*$  (кр) зависит от напряжения питания приемника, режима его работы (ОФ или какой-либо другой) эффективности применения охлаждаемых диафрагм и, наконец, экономических соображений при изготовлении приемников.

Наиболее употребительные приемники излучения имели значительную составляющую шумов со спектром вида  $1//$  в полосе частот, характерной для работы систем с параллельным сканированием. В то же время в полосе частот, типичной для систем с последовательным сканированием, вклад шумов  $1//$  незначителен. Обеспечить функционирование чувствительных элементов приемника в режиме ОФ при числе элементов 200 гораздо труднее, чем в линейке с числом элементов 20. Формы охлаждаемых диафрагм на практике делают простыми; обычно это обыкновенные щели, а не набор отверстий. При параллельном сканировании щель длиннее и такая диафрагма менее эффективна,

чем более короткая щель при последовательном сканировании. В системе с параллельным сканированием, содержащей 200-элементный приемник излучения, для обеспечения стыковки приемника с устройством для охлаждения небольшой мощности приемник должен работать при низком напряжении питания, чтобы уменьшить приток тепла. Таким образом, утрачивается возможность выбора напряжения питания с учетом условий оптимизации обнаружительной способности  $D^*$  (кР).

Перечисленные четыре фактора дают преимущества системе с последовательным сканированием, что позволяет обеспечить в такой системе с числом чувствительных элементов  $n = 20$  такой же показатель качества  $Q$ , что и в системе с параллельным сканированием с числом чувствительных элементов приемника  $n = 200$ .

Второй аргумент в пользу последовательного сканирования — более высокое, субъективно воспринимаемое качество изображения, что связано главным образом с трудностью изготовления многоэлементных линеек для параллельного сканирования с одинаковыми элементами по обнаружительной способности и чувствительности. Если в системе с параллельным сканированием не предусмотрена в той или иной форме автоматическая регулировка чувствительности, неоднородность элементов по чувствительности приведет к большой паразитной разности сигналов от строки к строке из-за неодинакового восприятия однородного теплоизлучающего фона. С другой стороны, при использовании автоматической регулировки увеличивается разница в шумах чувствительных элементов приемника. Обе эти проблемы не возникают в системах с последовательным сканированием, поскольку в них неоднородности элементов по обнаружительной способности и чувствительности сглаживаются таким образом, что сохраняется максимально возможное отношение сигнала к шуму.

## 8.4. Эвапорографы

Первые тепловизионные системы, в которых использовался принцип эвапорографии, были описаны Черни, Черни и Молле, Робинсоном и др., Мак-Даниэлем и Робинсоном, Овребо и др. Несмотря на различие конструкций, основной принцип построения всех эвапорографов одинаков: **тонкая мембрана помещена в камеру с перенасыщенными парами масла, причем вся система находится в тепловом равновесии.** В состоянии равновесия скорость испарения паров масла с поверхности мембраны и скорость их конденсации на этой поверхности равны. Однако, если с помощью оптической системы создать на мембране изображение тепловой картины, равновесие нарушится. Если мембрана и пленка масла на ней достаточно тонкие, то при освещении пленки белым светом будут наблюдаться интерференционные цвета. Эта картина, обусловленная различной степенью испарения летучей жидкости с поверхности мембраны, будет соответствовать поглощению теплового излучения мембраной.

В начале 50-х годов XX в. Фоши с сотрудниками предложили использовать свойства тонкой пленки в эвапорографе для получения теплового изображения другим путем. Они наносили жидкую пленку с малой вязкостью на тыльную сторону тонкой зачерненной мембраны, как в эвапорографе, но теперь пленка освещалась и рассматривалась через оптическую шпирен-систему. При этом становились видимыми деформации поверхности, вызванные изменениями поверхностного натяжения из-за локального нагревания пленки. С помощью этого прибора не удалось получить удовлетворительного изображения из-за слишком большого размытия последнего, обусловленного тепловой проводимостью пленки. В так называемом паниконе фирмы «Гретаг» эта проблема решена путем нагревания пленки только в дискретных точках двумерной картины, для чего используется маска в виде сетки, изолирующая малые участки пленки.

Все упомянутые приборы обладают недостатками, связанными с тем, что это тепловые приемники, т. е. образование изображения зависит от создаваемой излучением разности температур на чувствительной поверхности. При использовании чувствительных к

теплу поверхностей возникает ряд серьезных проблем:

1. Необходимость обеспечения высокой тепловой чувствительности поверхности делает ее весьма восприимчивой к излучению корпуса прибора и требует изоляции поверхности от всех тепловых источников, кроме рассматриваемой картины.
2. При воспроизведении изображения движущихся объектов требуется малая постоянная времени, для чего необходима быстрая передача тепла по поверхности. Последнее требование несовместимо с требованием ограничения рассеяния изображения для обеспечения высокого разрешения.
3. Контрасты обычно получаются низкими, поскольку не существует простых способов вычитания фона.
4. На относительно большой чувствительной поверхности трудно обеспечить равномерную чувствительность, и поэтому часто появляется паразитная модуляция.
5. Инфракрасные полупроводниковые видеоконны

Более совершенные телевизионные передающие трубки вытеснили механические сканирующие системы в телевидении. Это воодушевило многих исследователей попытаться сделать нечто подобное с системами FLIR. Самая трудная проблема связана с тем, что высокие уровни потоков излучения от фона в далекой инфракрасной области спектра в наземных условиях приводят к насыщению генерирующих заряды чувствительных поверхностей и обеднению электронами считывающих пучков, и в результате требуется вычитание фона. Это означает, что большинство схем с видеоконнами сможет успешно работать только на холодных фонах, например на фоне космоса. Другая серьезная проблема состоит в том, что видеоконны, линейно преобразующие поток теплового излучения или поток квантов в электрические сигналы, должны обладать очень высокой однородностью чувствительности, чтобы избежать паразитной модуляции. Разработаны четыре типа инфракрасных полупроводниковых видеоконнов. Сообщение об одной из ранних разработок Редингтона и ван Гердена появилось в 1959 г. Упомянутые авторы исследовали мишени из фотопроводящих материалов (кремния и германия с примесями), работающих при низких температурах. Мишени из кремния, легированного золотом, дали наилучшие результаты,

однако спектральная чувствительность ограничивалась длиной волны  $\sim 2$  мкм, и достаточно высокой чувствительности получить не удалось. В 1962 г. Хейман и Кунце сообщили о резистроне — инфракрасном видиконе с граничной длиной волны спектральной характеристики 2 мкм. В резистроне использовалась мишень из сульфида свинца. Для получения удовлетворительного изображения требовался дополнительный осветитель мощностью 1,5 кВт. Берт и Бриссо в 1969 г. описали две телевизионные трубки со спектральной чувствительностью, ограниченной длиной волны 2 мкм. В первой использовалась фотопроводящая мишень из PbS — РЬО, а во второй — мозаика из германиевых фотодиодов. Обе трубки надо было охлаждать, а для получения удовлетворительного изображения требовалось дополнительное освещение рассматриваемой картины. В 1971 г. Ким и Даверн продемонстрировали возможности использования одномерной и двумерной мозаик из фотодиодов на основе арсенида индия со спектральной чувствительностью от 2,5 до 3,4 мкм. Диммок сделал обзор большинства упомянутых работ и провел сравнительный анализ некоторых гипотетических телевизионных трубок и обычных систем FLIR для разных уровней потока излучения от фона. Он рассмотрел как видиконы с мозаиками в виде линеек и механическим сканированием, так и видиконы с двумерными мишенями и сделал следующие теоретические выводы:

1. Видикон с одномерной мозаикой-линейкой будет удовлетворительно работать на земных фонах как в диапазоне 3—5 мкм, так и в диапазоне 8—14 мкм.
2. Видиконы с двумерной мозаикой или с непрерывной чувствительной поверхностью и с неравномерностью чувствительности не более 0,04% будут хорошо работать па земных фонах в диапазоне 3—5 мкм, а в диапазоне 8 — 14 мкм работать не смогут.
3. На холодных космических фонах видиконы с двумерной мишенью будут работать лучше, чем видиконы с одномерной линейкой чувствительных элементов и обычные сканирующие системы.

Диммок предложил вычитать фон, используя расфокусированный электронный пучок для равномерного снятия заряда с мишени или применяя фотопроводящие мишени, являющиеся одновременно

фотоэмиттерами.

## **8.5. Пироэлектрические видиконы**

Пироэлектрические материалы обладают свойством изменять свою электрическую поляризацию при изменении температуры. Томпсет описал использование пироэлектрических свойств триглицинсульфата (ТГС) для создания инфракрасного видикона. В предложенной им схеме монокристалл ТГС электрически поляризуется под действием приложенного постоянного электрического поля. Лицевая поверхность кристалла покрывается тонким проводящим слоем, потенциал которого поддерживается постоянным. Падающее тепловое излучение вызывает изменение поляризации, в результате чего возникает соответствующим образом распределенная разность потенциалов между проводящей поверхностью и тыльной непроводящей поверхностью. Тыльная поверхность сканируется электронным лучом, электроны вносят заряд, нейтрализующий разность потенциалов. Ток луча в функции положения луча является аналогом тепловой картины. Поскольку пироэлектрический видикон — тепловой прибор, перед каждым новым кадром должна быть восстановлена однородная температура чувствительного слоя, чтобы устранить смазывание изображения. В пироэлектрическом видиконе Томпсета для этой цели используется механическая заслонка, обеспечивающая восстановление исходной температуры кристалла ТГС в промежутке между кадрами. По заключению Томпсета можно получить разрешающую способность  $10^4$  элемент/см<sup>2</sup> и тепловую чувствительность  $\sim 1^\circ \text{C}$  при частоте кадров  $\sim 10$  Гц.

### **8.5.1. Электронно-оптические преобразователи**

Было предпринято несколько попыток разработать чувствительные в инфракрасной области спектра трубки по образу электронно-оптических преобразователей изображения, отличающихся простотой в работе. Гарбуни и др. описали трубку, названную фототермическим преобразователем изображения (термикомом). В этом тепловом приборе бегущий световой луч используется для возбуждения фотоэлектронной эмиссии с тонкого фотокатода, расположенного в фокальной плоскости инфракрасного объектива. Термикон работал с телевизионной кадровой частотой и имел

хорошую разрешающую способность, но минимально обнаруживаемая разность температур для больших объектов составляла лишь  $\sim 10^\circ \text{C}$ .

Офан и др. рассмотрели трубку, названную «сервал» и представляющую собой тепловой преобразователь изображения, в котором используется возбуждаемая ультрафиолетовым излучением фотоэлектронная эмиссия с фотопроводящего катода для получения видимого изображения на флуоресцирующем экране. Ульмер описал тепловой прибор, в котором изменения температуры тонкой масляной пленки вызывают изменения отражательной способности, которые обнаруживаются при освещении. Шуассер и Высочанский разработали тепловой преобразователь изображения — трубку под названием «болокон». В этом приборе фотоэлектронная эмиссия с фотокатода, нанесенного на тонкое полупроводящее стекло, возбуждается ультрафиолетовым излучением. Мортон и Форге описали фотопроводящий чувствительный слой из сульфида свинца, используемый в преобразователях изображения.

### **8.5.2. Лазерный параметрический преобразователь изображения с повышением частоты**

Преобразование с повышением частоты представляет собой метод, в котором инфракрасное излучение смешивается с когерентным излучением гетеродина в оптически нелинейном материале. В результате получается видимый свет, пространственно промодулированный так же, как инфракрасное излучение. Электромагнитная теория преобразования с повышением частоты описана Яривом и здесь не приводится. Лазерное параметрическое преобразование с повышением частоты возможно только в таких оптических кристаллах, которые не обладают симметрией инверсии, так что электрическая восприимчивость кристалла нелинейна. В этом случае электрическое поле внутри кристалла вызывает электрическую поляризацию, пропорциональную квадрату напряженности поля. Падающая волна с частотой  $\omega_0$  при наличии частоты накачки  $\omega_p$  преобразуется в волну видимого света с частотой  $\omega$ , равной

$$\omega = \omega_{IR} + \omega_p.$$

(8.45)

Такое преобразование в кристалле осуществляется только при выполнении целого ряда требований.

Первое, наиболее важное требование заключается в том, чтобы волновые векторы были согласованы по эффективной длине взаимодействия в кристалле и обеспечивалось сохранение количества движения

$$\mathbf{K}_V = \mathbf{K}_{IR} + \mathbf{K}_P.$$

(8.46)

Поскольку показатели преломления для инфракрасного излучения и излучения накачки различны, это условие может выполняться только в случае, когда кристалл двоякопреломляющий, т. е. показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей различны. В зависимости от отношения этих показателей можно поляризовать излучение накачки в направлении обыкновенного или необыкновенного лучей, так что оно оказывается согласованным по фазе с компонентой инфракрасного излучения, поляризованного в другом направлении.

Второе требование заключается в том, чтобы кристалл был прозрачен для всех трех длин волн и обеспечивал тем самым высокую эффективность преобразования. В соответствии с третьим требованием необходим подходящий усилитель яркости создаваемого изображения, не вносящий дополнительных шумов. Поток фотонов видимого излучения не может быть больше потока фотонов падающего инфракрасного излучения, и эффективность преобразования в действительности невелика, а полученный видимый свет слабый. Четвертое требование заключается в том, что должен использоваться подходящий фильтр, который мог бы отделить слабый пучок видимого света от мощного излучения накачки. Выбор фильтра осложняется тем, что по длинам волн эти излучения отличаются только на доли микрометра:

$$\lambda_p - \lambda_V = \frac{\lambda_p^2}{\lambda_p + \lambda_{IR}}. \quad (8.47)$$

Ярив вывел выражение для эффективности преобразования с повышением частоты по мощности  $P_V/P_{IR}$ , пренебрегая потерями на отражение и поглощение в кристалле:

$$\frac{P_V}{P_{IR}} \approx \frac{\omega_V^2 l^2 d^2}{2n_{IR} n_p n_V} \left( \frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{3/2} \frac{P_P}{A}, \quad (8.48)$$

где  $\omega_V$  — частота видимого света,  $l$  — эффективная длина взаимодействия,  $n$  — показатель преломления,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость в вакууме,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость в



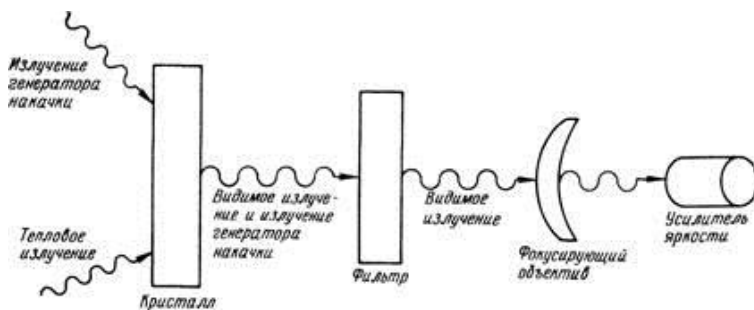
вакууме,  $P_p$  — мощность накачки,  $A$  — эффективное сечение взаимодействия и  $d$  — коэффициент оптической нелинейности, определяемый по Яриву. Очевидно, что эффективность возрастает с увеличением плотности мощности накачки и эффективной длины взаимодействия в кристалле.

При применении метода преобразования с повышением частоты для получения теплового изображения в широкой полосе возникает множество проблем. Самая трудная связана с тем, что угловое увеличение при таком преобразовании зависит от длины волны и определяется выражением

$$M = \left( \frac{n_{IR}}{\lambda_{IR}} \right) / \left( \frac{n_V}{\lambda_V} \right). \quad (8.49)$$

Если выбрать материал, обеспечивающий постоянство этого отношения для всех представляющих интерес значений XRI (т. е. произвести согласование по дисперсии), то компоненты изображения на всех длинах волн сфокусируются в одном месте. В противном случае для каждой длины волны будет свое угловое увеличение, что эквивалентно наличию поперечной хроматической aberrации. Однако, если провести согласование по дисперсии, на величину поля зрения наложатся ограничения, связанные с условием согласования по фазе.

Наиболее подходящим материалом для преобразования излучения в окрестности длины волны 10 мкм в видимый свет является прустит  $Ag_3AsS_3$ . Основные элементы системы преобразования с повышением частоты показаны на рис. 8.11.



Фиг. 8.11. Принципиальная схема параметрического преобразователя изображения с повышением частоты.

Сторонники метода параметрического преобразования изображения с повышением частоты указывают на следующие его преимущества по сравнению с обычными методами сканирования:

1. Пространственно-непрерывное (без выборки) изображение.
2. Отсутствие системы охлаждения.
3. Потенциальная возможность получать изображение без дополнительных шумов.
4. Потенциальная возможность обойтись без инфракрасной оптической системы.
5. Отсутствие механических движущихся частей, обеспечивающее простоту устройства.

Однако основным недостатком метода является, по-видимому, потребность в очень высокой мощности накачки. Например, согласно оценке Уорнера, для получения тепловой чувствительности  $\sim 1^\circ\text{C}$  в преобразователе с повышением частоты с числом элементов в изображении  $100 \times 100$  требуется источник накачки, произведение мощности которого на постоянную времени приемника видимого света равно 1000 Вт-с. Ясно, что это довольно плохие характеристики системы при столь большом расходе мощности.

По результатам анализа, проведенного Мильтоном с учетом как практических, так и теоретических ограничений, конкурентоспособность систем преобразования с повышением частоты с обычными системами FLIR маловероятна по следующим причинам:

1. Слишком низка квантовая эффективность обнаружения.
2. Слишком высока требуемая мощность накачки.
3. Слишком жестки присущие методу ограничения поля зрения.
4. Требуется специальное устройство для вычитания потока от фона.
5. Существуют присущие данному методу ограничения в разрешающей способности.

Мильтон также сделал вывод, что метод параметрического преобразования с повышением частоты больше подходит для лазерной инфракрасной локации и для активных средств получения

изображения с импульсной лазерной подсветкой.

## **8.6. Инфракрасные квантовые счетчики**

Инфракрасные квантовые счетчики (ИККС) являются преобразователями инфракрасного излучения в видимое, в которых используется обмен энергии излучения с энергией электронных уровней для получения твердотельного преобразователя изображения. Принцип действия ИККС был предложен в 1959 г. Бломбергенем и подробно проанализирован Эстеровицем и др.. Он основан на предположении, что в примесных редкоземельных соединениях структура ионных энергетических уровней такова, что существуют переходы, соответствующие как видимому, так и инфракрасному излучению, и заключается в том, что ион, возбужденный в результате поглощения фотона инфракрасного излучения, может быть переведен с помощью лазерного гетеродина еще на более высокий энергетический уровень, с которого спонтанно излучается видимый свет. Простейшая модель трехуровневого ИККС показана на рис. 8.12.

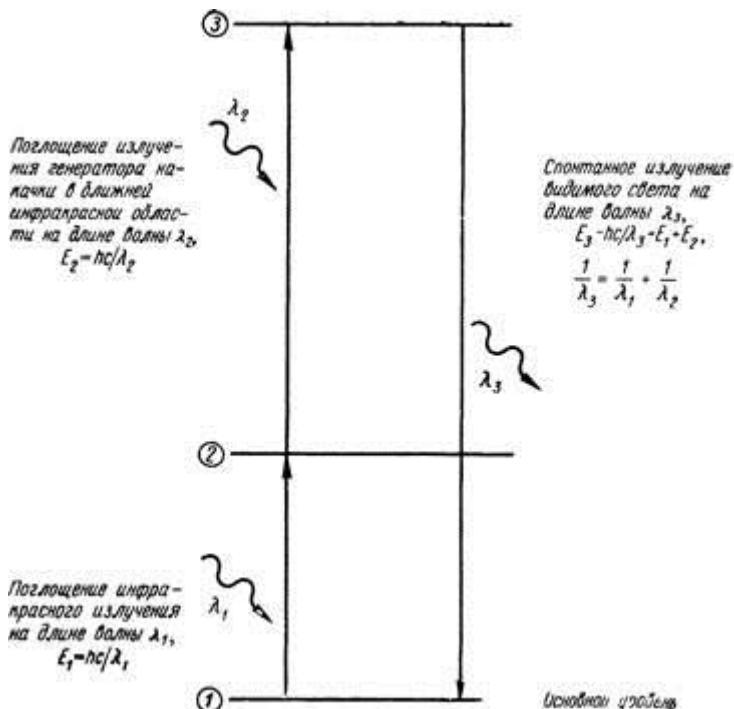


Рис. 8.12. Простейшая модель трехуровневого инфракрасного квантового счетчика.

Трехуровневый ИККС непригоден для практического использования по причинам, изложенным Эстеровицем и др.. На практике используется пятиуровневая схема, показанная на рис. 8.13.

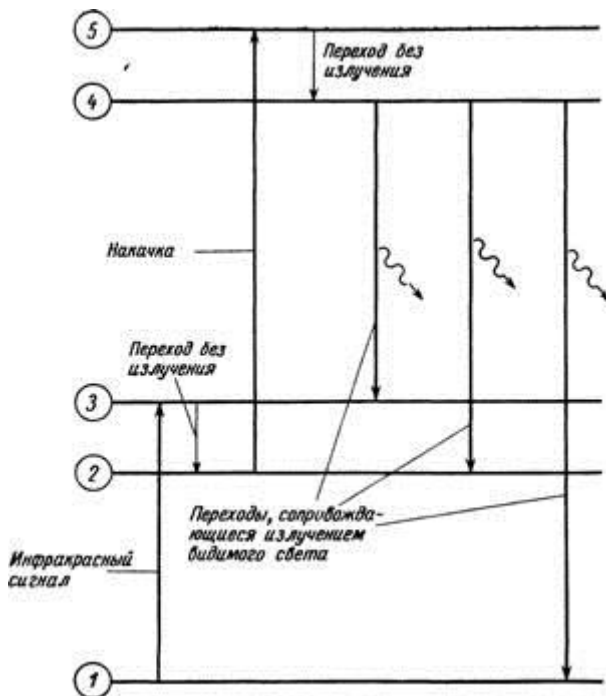


Рис. 8.13. Пятиуровневый инфракрасный квантовым счетчик.

Наиболее подходящий материал для демонстрации действия ИККС — трихлорид лантана  $\text{LaCl}_3$ , активированный празеодимом  $\text{Pr}^{3+}$ . В этом соединении имеется достаточное число переходов, чтобы обеспечить чувствительность в широкой полосе от 3 до 5 мкм.

Квантовая эффективность и выходной световой поток ИККС столь низки, что для достижения приемлемой яркости изображения необходимо применение усилителя яркости изображения или другого аналогичного прибора. Достаточно эффективный ИККС будет весьма сложным прибором даже по сравнению с приборами с механической разверткой. Для подавления маскирующих изображение сигналов помехи от переходов, обусловленных температурой кристалла, кристалл необходимо охлаждать. Для достижения эффективного преобразования инфракрасного излучения в видимое нужно

использовать накачку относительно большой мощности, к тому же в такой спектральной области, где лазеры неэффективны. Наконец, ИККС является прибором с линейным преобразованием числа фотонов по постоянной составляющей, поэтому для улучшения контраста изображения требуется специальное устройство для вычитания фона. Источниками шумов теоретически идеального ИККС являются квантовые шумы инфракрасного сигнала, автоэмиссионный шум перехода, шум накачки и шум усилителя яркости. Ограничения из-за неоднородностей чувствительности по поверхности кристалла пока не определялись.

## 9. Выборка

### 9.1. Введение

В системах изображения выборка оказывает столь же большое влияние на качество изображения, как оптическая передаточная функция и тепловая чувствительность. Примерами процессов выборки являются использование линеек дискретных чувствительных элементов приемников излучения для разложения изображения, электронная коммутация или широтно-импульсная модуляция, преобразование информации при сканировании и относительное перемещение между наблюдаемой картиной и приемным устройством, работающим с по кадровым разложением.

К важнейшим свойствам высококачественных процессов получения изображения относятся пространственная инвариантность импульсной реакции и линейность передачи сигнала. Если система FLIR не обладает этими свойствами, то возможно искажение изображения. Пространственная и временная выборки осуществляются в том случае, когда в системе имеются дискретные отклонения от инвариантности, а выборка по амплитуде — при дискретных отклонениях от линейности. В системах изображения особое значение имеют **два типа выборок**. Первый тип соответствует периодическому восприятию информации через определенные промежутки. Второй тип представляет выборку средней величины в пределах каждого промежутка в периодическом наборе промежутков. Далее эти два типа выборок будут кратко именоваться соответственно **выборкой через «окна»** и **«усредняющей» выборкой**.



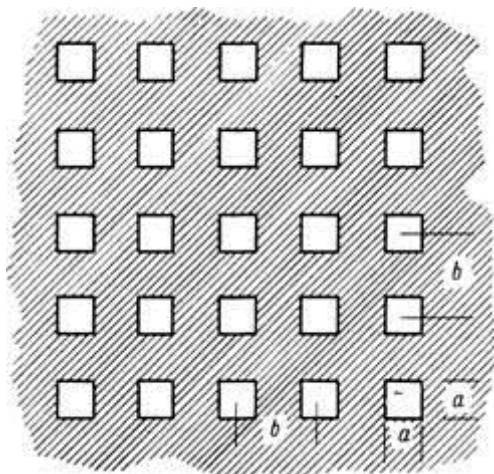


Рис. 9.1. Периодическая структура с чередованием прозрачных и непрозрачных участков.

Структура, показанная на рис. 9.1, может быть использована для получения обоих типов выборок. Если изображение, сформированное системой, определяется распределением яркости объекта, рассматриваемого через эту структуру, то последняя действует как пропускающий фильтр, и мы имеем выборку через окна. Если изображение состоит из выборочной совокупности (возможно, пространственно отфильтрованной) средних значений яркости объекта в пределах каждого окна структуры, то процесс представляет собой усредняющую выборку. Выборка через окна осуществляется при электронной коммутации и при взаимном перемещении объекта и приемного устройства, работающего с покадровой разверткой. Усредняющая выборка имеет место в полутоновой фотографии, а также в перпендикулярном к линии сканирования направлении в системах с дискретным разложением картины, например в телевидении, лазерных сканирующих устройствах, сканирующих преобразователях. Большинство проблем, связанных с выборкой, довольно трудно решить обычными методами, однако решение существенно упрощается, если использовать сокращенные обозначения операций фурье-анализа. Покажем это на следующем примере с выборкой

через окна. Рассмотрим объект, характеризуемый функцией распределения яркости  $O(x, y)$ , который перекрыт периодической структурой, характеризуемой функцией пропускания  $W(x, y)$ . Получаемое распределение яркости изображения  $f(x, y)$  равно произведению этих двух функций

$$I(x, y) = O(x, y) W(x, y), \quad (9.1)$$

и преобразование Фурье спектра изображения имеет вид

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \tilde{O}(f_x, f_y) \cdot \tilde{W}(f_x, f_y). \quad (9.2)$$

Если, как на рис. 9.1,

$$W(x, y) = \left[ \text{Rect} \left( \frac{x}{a} \right) \text{Rect} \left( \frac{y}{a} \right) \right] \cdot \left[ \text{Comb} \left( \frac{x}{b} \right) \text{Comb} \left( \frac{y}{b} \right) \right], \quad (9.3)$$

то

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \tilde{O}(f_x, f_y) \cdot [\text{Sinc}(af_x) \text{Sinc}(af_y)] \times \\ \times [\text{Comb}(bf_x) \text{Comb}(bf_y)]. \quad (9.4)$$

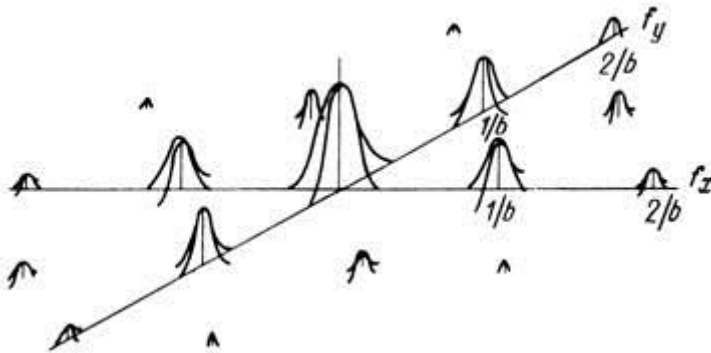


Рис. 9.2. Спектр изображения объекта, рассматриваемого через периодическую структуру, показанную на рис. 9.1.

Этот спектр показан на рис. 9.2, однако мы не пытались изобразить на рисунке фазовый сдвиг. Влияние выборки проявляется в возникновении боковых частотных полос с центрами в  $\pm 1/b$  и  $\pm 2/b$ ,

которые содержат частоты, называемые псевдочастотами (aliases), поскольку последние отсутствуют в исходном спектре объекта. Псевдочастоты представляют собой просто смещенные в частотной области в процессе выборки пространственные частоты объекта. Боковые полосы показаны на рис. 9.2 разделенными, но на самом деле, поскольку всегда  $b > a$ , они перекрываются. В результате псевдочастоты интерферируют с частотами объекта, и в худшем случае псевдочастоты по оси  $x$  воспринимаются как частоты по оси  $y$  и наоборот.

Усредняющую выборку проанализировать гораздо сложнее, чем выборку через окна, причем этот анализ представляет собой одну из интереснейших проблем теории выборки. Рассмотрим двумерную функцию распределения яркости объекта  $O(x, y)$ . Чтобы показать особенности усредняющей выборки, найдем вид этой выборки для трех важных типов апертур. Сначала рассмотрим апертуру, описываемую функцией  $\text{Rect}(y/\beta)$  (рис. 9.3).

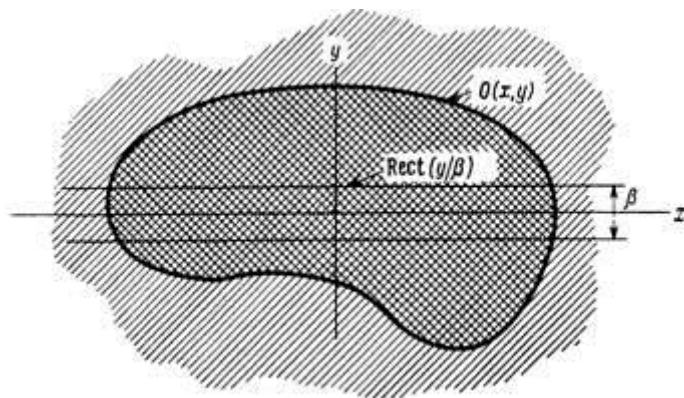


Рис. 9.3. Апертура, описываемая прямоугольной функцией.

В пределах данной прямоугольной функции заменим значение яркости объекта в каждой точке  $(x, y)$  соответствующим значением, усредненным по  $y$  и оцененным в  $x$ . Затем произведем выборку этого нового распределения с помощью дельта-функции  $\delta(y)$ . Тогда мы получим следующее распределение яркости изображения:

$$I(x, y) = \left[ \frac{1}{\beta} \int_{-\beta/2}^{\beta/2} O(x, y) dy \right] \delta(y). \quad (9.5)$$

Докажем, что это выражение эквивалентно свертке распределения яркости объекта с функцией  $\text{Rect}(y/\beta)$  и последующей выборке с помощью функции  $\delta(y)$ . Это важный момент, поскольку он позволяет существенно упростить анализ изображения, полученного с помощью выборки. Перепишем уравнение (9.5), вводя пределы интегрирования в подынтегральную функцию:

$$I(x, y) = \left[ \frac{1}{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} O(x, y) \text{Rect}(y/\beta) dy \right] \delta(y). \quad (9.6)$$

Не изменяя величины интеграла, можно заменить обозначение координаты  $y$  на  $\eta$

$$I(x, y) = \left[ \frac{1}{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} O(x, \eta) \text{Rect}(\eta/\beta) d\eta \right] \delta(y). \quad (9.7)$$

Умножение на функцию  $\delta(y)$  оказывает отфильтровывающее действие на значение этой функции при  $y = 0$ , поэтому можно заменить множитель  $\text{Rect}(y/\beta)$  на  $\text{Rect}[(\eta - y)/\beta]$  без ущерба для общности рассуждений. Тогда

$$I(x, y) = \left[ \frac{1}{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} O(x, \eta) \text{Rect}\left(\frac{\eta - y}{\beta}\right) d\eta \right] \delta(y). \quad (9.8)$$

Поскольку прямоугольная функция симметрична, можно написать

$$I(x, y) = \left[ \frac{1}{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} O(x, \eta) \text{Rect} \left( \frac{y-\eta}{\beta} \right) d\eta \right] \delta(y). \quad (9.9)$$

Этот интеграл, по определению, является интегралом свертки, и

$$I(x, y) = \frac{1}{\beta} \left[ O(x, y) \star \text{Rect} \left( \frac{y}{\beta} \right) \right] \delta(y). \quad (9.10)$$

Таким образом, доказано, что величина яркости изображения в пределах усредняющей апертуры определяется путем свертки с последующим процессом выборки. Производя преобразование Фурье, получим

$$\bar{I}(f_x, f_y) = \frac{1}{\beta} [\bar{O}(f_x, f_y) \text{Sinc}(\beta f_y)] \star \delta(y) = \frac{1}{\beta} [\bar{O}(f_x, f_y) \text{Sinc}(\beta f_y)]. \quad (9.11)$$

Далее рассмотрим набор апертур, имеющих периодическую структуру бесконечной протяженности, описываемую выражением

$$[\text{Rect}(y/\beta) \star \text{Comb}(y/\gamma)]$$

(фиг. 9.4). Если усреднить яркость объекта в точках  $y$  по каждой элементарной апертуре  $\text{Rect}(y/\beta)$  и произвести выборку с помощью дельта-функции  $\delta(y - n\gamma)$ , где  $n$  — целое число, то

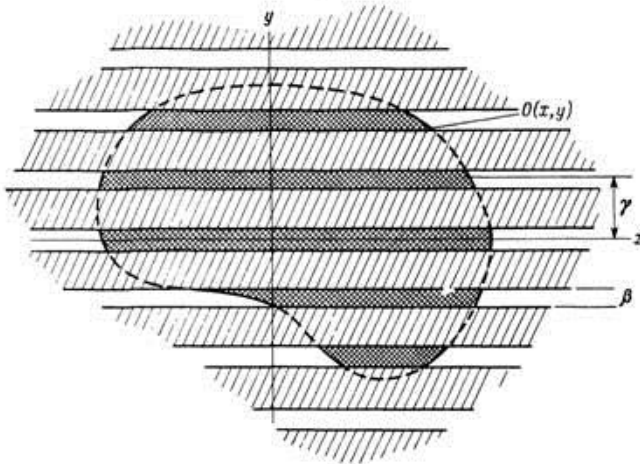


Рис. 9.4. Апертура, описываемая периодической прямоугольной функцией и осуществляющая выборку по распределению яркости объекта.

получим

$$I(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{1}{\beta} \int_{-\beta/2+n\gamma}^{\beta/2+n\gamma} O(x, y) dy \right] \delta(y-n\gamma) \right\}. \quad (9.12)$$

Производя такие же операции, как и в случае одиночной апертуры, можно написать

$$\begin{aligned} I(x, y) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{1}{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} O(x, y) \text{Rect} \left( \frac{y-n\gamma}{\beta} \right) d\eta \right] \delta(y-n\gamma) \right\} = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{1}{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} O(x, \eta) \text{Rect} \left( \frac{\eta-n\gamma}{\beta} \right) d\eta \right] \delta(y-n\gamma) \right\} = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{1}{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} O(x, \eta) \text{Rect} \left( \frac{y-\eta+n\gamma}{\beta} \right) d\eta \right] \delta(y-n\gamma) \right\} = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\beta} \left[ O(x, y) \bullet \text{Rect} \left( \frac{y+n\gamma}{\beta} \right) \right] \delta(y-n\gamma) \\ &= \frac{1}{\beta} [O(x, y) \bullet \text{Rect}(y/\beta)] \text{Comb}(y/\gamma). \end{aligned} \quad (9.13)$$

Снова видим, что операция усреднения и выборки эквивалентна свертке с одной полосой периодической апертуры и выборке с помощью набора дельта-функций. Спектр изображения равен

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \frac{1}{\beta} [\tilde{O}(f_x, f_y) \text{Sinc}(\beta f_y)] \bullet [\text{Comb}(\gamma f_y) \delta(f_x)]. \quad (9.14)$$

В качестве заключительного примера рассмотрим средние в пределах каждого прозрачного участка значения  $O(x, y)$ , полученные в результате выборки с помощью структуры, показанной на фиг. 9.1 и описываемой выражением

$$\left[ \text{Rect} \left( \frac{x}{a} \right) \text{Rect} \left( \frac{y}{b} \right) \right] \bullet \left[ \text{Comb} \left( \frac{x}{b} \right) \text{Comb} \left( \frac{y}{b} \right) \right]. \quad (9.15)$$

Распределение яркости изображения будет иметь вид

$$\begin{aligned} I(x, y) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{1}{a^2} \int_{-a/2+nb}^{a/2+nb} \int_{-a/2+mb}^{a/2+mb} O(x, y) dy \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times [\delta(y-nb) \delta(x-mb)] \right\}. \end{aligned} \quad (9.16)$$

Распространяя на этот случай результаты, полученные для двух предыдущих случаев, можно показать, что уравнение (9.16)

приводится к виду

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= \left\{ \frac{1}{|a|^2} \left[ O(x, y) \cdot \left[ \text{Rect} \left( \frac{x}{a} \right) \text{Rect} \left( \frac{y}{a} \right) \right] \right] \right\} \times \\
 &= \left[ \text{Comb} \left( \frac{y}{b} \right) \text{Comb} \left( \frac{x}{b} \right) \right]. \quad (9.17)
 \end{aligned}$$

Таким образом, усредняющая выборка с помощью двумерной структуры прозрачных отверстий эквивалентна свертке с основным отверстием структуры и последующей выборке в узлах структуры. Производя преобразование Фурье, получим

$$\begin{aligned}
 \tilde{I}(f_x, f_y) &= \frac{1}{a^2} [\tilde{O}(f_x, f_y) \text{Sinc}(af_x) \text{Sinc}(af_y)] \cdot [\text{Comb}(bf_y) \times \\
 &\quad \times \text{Comb}(bf_x)]. \quad (9.18)
 \end{aligned}$$

Упрощения, введенные в этих трех примерах, сделали разрешимой проблему нахождения усредняющей выборки. В противном случае требовалось бы проведение подробного суммирования и многократного интегрирования. Из этих примеров видно, что усредняющая выборка с помощью периодической структуры отверстий по существу является предварительной фильтрацией спектра объекта перед последующей выборкой с помощью совокупности дельтафункций в узлах решетки, составляющей основу периодической структуры.

В остальной части этой главы рассматриваются четыре практические задачи и их решение. Во всех задачах предполагается, что угловое увеличение системы равно единице, т. е. пространственные координаты в плоскости изображения приведены по масштабу к координатам в плоскости объекта. Предполагается также, что сканирующие устройства осуществляют линейное сканирование в одном направлении, а функции распределения яркости объекта ограничиваются полем зрения.

## **9.2. Выборка в системах с параллельным сканированием**

В тепловизорах обычно используется сканирующая линейка чувствительных элементов приемника инфракрасного излучения, электрически соединенная с линейкой светодиодов. Эта система разлагает картину, осуществляя свертку в направлении  $x$  и выборку в направлении  $y$  (рис. 9.5).

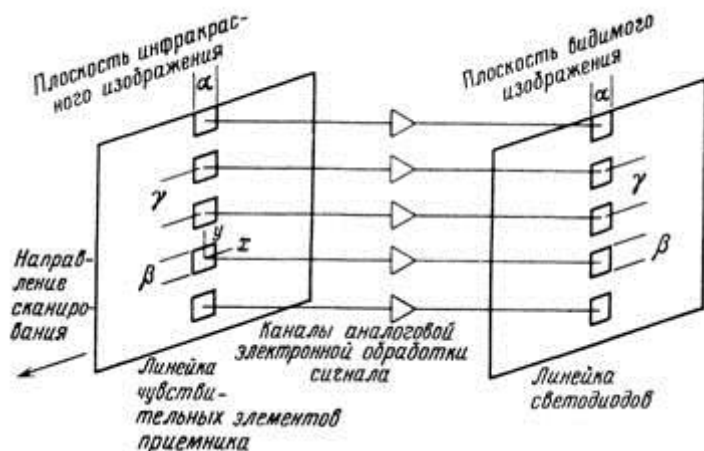


Рис. 9.5. Система с параллельной обработкой сигналов»

Обычно импульсная реакция инвариантна в направлении сканирования и периодична (нестационарна) в другом направлении. Это показано нарис. 9.6.

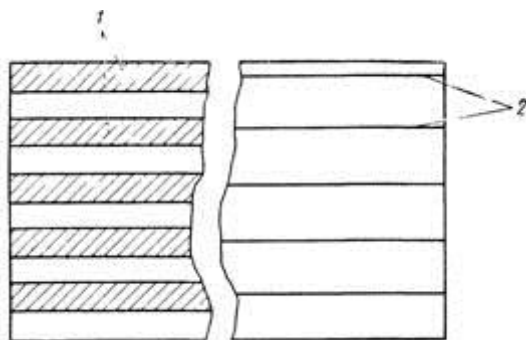


Рис. 9.6. Выборка в системе с параллельной обработкой сигналов.

- 1. — сканирующие строки;
- 2. — центры сканирующих строк.



Слева штриховкой отмечены полосы, по которым идет усреднение яркости объекта, а справа — линии раstra, с которых осуществляется выборка.

Найдем распределение яркости изображения  $I(x, y)$  объекта с распределением яркости  $O(x, y)$  в такой системе. Решая задачу по этапам и пренебрегая функциями рассеяния оптической и электронной систем, получим:

1.  $O(x, y)$  подвергается свертке с импульсной реакцией приемника  $r_d(x, y)$  и выборке; электронные каналы переносят усредненные значения на центры полос раstra  $y = \pm ny$ :

$$I'(x, y) = [O(x, y) * r_d(x, y)] \text{Comb} \left( \frac{y}{Y} \right). \quad (9.19)$$

Функция  $\Gamma$  подвергается свертке с функцией рассеяния монитора  $r_m(x, y)$ :

$$I(x, y) = I'(x, y) * r_m(x, y). \quad (9.20)$$

Совместное рассмотрение этапов 1 и 2 дает

$$I_1(x, y) = \left\{ [O(x, y) * r_d(x, y)] \text{Comb} \left( \frac{y}{Y} \right) \right\} * r_m(x, y). \quad (9.21)$$

Обозначая преобразование Фурье импульсной реакции  $r(x, y)$  являющееся оптической передаточной функцией, через  $r(f_x, f_y)$ , получим спектр изображения в виде

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \{ [\tilde{O}(f_x, f_y) \tilde{r}_d(f_x, f_y)] \text{Comb}(\gamma/f_y) \delta(f_x) \} \tilde{r}_m(f_x, f_y). \quad (9.22)$$

Этот спектр изображения приведен на рис. 9.7.

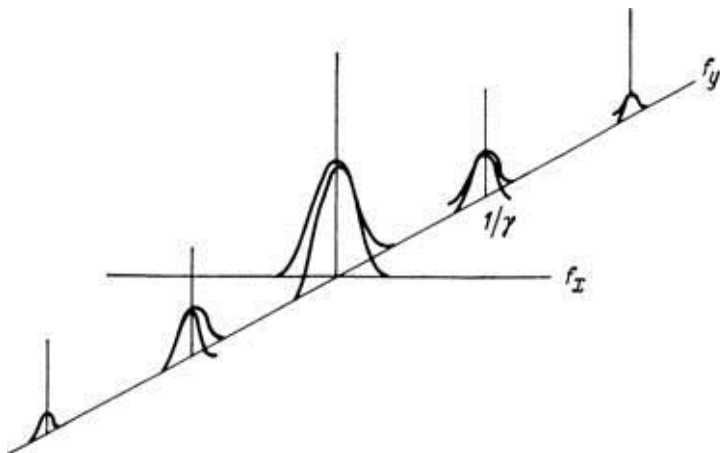


Рис. 9.7. Спектр изображения объекта в системе с параллельной обработкой сигналов.

Чтобы не затемнять картину, на рисунке не показано неизбежное перекрытие боковых частотных полос.

Существенной особенностью полученного спектра является появление боковых полос, которые повторяют спектр объекта, причем избавиться от них не удастся без резкого сужения спектра изображения. Заметим, что в отсутствие выборки спектр изображения получился бы в виде

$$\bar{I}(f_x, f_y) = \bar{O}(f_x, f_y) r_d(f_x, f_y) \tilde{r}_m^*(f_x, f_y), \quad (9.23)$$

где  $r_d r_m^*$  есть МПФ системы.

Важно отметить, что действие выборки можно представить себе как результат периодического опроса приемника, сканирующего в направлении  $y$ . Представляет интерес случай, когда функция рассеяния приемника отличается от функции рассеяния светодиода, так что появляется возможность минимизировать влияние боковых частот в мониторе.

### 9.3. Выборка в двумерных мозаиках приемных устройств, непрерывно визирующих картину

В системах тепловидения часто предлагают использовать преобразователи изображения, состоящие из двумерной матрицы примыкающих друг к другу квадратных элементов (рис. 9.8).

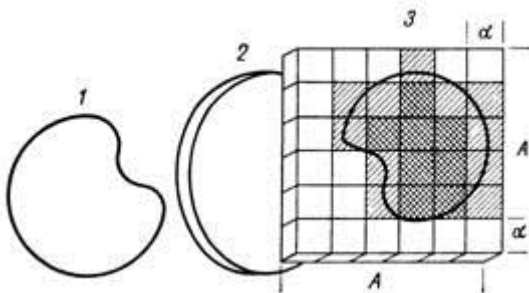


Рис. 9.8. Матричный преобразователь изображения.  
1 — объект; 2 — объектив; 3 — преобразователь инфракрасного изображения в видимое.

Такая матрица усредняет яркость объекта по каждому элементу на входе, далее система осуществляет однократную выборку с каждого элемента и передает сигнал на выход, где формируется изображение путем свертки выходной апертуры с сигналами выборки. Уравнение изображения для такого прибора имеет вид

$$I(x, y) = \left\{ \left[ O(x, y) \cdot \left[ \text{Rect} \left( \frac{x}{\alpha} \right) \text{Rect} \left( \frac{y}{\beta} \right) \right] \right] \times \right. \\ \left. \times \text{Comb} \left( \frac{x}{\alpha} \right) \text{Comb} \left( \frac{y}{\alpha} \right) \right\} \cdot \left[ \text{Rect} \left( \frac{x}{\alpha} \right) \text{Rect} \left( \frac{y}{\alpha} \right) \right]. \quad (9.24)$$

Производя преобразование Фурье, получим

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \{ [\tilde{O}(f_x, f_y) \text{Sinc}(\alpha f_x) \text{Sinc}(\alpha f_y)] \cdot \\ \cdot [\text{Comb}(\alpha f_x) \text{Comb}(\alpha f_y)] \} [\text{Sinc}(\alpha f_x) \text{Sinc}(\alpha f_y)]. \quad (9.25)$$

Этот спектр показан на рис. 9.9 без учета перекрытия боковых полос.

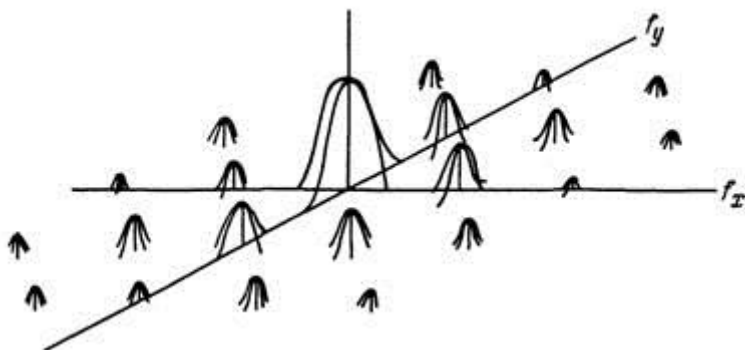


Рис. 9.9. Спектр изображения объекта в матричном преобразователе.

Ограниченный по полосе спектр яркости объекта повторяется в боковых полосах на частотах  $\pm p/a$  и  $\pm t/a$ , где  $p$  и  $t$  — целые числа. Эти боковые полосы не полностью отфильтровываются с помощью восстанавливающего фильтра, и возникает двумерный набор псевдочастот.

Анализ, проведенный в разд. 9.2, показывает, что выборка в каком-либо направлении приводит к появлению псевдочастот в этом направлении. Отличительной особенностью рассматриваемой задачи является возникновение псевдочастот в обоих направлениях, а также перекрестных псевдочастот. Другими словами, частоты по оси  $x$  могут выглядеть, как частоты по оси  $y$ , и наоборот. Эти эффекты становятся очевидными при тщательном анализе периодических изображений в цветном телевидении и полутоновых изображений.



## 9.4. Выборка в системах с коммутацией

В одном из типов систем FLIR, описанном в разд. 8, видеосигналы, поступающие по множеству каналов, передаются в один канал с помощью коммутации каналов во времени. Система такого типа состоит из параллельного сканирующего устройства с электронным переключателем, который последовательно опрашивает  $N$  идентичных, ограниченных по полосе каналов, и индикаторного устройства, которое демодулирует и фильтрует полученные сигналы. Математическое описание системы с коммутацией идентично математическому описанию системы с параллельной обработкой сигналов до второго этапа. Пространственный эквивалент временной выборки, осуществляемой коммутатором, показан на рис. 9.10.

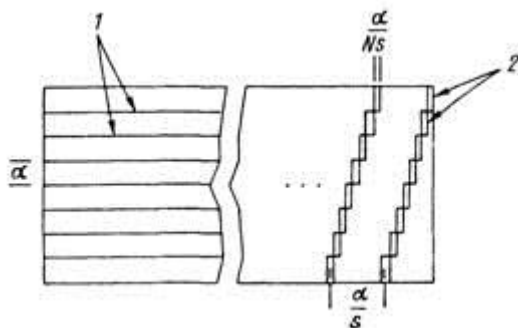


Рис. 9.10. Путь окна коммутатора при выборке. 1 — сканирующие строки; 2 — окна коммутатора.

Горизонтальный растр в левой части фигуры представляет аналог каналов, опрашиваемых коммутатором в направлении  $x$ . Наклонный растр в правой части представляет путь небольшого прямоугольного окна, которое последовательно опрашивает каждый канал. Это электронное окно опрашивает каждый канал через интервал  $a/s$  в течение времени  $a/N_s$ , где  $s$  — число опросов за время элемента (эффективность коммутатора полагается равной единице). Мы аппроксимировали наклонный растр выборки

вертикальным, поскольку точное уравнение очень громоздко, а выигрыш в точности получается незначительным и не оправдывает

такого усложнения. Приближенный растр изображен на рис. 9.11.

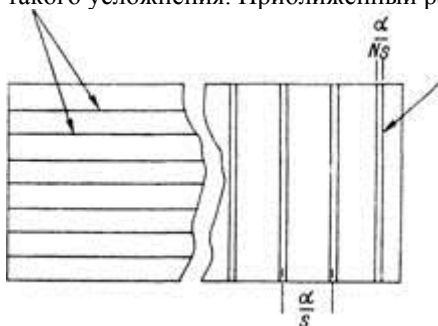


Рис. 9.11. Приближенный растр при использовании электронного коммутатора.

1 — сканирующие строки; 2 — приближенный путь окоп коммутатора.

Предположим, что импульсная реакция системы до коммутатора определяется только реакцией приемника  $r_d(x, y)$ . Предположим также, что импульсная реакция демодулятора и конечного фильтра (монитора) равна гт. Функция окон коммутатора имеет вид

$$W'_1(x) = \text{Rect} \left( \frac{x}{\alpha/Ns} \right) * \text{Comb} \left( \frac{x}{\alpha/s} \right). \quad (9.26)$$

Изображение формируется по следующим этапам:

1. Изображение  $I(x, y)$  образуется с помощью обычной выборки одномерным растром

$$I'(x, y) = [O(x, y) * r_d(x, y)] \text{Comb} \left( \frac{y}{\beta} \right). \quad (9.27)$$

2.  $I'$  опрашивается функцией окон коммутатора  $W_n$  подвергается свертке с помощью импульсной реакции канала коммутатора, влиянием которой мы пренебрежем, и тогда

3. Конечное изображение получается в результате свертки  $I^z$  с импульсной реакцией демодулятора и монитора  $r_m$

$$I(x, y) = I^z(x, y) * r_m(x, y). \quad (9.29)$$

Таким образом,

$$I(x, y) = \left\{ [O(x, y) * r_d(x, y)] \text{Comb} \frac{y}{\beta} W(x, y) \right\} * r_m(x, y). \quad (9.30)$$

Производя преобразование Фурье, получим

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \{ [\tilde{O}(f_x, f_y) \tilde{r}_d(f_x, f_y)] * [\text{Comb}(\beta f_y) \delta(f_x)] * \tilde{W}(f_x, f_y) \} \tilde{r}_m(f_x, f_y). \quad (9.31)$$

Преобразование Фурье функции окна имеет вид

$$\tilde{W}(f_x, f_y) = \text{Sinc} \left( \frac{\alpha}{Ns} f_x \right) \left[ \text{Comb} \left( \frac{\alpha}{s} f_x \right) \delta(f_y) \right]. \quad (9.32)$$

В окрестности  $f_x = 0$  для больших  $N$

$$\tilde{W}(f_x, f_y) \approx \text{Comb} \left( \frac{\alpha}{s} f_x \right) \cdot \delta(f_y). \quad (9.33)$$

Преобразование Фурье изображения приобретает вид

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \left\{ [\tilde{O}(f_x, f_y) \tilde{r}_d(f_x, f_y)] * [\text{Comb}(\beta f_y) \delta(f_x)] * \left[ \text{Comb} \left( \frac{\alpha}{s} f_x \right) \delta(f_y) \right] \right\} \tilde{r}_m(f_x, f_y), \quad (9.34)$$

или

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \left\{ [\tilde{O}(f_x, f_y) \tilde{r}_d(f_x, f_y)] * \left[ \text{Comb}(\beta f_y) \text{Comb} \left( \frac{\alpha}{s} f_x \right) \right] \right\} \times \tilde{r}_m(f_x, f_y). \quad (9.35)$$

Этот спектр изображения показан на рис. 9.12.



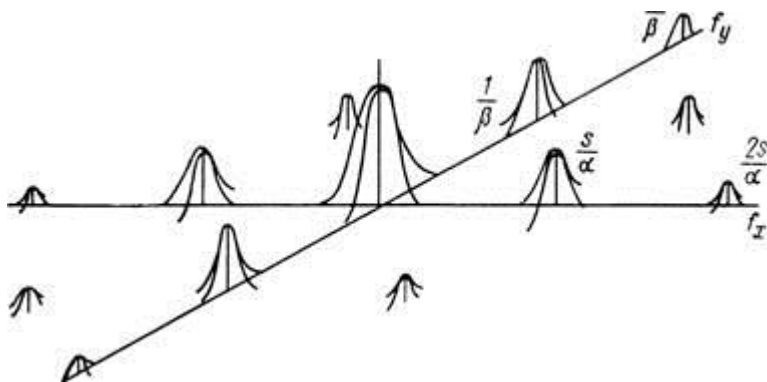


Рис. 9.12. Спектр изображения в системе с коммутатором.

Отличительной особенностью рассматриваемой задачи опять является наличие боковых полос, которые повторяют вид спектра до выборки. Анализ первых трех проблем может быть распространен на случай наблюдения с помощью другого сканирующего приемного устройства с пок кадровым разложением. В качестве полезного практического упражнения по использованию приведенного анализа интересующиеся читатели могут описать действие широтно-импульсного модулятора. Этот прибор периодически опрашивает каждый аналоговый канал в течение более короткого промежутка времени, чем время элемента, и преобразует полученные величины в импульсы постоянной амплитуды, возникающие с частотой опроса и имеющие ширину, пропорциональную полученным путем опроса величинам. Широтноимпульсный модулятор используется затем для управления светодиодами сканирующего индикаторного устройства.

## 9.5. Практические последствия выборки

К наиболее вредным последствиям выборки в системах тепловидения приводит временная выборка движущегося изображения при пок кадровом разложении и пространственная выборка при растровом разложении. Временная выборка вызывает сильное искажение формы небольших объектов, быстро

движущихся перпендикулярно направлению сканирования, а пространственная выборка приводит к еще более нежелательным последствиям. Влияние выборки при растровом разложении подробно рассматривается Биберманом, который приводит результаты исследований Томпсона. Томпсон определял распределение оптимальных дистанций наблюдения для изображений без растра и телевизионных изображений с растром. Он нашел, что угловой размер экрана с растром, рассматриваемого с оптимального расстояния, составляет  $\sim 8^\circ$ , а без растра наблюдатели предпочитают выбирать такую дистанцию наблюдения, при которой угловой размер экрана получается равным  $\sim 16^\circ$ . При числе активных строк  $\sim 480$  на стандартном поле телевизионного экрана с угловым размером  $8^\circ$  одна строка видна под углом  $\sim 1'$ , что согласуется с максимально допустимой угловой величиной строки растра по данным многих других исследователей.

Значение этого факта заключается в том, что при рассматривании искаженного растром изображения наблюдатель с помощью зрительной системы старается усилить эффект пространственной фильтрации после выборки, чтобы ослабить паразитные высокие частоты, обусловленные растром. В результате у наблюдателей ухудшается восприятие как нужных, так и ненужных частот сигнала, и результирующее качество видения оказывается хуже, чем можно достигнуть при использовании безрастровых систем. Другое последствие выборки при растровом разложении заключается в уменьшении предельного разрешения в направлении, перпендикулярном направлению сканирования. Это учитывается коэффициентом  $K$ , который для стандартного телевидения связывает число разрешаемых линий  $R_v$  по высоте картины и число активных строк  $N_a$ , т. е.  $R_v = KN_a$ . Экспериментальные значения  $K$  лежат в диапазоне  $0,53 \leq K \leq 0,85$ . Следующая проблема связана с тем, что растр мешает глазу осуществлять свободный поиск, замедляя его движение и отвлекая от цели. Конечный результат выборки сводится к тому, что объекты, которым соответствует фиксированная структура изображения, труднее обнаружить и опознать, чем в системе без выборки с теми же номинальными значениями разрешающей способности и чувствительности. Многим из нас трудно в это поверить, поскольку мы привыкли считать телевизионное изображение хорошим, когда ясно виден четкий растр. Обычным дефектом многоэлементных систем является наличие

неработающих каналов из-за неисправностей приемника, электронного или индикаторного устройства. При наличии такого дефекта либо оставляют одну строку неработающей, либо, если имеется такая возможность, подают на нее сигнал с соседней строки. При отсутствии нескольких строк такое решение уже неприемлемо, поскольку дефекты изображения будут постоянно отвлекать внимание. Установлено, что формирование для неработающей строки искусственного сигнала, являющегося усреднением сигналов двух каналов, прилегающих к неработающему, дает настолько качественное изображение, что дефект трудно обнаружить глазом; эта мера приемлема, конечно, лишь тогда, когда процент неработающих каналов остается низким.

Из определения ОПФ и из приведенного обсуждения становится ясно, что понятие ОПФ применимо только к тем направлениям в изображении, в которых отсутствует выборка. Следовательно, требуется какой-то критерий качества изображения, полученного с выборкой. Для описания дефектов выборки можно использовать, например, относительную (в процентах) мощность спектра изображения, связанную с псевдочастотами. Другой возможной мерой является разрешающая способность для полос мира, ориентированных параллельно направлению сканирования.

## 10. Визуальное восприятие объектов

### 10.1. Основные положения

Процесс поиска объекта на экране индикатора оптико-электронной системы включает четыре взаимосвязанные стадии: **обнаружение, классификацию, различение и опознавание**. Под обнаружением подразумевается выделение объекта на фоне и отнесение его к классам объектов, представляющих потенциальный интерес. Классификация означает отнесение обнаруженного объекта к одному из широких классов, таких, как сухопутные транспортные средства или военные корабли. Различение означает отнесение наблюдаемых объектов к более узким подклассам, как, например, танки или самоходные орудия. Наконец, на стадии опознавания можно установить тип объекта, например определить, что наблюдается танк М-60.

При использовании системы тепловидения она обычно характеризуется единой вероятностью восприятия  $P_{\text{воспр}}$ , которая определяет вероятность выполнения данной задачи.

Можно представить  $P_{\text{воспр}}$  как произведение условных вероятностей, если ввести следующие обозначения:

$p$  — объект появляется в поле зрения;

$\text{виз}$  — наблюдатель визирует объект (смотрит на него);

$\text{обн}$  — наблюдатель обнаруживает объект;

$\text{кл}$  — наблюдатель классифицирует объект;

$\text{разл}$  — наблюдатель различает объект;

$\text{опозн}$  — наблюдатель опознает объект.

Тогда

$$P_{\text{воспр}} = P_{\text{опозн/разл, кл, обн, виз, п}} P_{\text{разл/кл, обн, виз, п}} \times P_{\text{кл/обн, виз, п}} P_{\text{обн/виз, п}} P_{\text{виз/п}} P_{\text{п}} \quad (10.1)$$

Вероятность того, что объект находится в поле зрения, является сложной функцией метода нацеливания на объект, априорных сведений, точности решения навигационных задач и выбранного алгоритма поиска. Обычно полагают  $P_{\text{п}} = 1$ .

Принимают также, что задачи, решаемые при поиске, взаимно независимы, так что условные вероятности могут быть заменены безусловными вероятностями

$$P_{\text{воспр}} = P_{\text{опозн}} P_{\text{разл}} P_{\text{кл}} P_{\text{обн}} P_{\text{виз}} \quad (10.2)$$

Сложность процесса поиска объекта можно оценить на

основании составленного по опубликованным данным перечня факторов, влияющих на этот процесс.

**Характеристики объекта:** отношение сигнала к шуму  $C/Ш$ ; контраст относительно фона  $C$ ; критический угловой размер  $^\circ C$ ; градиенты изменения яркости на краях крупных деталей изображения; сложность контуров; место в общей рассматриваемой картине; положение на экране индикатора; форма; ориентация; перспектива; размер по отношению к размеру экрана; скорость движения по картине  $У$ ; яркость; режим работы.

**Характеристики картины:** яркость фона  $L_b$ ; плотность помех или ложных сигналов; скорость движения картины по экрану; соотношение ширины и высоты картины.

**Характеристики системы:** оптическая передаточная функция и связанные с ней критерии разрешения; частота выборки во времени  $F$ ; частота выборки в пространстве (число строк сканирования  $L$  на критический угловой размер объекта); угловой размер экрана индикаторного устройства  $A'$ ; передача серой шкалы градаций яркости; динамический диапазон.

**Характеристики наблюдателя:** тренированность; мотивировка действий; утомление; получение предварительного инструктажа; возраст; коэффициент интеллекта; индивидуальные особенности; рабочая нагрузка; метод поиска; число наблюдателей и степень связи между ними; периферическая острота зрения.

Разнородные, в том числе тактические, факторы: требуемая площадь зоны поиска; освещенность в кабине наблюдателя; шумы и вибрации транспортного средства, на котором установлена система; вибрации изображения или наблюдателя; допустимое время поиска.

К общему числу перечисленных факторов, равному 40, можно добавить многие другие. Все эти факторы в той или иной мере исследовались, и в последующих разделах подытожены некоторые из наиболее полезных экспериментальных результатов. Любая статья, посвященная исследованию процессов восприятия, описывает эксперименты, в которых для получения поддающихся обработке результатов выделено только несколько факторов из всего их многообразия. Поэтому, хотя в этой области имеется множество статей, невозможно найти точно совпадающие результаты двух аналогичных экспериментов разных авторов. Самое большее, на что можно

надеяться, это извлечь из имеющейся противоречивой массы данных некоторые общие эмпирические положения, которые могут помочь продвинуться в нужном направлении. В большинстве экспериментов, которые будут здесь рассматриваться, выбирается некоторый переменный показатель качества изображения  $F$ , фиксируются все другие возможные показатели качества и затем изменяется величина  $F$ , чтобы определить влияние этого показателя на вероятность решения определенной задачи  $T$ , т. е. отыскивается зависимость  $P_v [T]$  от  $V$ . В этих экспериментах обычно предполагается, что влияние таких параметров, как шумы, разрешение, характер выборки, тип объекта, в первом приближении можно разделить. В этом случае максимальное значение  $P_v [T]$  может не быть равно единице, поскольку максимально достижимая вероятность может быть ограничена фиксированными параметрами. Предварительная оценка поведения системы в реальных условиях полезна для общего понимания влияния переменных на  $P_v [T]$ , но попытка точно предсказать результаты натуральных испытаний — пустая трата времени. Лучший подход к проблеме определения характеристик заключается в проведении грамотно спланированных испытаний в натуральных условиях и на моделях, а также в экстраполяции результатов на основе общих принципов для других условий. Именно в этом духе построены последующие разделы главы. В них описаны некоторые заслуживающие доверия экспериментальные результаты, иллюстрирующие общие принципы поиска объектов. Прежде чем рассматривать исследования собственно тепловых изображений, рассмотрим результаты этих экспериментов в видимой области спектра.

## **10.2. Движения глаза во время визуального поиска**

Процесс визуального поиска объекта в пределах поля зрения в значительной мере определяется ограничениями скорости и частоты движений глаз. При свободном поиске центр поля зрения останавливается на короткий период, быстро перемещается в другую точку, вновь фиксируется и процесс повторяется, пока глаз не обнаруживает объект. Скорость, с которой может перемещаться поле зрения глаза, ограничивается

числом возможных фиксаций в секунду и траекторией поиска, которая обычно выбирается полу.

бессознательно. Дальнейшее рассмотрение относится именно к этим проблемам, причем сначала рассматривается механизм поиска, а затем приводятся соответствующие уравнения.

Энох использовал круглые аэрофотоснимки углового размера 3, 6, 9, 12 и 24° на дистанции наблюдения 55 см и 51°18' на дистанции 34 см. Максимальная яркость картины составляла ~200 кд/м<sup>2</sup>. Энох регистрировал движения глаз наблюдателей в процессе поиска колец Ландольта на фоне этих снимков и пришел к следующим выводам:

1. Максимальное число точек фиксации приходится на центр картины.
2. Большее число точек фиксации сосредоточено в правой и нижней частях картины, в остальных участках точек меньше.
3. Время фиксации уменьшается, а расстояние между точками фиксации увеличивается с увеличением углового размера картины, как следует из приведенной ниже таблицы:

Угловой размер картины	Среднее время фиксации, с	Среднее расстояние между точками фиксации
3°	0,578	0,87°
6	0,468	1,82
9	0,384	2,13
18	0,361	3,72
24	0,355	4,33
51°18'	0,307	6,30

4. При угловом размере, меньшем 9°, эффективность поиска резко снижается, поскольку увеличивается число точек фиксации, лежащих за пределами картины, что следует из приведенных ниже данных:

Угловой размер картины	Число точек фиксации, лежащих за пределами картины, %
>9°	10
6	50
3	75

5. При угловом размере картины, большем 9°, число точек фиксации в центре возрастает за счет точек на периферии и соответствующим образом уменьшается эффективность поиска.
6. Верхний левый угол картины обследуется реже всего.

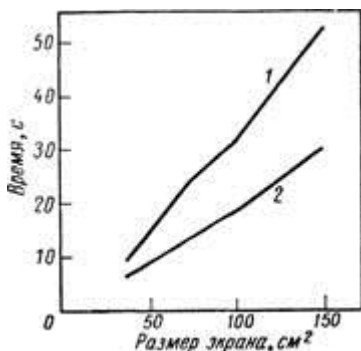
В соответствии с выводами Эноха оптимальный угловой размер картины составляет 9°, а уменьшение и увеличение этого размера приводят к уменьшению эффективности поиска по причинам, указанным в пп. 4 и 5. Отсюда следует, что увеличение углового размера экрана индикатора сверх 9° оправдано лишь в тех случаях, когда избыточные участки экрана используются\* для ориентации и навигации.

Форд и др. провели эксперимент по визуальному поиску с целью определения частоты фиксаций глаза, продолжительности фиксаций и расстояния между точками фиксации. Производя поиск небольшого объекта, диаметром 3мм, близкого к порогу восприятия, в поле 30° диаметром 305 мм при яркости 8,5 кд/м<sup>2</sup> в течение 5 с, авторы установили, что частота фиксации заключена в диапазоне 2,2—4,4 с<sup>-1</sup> со средним значением 3,1 с<sup>-1</sup>. Средняя продолжительность фиксаций 0,28 с, т. е. фиксация занимает 85% времени. Среднее время движения 0,04с, т. е. движение занимает 15% времени. Среднее расстояние между точками фиксации составляло 8,6°. Форд и др. установили также, что имеется тенденция пренебрегать центральным и внешним участками поля. Обобщающие соображения относительно движения глаза во время поиска приведены Уайтом, который утверждает, что время фиксации возрастает для более сложных картин и более жестких требований.

Бэйкер и др. провели эксперименты по наблюдению на экранах



индикаторов неподвижных изображений произвольной формы. Плотность помех, или относительное число мешающих изображений, была постоянной, так что общее число помех было пропорционально площади экрана. Авторы установили, что зависимость времени поиска от площади экрана имеет вид, показанный на рис. 10.1.



Фиг. 10.1. Время поиска в зависимости от площади экрана индикаторного устройства. 1 — среднеарифметическое время; 2 — среднегеометрическое время.

Напротив, если число помех не зависит от размера экрана, время поиска с увеличением площади экрана остается неизменным. Эти авторы разделили также круглый экран с неподвижными изображениями на пять кольцевых зон равной ширины (рис. 10.2) и установили, что при поиске объекты быстрее всего отыскиваются в зоне 3 (рис. 10.3.)

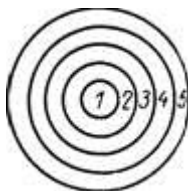


Рис. 10.2. Используемая в исследованиях классификация положений объекта на экране.

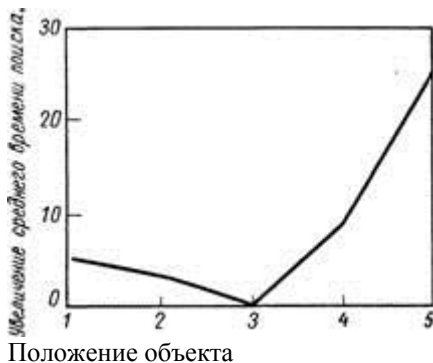


Рис. 10.3. Время поиска в зависимости от положения объекта .

### 10.3. Теории свободного поиска

Применим теперь представление о чередовании быстрого перевода взгляда и его фиксации в зрительном процессе для расчета вероятности видения одиночного объекта на экране индикатора.

Наиболее эффективный возможный процесс поиска можно в принципе представить как такой, при котором движение глаз обеспечивает периодический осмотр всего изображения на экране без перекрытий и без пропусков. Уравнение поиска для этого случая выводится следующим образом. Пусть телесный угол, соответствующий однократной фиксации взгляда, равен  $Q_g$ , а телесный угол, соответствующий всей площади экрана индикатора, равен  $Q_s$ . Тогда один полный цикл поиска будет содержать  $Q_s/Q_g$  фиксаций взгляда. Число результативных действий, в процессе которых мы увидели объект, равно единице, а число нерезультативных действий равно  $(Q_s/Q_g) - 1$ . Задача в том виде, как она здесь сформулирована, эквивалентна, таким образом, определению вероятности выбора черного шара в  $p$  попытках без пополнения шаров из сосуда, содержащего  $a$  черных шаров и  $b$  белых шаров. Возможное число нежелательных событий равно  $b$  .

Для такого биномиального распределения вероятность  $n - r$  результативных событий в  $n$  попытках равна

$$P(n-r) = \frac{n!}{r!(n-r)!} p^{n-r} q^r, \quad (10.3)$$

$$p = \frac{a}{a+b},$$

$$q = \frac{b}{a+b}. \quad (10.4)-(10.5)$$

где  $p$  и  $q$  — вероятности результативного и нерезультативного исходов одной попытки. Величины  $p$  и  $q$  связаны с  $a$  и  $b$  соотношениями (10.4), (10.5)

В этой простой модели поиска общее число попыток  $n$  равно отношению полного времени  $t$ , отведенного на поиск, ко времени  $t_g$  одного скачка (движения и фиксации) глаза

$$n = t/t_g. \quad (10.6)$$

$$a = 1, \quad b = \frac{\Omega_s}{\Omega_g} - 1.$$

Тогда

$$p = \Omega_g/\Omega_s,$$

$$q = 1 - (\Omega_g/\Omega_s),$$

$$P(1) = \frac{(t/t_g)!}{1!((t/t_g)-1)!} \left(\frac{\Omega_g}{\Omega_s}\right)^1 \left(1 - \frac{\Omega_g}{\Omega_s}\right)^{(t/t_g)-1}.$$

(10.7)-(10.9)

Поскольку имеется только один результативный исход попытки, можно оценить вероятность  $P(1)$  не по уравнению (10.9), а проще:

$$\begin{aligned} P(1) &= 1 - P(0) = 1 - \frac{(t/t_g)!}{0!((t/t_g)-1)!} \left(\frac{\Omega_g}{\Omega_s}\right)^0 \left(1 - \frac{\Omega_g}{\Omega_s}\right)^{t/t_g} = \\ &= 1 - \left(1 - \frac{\Omega_g}{\Omega_s}\right)^{t/t_g}. \end{aligned} \quad (10.10)$$

В том случае, когда объект обнаруживается при первом взгляде на него, требуемое число результативных событий  $n$  —  $r$  равно 1 и

Недостатки этой простой модели заключаются в том, что

свободный поиск такого типа невозможно реализовать, а также в том, что при взгляде на объект он не обязательно обнаруживается с первого раза. Лучшие модели были предложены или обоснованы в трех фундаментальных статьях по теории поиска: Кренделя и Водинского, Вильямса и Бороу , а также Вильямса .

Крендель и Водинский постулировали модель случайного поиска и подтвердили ее справедливость тремя экспериментами. Они предположили, что процесс поиска случаен и что, если вероятность обнаружения объекта с первого взгляда равна  $P_{sg}$ , вероятность обнаружения после  $n$  попыток равна

$$P = 1 - (1 - P_{sg})^n, \quad (10.11)$$

или, когда  $n$  велико и  $P_{sg}$  мало:

$$P \approx 1 - \exp [n \ln (1 - P_{sg})]. \quad (10.12)$$

Поскольку  $n = t/t_g$ ,

$$P(t) = 1 - \exp [t \ln (1 - P_{sg})/t_g] = 1 - \exp (-mt). \quad (10.13)$$

В первом эксперименте использовался экран размером  $183 \times 160$  см и яркостью  $17$  кд/м<sup>2</sup>, рассматриваемый с расстояния  $3$  м, что соответствовало угловому размеру экрана  $34,9 \times 30,4^\circ$ .

Объектом являлся кружок диаметром  $3,87$  мрад, условия видимости которого были близки к пороговым. Объект мог занимать одну из  $48$  позиций. Этот эксперимент хорошо подтвердил принятую простую модель поиска.

Во втором эксперименте использовался объект размером  $1,2$  мрад<sup>2</sup> на протяженном фоне яркостью  $0,03$  кд/м<sup>2</sup>. Угловые размеры полей, в которых производился поиск, составляли  $0,22$  и  $0,098$  ср. Адаптированные на темноту наблюдатели отыскивали  $44$  случайно расположенных объекта. Полученные результаты также подтвердили справедливость данной модели.

В третьем эксперименте адаптированным на темноту наблюдателям предлагалось в течение  $30$  с произвести поиск в поле зрения диаметром  $6,8; 18; 32$  и  $43^\circ$  при яркости фона  $42,5; 3,5; 0,35$  и  $0,035$  кд/м<sup>2</sup>. Объектами являлись кружки с угловыми размерами  $1,41; 3,81; 7,03$  и  $13,48$  мрад, и контрасты во всех этих случаях по меньшей мере вдвое превышали пороговые значения, необходимые для обнаружения объекта с вероятностью  $95\%$  при продолжительном времени наблюдения. Эти эксперименты

показали, что экспоненциальная модель поиска является удовлетворительной при выполнении следующих трех условий:

1. Время поиска не превышает 30 с.
2. Параметры изображения таковы, что контраст или размер не изменяется во время поиска.
3. Наблюдатели сознательно не применяют метода поиска, отличного от случайного.

Во времени проведения этих исследований характер движений и фиксаций взгляда в зрительном процессе еще не был изучен, поэтому используемая модель не могла учитывать роль фиксаций. Исследования Кренделя и Водинского показали также, что тренировка (приобретение наблюдателями опыта в решении поставленной задачи поиска) в среднем не оказывает заметного влияния на получаемые результаты.

Вильямс и Бороу показали для различных значений плотности помех и скорости движения элементов картины по экрану индикатора, что вероятность различения принимает простую форму  $P = 1 - \exp(-mt)$ . Вильямс разработал несколько отличную теорию поиска, основанную на том факте, что последовательные фиксации внутри интервала в несколько секунд имеют тенденцию группироваться, в результате чего наблюдается частично упорядоченный процесс поиска. Обозначая через  $N$  общее число циклов сканирования взглядом всего поля за время данного эксперимента и через  $F$  долю последнего цикла до момента, когда произошло обнаружение, Вильямс показал, что вероятность обнаружения объекта за  $N + F$  циклов сканирования равна

$$P(N + F) = 1 - (1 - P_{ss})^N + FP_{ss}(1 - P_{ss})^N, \quad (10.14)$$

где  $P_{ss}$  — вероятность обнаружения объекта за один полный цикл сканирования поля.

Поскольку полное время поиска  $t$  есть число, кратное времени одного цикла  $t_{ss}$ , Уильямс получил

$$P(t) = 1 - \exp(-mt),$$

$$m = -\ln(1 - P_{ss})/t_{ss}. \quad (10.15)$$

Во всех приведенных выше уравнениях время  $t$ , отведенное на

поиск, может быть связано с физическими условиями поиска, такими, как скорость поворота приемного устройства или скорость самолета, высота, угол наклона и поле зрения приемного устройства, как показано в разд. 10.4.

Блумфилд показал, что поиск объекта на картине с высокой плотностью помех облегчается с увеличением контраста или размера объекта по отношению к помехам. Аналогичным образом Петерсен и Дугас установили, что время поиска уменьшается, когда контраст или скорость перемещения объекта относительно фона увеличиваются. Они установили также, что в случае движения объекта в уравнение свободного поиска должен быть введен коэффициент при экспоненте. Для скорости объекта относительно картины  $U$ , меньшей 5 град/с, этот коэффициент равен  $C(1 + 0,45 U^2)$ , где  $0,3 < C < 0,5$ .

## 10.4. Разрешение эквивалентных штриховых мир

На примере многих исследований показано, что наиболее важным единым параметром, характеризующим возможный уровень видения объекта с помощью системы, является разрешение различных штриховых мир, эквивалентных объекту. Такой подход справедлив независимо от природы имеющегося сочетания различных дефектов изображения. Он проиллюстрирован на рис. 10.5 в предположении, что объект характеризуется критическим размером, определяемым размерами деталей объекта, существенных для его видения.

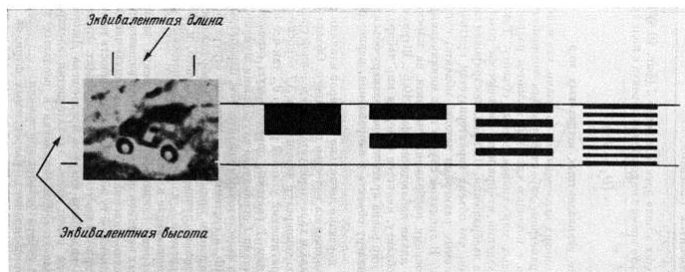


Рис. 10.5. Эквивалентные штриховые тест-объекты (миры).

В типичном случае этот минимальный габаритный размер проекции изображения объекта на плоскость, перпендикулярную линии наблюдения (рис. 10.6).



Рис. 10.6. Критический размер объекта.

Штриховая мира, эквивалентная объекту, является одной из мир набора, в котором полная ширина мир равна критическому размеру объекта, а длина соответствует размеру объекта в направлении, перпендикулярном критическому.

На рис. 10.7 показано несколько примеров влияния различных дефектов изображения на качество последнего.

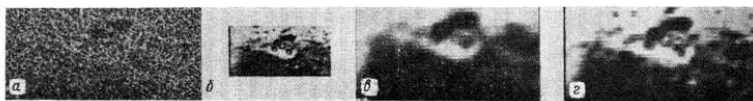


Рис. 10.7. Ограничения качества изображения различными характеристиками систем а — система 1; б — система 2; в — система 3; г — система 4.

Объект один и тот же во всех случаях и характеризуется определенной средней кажущейся разностью температур черного тела АТ относительно фона. Объект имеет критический угловой размер  $\theta_c$ , так что он занимает часть поля зрения А системы, определяемую отношением  $Q/A$ . На рис. 10.7 система 1 ограничена случайными шумами, система 2 характеризуется недостаточным увеличением, параметры системы 3 ограничены МПФ, а системы 4 — растровой структурой изображения. В приведенном примере качество изображения в каждой последующей системе лучше, чем в предыдущей, и обеспечивает обнаружение в системе 7, классификацию в системе 2, различение в системе 3 и опознавание в системе 4.

Согласно теории, связывающей разрешение эквивалентной штриховой мира с видением объекта, качество видения можно предсказать, определив максимальную разрешаемую частоту эквивалентной мира, имеющей ту же кажущуюся разность температур АТ и наблюдаемой при тех же условиях, что и объект. Эта теория в несколько другом виде была впервые предложена Джонсоном, который пытался найти связь характеристик электронно-оптических преобразователей изображения в реальных условиях с объективными лабораторными критериями. Джонсон определил число разрешаемых штрихов, соответствующих критическому размеру объекта, для восьми типов военных машин и стоящего человека.



Широко известные критерии Джонсона, усредненные по всем классам объектов, имеют следующие значения:

Качество видения	Число разрешаемых штрихов, требуемых для обеспечения 50%-ной вероятности правильного решения
Обнаружение	$1,0 \pm 0,25$
Определение ориентации	$1,4 \pm 0,35$
Различение	$4,0 \pm 0,8$
Опознавание	$6,4 \pm 1,5$

Эти критерии были непосредственно выведены из экспериментальных наблюдений и являются строгими только для безрастровой структуры изображения в электронно-оптических преобразователях.

Розелл и Вильсон уточнили теорию, применив понятие воспринимаемого отношения сигнала к шуму, описанное в гл. 4. Они вывели выражения для условий разрешения штриховых мир на фоне аддитивных гауссовых шумов на экране телевизионного монитора и провели испытания для подтверждения теории. Они добавляли шумы к телевизионным изображениям автомашин, провели испытания с наблюдателями, чтобы определить зависимость вероятности различения и опознавания от воспринимаемого отношения сигнала к шуму, и построили графики полученных вероятностей в функции ожидаемых значений воспринимаемого отношения сигнала к шуму, требуемых для разрешения эквивалентных штриховых мир для каждого объекта.

Розелл и Вильсон приняли, что для различения требуется разрешение 7-штриховой мира, а для опознавания — 11-штриховой.

Полученные результаты подтвердили простую теорию, согласно которой различение и опознавание объекта можно предсказать по разрешению эквивалентных штриховых мир. Строго говоря, эти данные применимы только для объектов, наблюдаемых на фоне шумов на телевизионном экране с числом строк 525 при условии, что в остальном телевизионное изображение идеально. Для широкого многообразия стандартов разложения, используемых в

системах FLIR, эти данные могут и не быть справедливыми. Вильямс провел аналогичные эксперименты с системами FLIR с обработкой изображений на ЭВМ и нашел, что степень различения хорошо согласуется с числом разрешаемых штрихов, укладывающихся в критическом размере объекта. Эти результаты можно использовать независимо от степени влияния на качество изображения растровой структуры, разрешения, контраста и шума; они подробно описаны в разд. 10.9.

## 10.5. Вероятность обнаружения

Вероятность обнаружения объектов простой геометрической формы на однородном фоне в присутствии случайных шумов рассматривалась в гл. 4. Выводы, сделанные на основе этого рассмотрения, таковы, что визуальная система работает, как бы вычисляя отношение сигнала к шуму и сравнивая его с пороговым значением отношения сигнала к шуму как критерием важности полученного сигнала. Имеется значительное количество данных, подтверждающих эту теорию в различных условиях наблюдения. В условиях ограничения видимости квантовыми шумами или контрастом теория подтверждается данными Блэкуэлла, а при наличии аддитивных шумов — данными Кольмана и Андерсона, Шаде, а также Розелла и Вильсона. Фактически нет опубликованных данных о зависимости условий обнаружения объектов непростой формы на неравномерных фонах от отношения сигнала к шуму.

В гл. 4 указывалось, что вероятность обнаружения возрастает с увеличением времени наблюдения, углового размера объекта и контраста. Испытания Бернштейна, Колюччио и др., Холланда и Харабедиана, а также Грининга и Уаймана, проведенные с реальными объектами в натуральных условиях, показали, что процент обнаруживаемых объектов действительно возрастает с увеличением контраста. Бернштейн, например, установил, что изображения на экране электронно-лучевой трубки автомашин и людей должны иметь контраст  $C/L$  ( $LT - LB$ )/ $L$  в, равный 90%, чтобы обеспечить максимально возможную вероятность различения.

Кроме того, Бернштейн установил, что разрешение влияет на вероятность обнаружения только в той мере, в какой оно изменяет отношение сигнала к шуму или контраст объекта. Однако Колюччио и др. нашли, что условия обнаружения улучшаются с ростом разрешения  $I$ , определяемого числом разрешаемых штрихов на размер объекта, причем улучшение описывается формулой

$$\text{Улучшение} = K_1 \lg K_2 R, \quad (10.24)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  — эмпирические константы.

Бэйли, используя в качестве отправной точки описанную выше теорию поиска, рассмотрел большое число работ, из которых ясно, что полная вероятность обнаружения Робн является функцией помех. Если на картине с помехами, характеризуемой по угловым размерам телесным углом  $\Omega_S$ , нужно отыскать объект с угловым размером  $QT$  за время  $I$ , то в соответствии с выводами Бэйли полная вероятность обнаружения равна

$$P_{\text{обн(шт)}} = P_{\text{обн/виз}} [1 - \exp(-6,9I\Omega_T/\Omega_S K)], \quad (10.25)$$

где  $P_{\text{обн/виз}}$  — вероятность того, что наблюдатель обнаружит объект, если он смотрит прямо на него, а  $K$  — эмпирический коэффициент помех, пропорциональный плотности ложных объектов в картине. Типичные значения  $K$  по опубликованным данным, рассмотренным Бэйли, заключены в диапазоне 0,01—0,1. Эксперименты Бэйкера и др., а также Вильямса и Бороу подтверждают эту теорию.

## **10.6. Вероятности классификации и различения**

Насколько известно автору, до сих пор не опубликованы данные о качестве изображения, необходимом для перехода от обнаружения к классификации. Это, однако, не свидетельствует о несущественности классификации как задачи интерпретации изображения. Классификация особенно важна СИИ. Например, обычными ситуациями являются такие, когда известно, что в охраняемом секторе не предполагается наличие своих военных машин или что в определенном секторе должен появиться самолет противника. В этих случаях достаточно только обнаружить объект и классифицировать его как военную машину или самолет, чтобы открыть огонь.

Очень подробно исследовалось влияние изменения какого-либо одного из параметров, характеризующего качество изображения, на вероятность различения простых, представляющих практический интерес объектов. Барнард определил вероятность различения случайным образом ориентированных колец Ландольта и звездообразных мир, в которых отсутствовал один луч, на фоне аддитивных

гауссовых шумов. Он нашел, что результаты точно описываются с помощью модели, основанной на предположении, что система глаз — мозг работает, как оптимальный фильтр. Этот вывод подтверждает представление некоторых специалистов в области физиологии зрительного восприятия, что система глаз — мозг состоит из набора статистически независимых узкополосных фильтров.

Все исследователи сходятся во мнении, что улучшение разрешающей способности прибора наблюдения улучшает характеристики различения и опознавания. Бэйли полагает, что вероятность различения  $P_{\text{разл}}$  связана с наименьшим числом элементов разрешения, содержащимся в наименьшем размере объекта и определенном с 90%-ной вероятностью. Джонсон указал, что для уверенного различения число разрешаемых штрихов на критический размер объекта должно составлять  $4 \pm 0,8$ .

Беннет и др. установили, что при наблюдении с расстояния 380 мм характеристики различения улучшаются с улучшением разрешения до  $\sim 0,25$  мрад; ниже этого уровня существенного улучшения различения не наблюдается. Грининг и Уаймен рекомендуют следующее соотношение:

$$P_{\text{разл}} = \exp [-(r_s/r)^m], \quad (10.26)$$

где  $r_s$  — разрешение приемного устройства, включая глаз, мрад<sup>2</sup>;  $r$  — определенное эмпирическим путем разрешение для данного объекта, мрад<sup>2</sup>;  $m = 1$  при  $r/r_s > 1$  и  $m = 2$  при  $r/r_s < 1$ , причем

$$r = \frac{Q_T [\text{мрад}^2]}{N_T^2};$$

$Q_T$  — телесный угол, под которым виден объект;

$N_T$  — определенное эмпирическим путем число элементов разрешения на объекте.

Их эксперименты в натурных условиях показали, что число элементов разрешения, требуемое для различения с уверенностью 90%, меняется от 3 до 20 в зависимости от сложности объекта. Исследователи фирмы «Боинг» установили, что эффективность извлечения фотографической информации повышается приблизительно пропорционально площади, ограниченной кривой МПФ, и

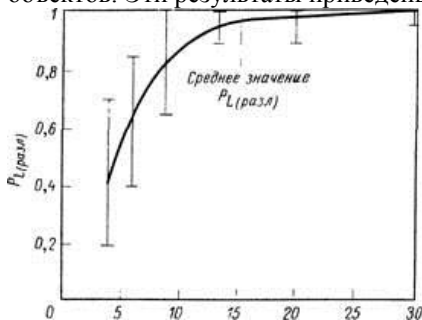
пропорционально  $N_e$  для тех типичных видов МПФ, которые они исследовали.

Наиболее надежные результаты в теории поиска получены при исследовании требуемых для различения и опознавания числа пространственных выборок или строк растра, укладываемых в размер изображения объекта. Результаты Джонстона по исследованию вероятности различения  $P_{\text{разл}}$  телевизионных изображений автомотосредств в функции числа строк растра  $L$ , укладываемых в изображении объекта, достаточно точно описываются формулой (10.27)

$$P_{L(\text{разл})} = 1 - \exp[-0,018(L+1)^2],$$

где  $7 \leq L \leq 13$ .

Ряд натурных исследований, проведенных с системами тепловидения, показали, что для обеспечения 50%-ной вероятности  $P_{\text{разл}}$  необходимо иметь  $4 \pm 1$  строк, укладываемых в размер изображения объекта, а для обеспечения 90%-ной вероятности  $6 \pm 1$  строк. Скотт и др. формировали изображения макетов военных автомашин с выборкой по вертикали при числе строк, укладываемых по высоте изображения объектов 4, 6, 9, 13, 5, 20 и 30. Наблюдателям предлагалось отождествлять изображения автомашин с аналогичными изображениями без выборки и затем вычислялись вероятности правильного различения объектов. Эти результаты приведены на рис. 10.8.



Число строк на высоту объекта

Рис. 10.8. Приделы изменения вероятности различения в зависимости от числа строк, укладываемых по высоте изображения объекта, для всех классов автомотосредств.

Аналогичные исследования провели Холланда и Харабедиан, получив аналогичные результаты.

Гейвен и др. исследовали особенности извлечения информации с помощью фотографий с выборкой с равными интервалами в обоих направлениях с величиной о гауссовой функции рассеяния, равной половине постоянной решетки. Они использовали значения числа строк сканирования на диагональ объекта, равные 22,1, 33,1 и 49,6. Интенсивность изображения квантовалась примерно по равновероятным уровням от 1 до 7 бит (от 2 до 256 уровней). Определялась вероятность различения обработанных таким образом изображений в функции числа строк сканирования  $L$  и числа бит по интенсивности. Результаты представлены на рис. 10.9 и 10.10. По данным этих исследований, не наблюдалось заметного улучшения характеристик на уровне выше 3 бит. С другой стороны, Джонстон, используя замкнутую телевизионную систему, не обнаружил заметной зависимости различения от градаций серой шкалы на экране телевизора для числа градаций от 5 до 9.

Стидмен и Бэйкер исследовали зависимость различения объекта от его углового размера, используя круглые неподвижные фотографические изображения с угловыми диаметрами 4,6; 9,3; 13,9 и 17,7° при дистанции наблюдения 0,6 м. На каждом изображении было 184 объекта произвольной сложной формы из общего набора 557 объектов; 24 объекта подлежали различению; освещенность составляла 215 лк. Все объекты имели высокий контраст и были только слегка размыты.

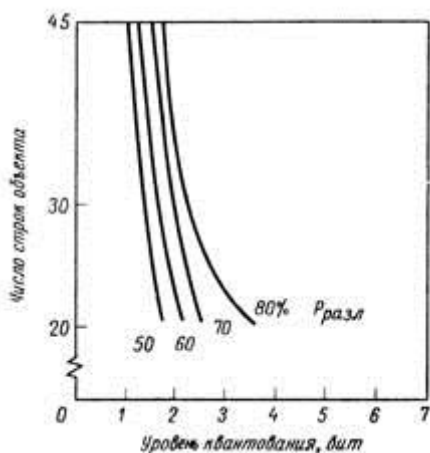


Рис. 10.10. Кривые равной вероятности различения в функции уровня квантования и числа строк, укладываемых в размер изображения объекта .

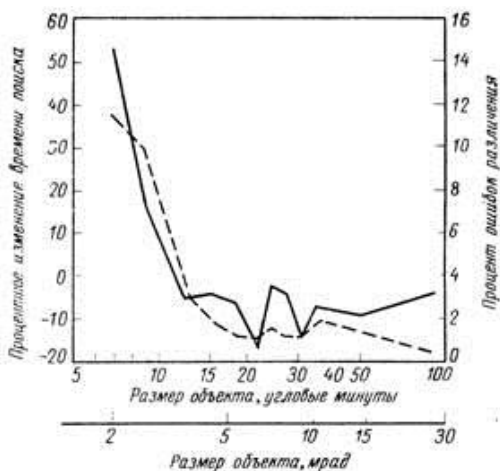


Рис. 10.11. Процентное изменение времени поиска и процент ошибок различения в функции углового размера объекта. ----- время; — — — — — ошибки.



Результаты этих исследований показали, что процентная ошибка различения и времени поиска относительно постоянны для угловых размеров, больших  $12'$ , и резко увеличиваются при угловых размерах, меньших  $12'$ . На рис. 10.11 показаны процентное изменение времени поиска и процент ошибок различения в функции максимального углового размера объекта.

## **10.7. Вероятность опознавания**

Холланда и др. исследовали зависимость опознавания объектов от числа строк сканирования, укладываемых в размер изображения объекта, и от отношения сигнала к шуму в точке. Они использовали 20 макетов бронетанковой техники и получали их изображение с помощью оптико-электронной системы. Число строк сканирования  $L$ , соответствующих высоте объекта, составляло 16, 32 и 48; к изображениям добавлялись гауссовы шумы, чтобы получить значения отношения сигнала к шуму 3, 5, 10, 20 и 45. Эти исследователи построили, в частности, кривые процента правильных опознаваний в функции отношения сигнала к шуму для различных значений числа строк  $L$ , а также кривые  $L$  в функции отношения сигнала к шуму для постоянных условий опознавания. Полученные ими зависимости вероятности опознавания  $P_{\text{опозн}}$  от числа строк сканирования и отношения сигнала к шуму представлены на рис. 10.12—10.15. Основные выводы, сделанные в работе следующие:

1.  $P_{\text{опозн}}$  для наземных объектов военной техники является возрастающей функцией отношения сигнала к шуму вплоть до значений этого отношения, равного 15.
2.  $P_{\text{опозн}}$  для изображений без шумов только на 5% выше, чем  $P_{\text{опозн}}$  при отношении сигнала к шуму 30.
3. С увеличением отношения сигнала к шуму от 20 до бесконечности  $P_{\text{опозн}}$  возрастает максимум на 10%.
4. При отношениях сигнала к шуму 2, 3 и 4 различия в качестве изображения пренебрежимо малы.

Ранее описанные эксперименты Скотта и др. с изображениями, полученными при сканировании картины, позволили определить зависимость  $P_{\text{опозн}}$  от числа строк, укладываемых по высоте изображения объекта (рис. 10.16). Процентное увеличение правильного опознавания при  $L > 20$  очень незначительное; вероятность 50% примерно соответствует значению  $L = 7$ . Изменения  $P_{\text{опозн}}$  при наблюдении под углом  $45^\circ$  и при наблюдении в надир показаны на рис. 10.17.

По данным Хемингуэя и Эриксона, относящимся к вероятности опознавания типографских знаков произвольной формы на телевизионном экране в зависимости от углового размера знаков  $\theta_c$  (мрад) и от числа строк телевизионного разложения, укладываемого в изображении знака, вероятность опознавания достаточно точно описывается формулой

$$P_{\text{опозн}} = 1 - \exp(6,4 \cdot 10^{-3} L \theta_c)^2.$$

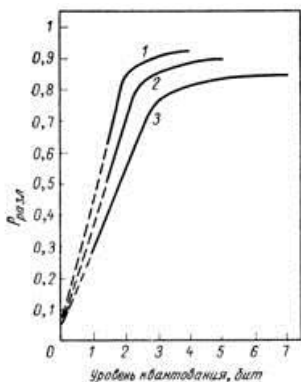


Рис. 10.9. Вероятность различения в функции уровня квантования и числа строк, укладываемых в размер изображения объекта.

Число строк, укладываемых в размер изображения:  
1 — 49,6; 2—33,1; 3—22,1.

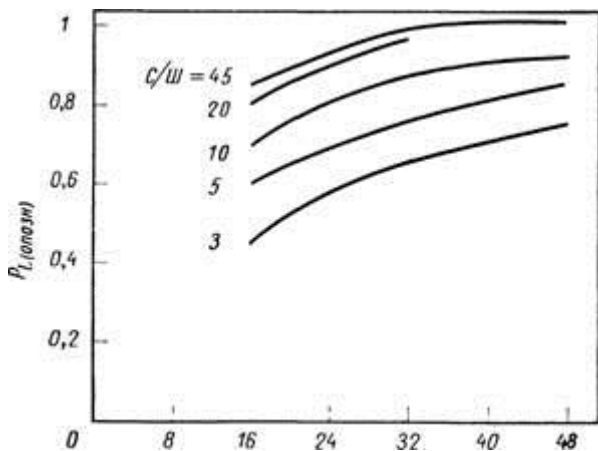
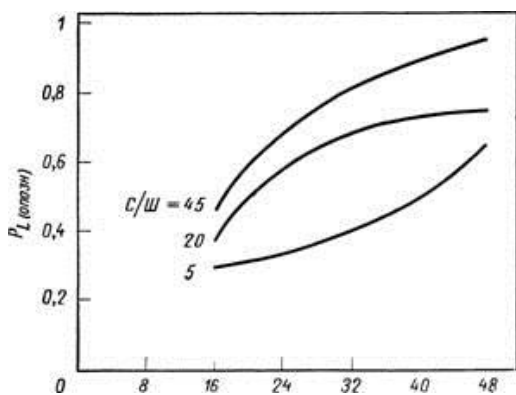
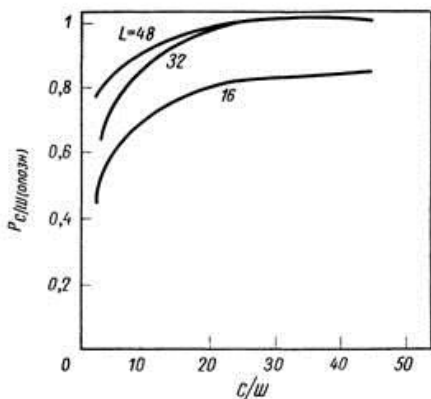


Рис. 10.12. Вероятность опознавания различных военных автомотосредств в функции числа строк  $L$ , укладываемых по высоте изображения объекта, для различных отношении сигнала к шуму  $C/Ш$  в точке .



Число строк на высоту объекта  $L$

Рис. 10.13. Вероятность опознавания танков в функции числа строк  $L$ , укладываемых по высоте изображения объекта, для различных отношений сигнала к шуму  $C/Ш$  в точке.



Число строк на высоту объекта  $L$

Рис. 10.14. Вероятность опознавания различных военных автомотосредств в функции отношения сигнала к шуму  $C/\Pi$  в точке для различного числа строк  $L$ , укладываемых по высоте изображения объекта.

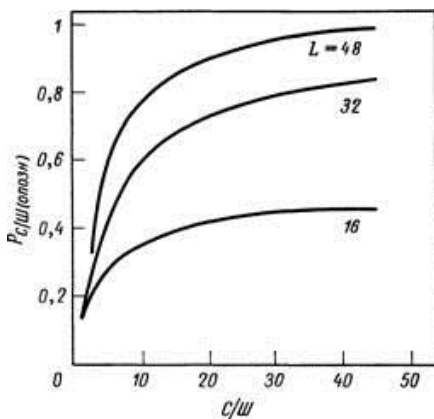
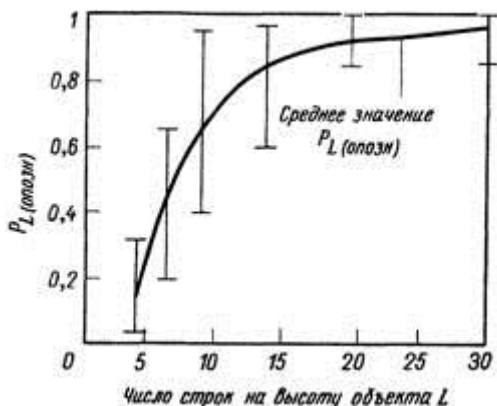


Рис. 10.15. Вероятность опознавания танков в функции отношения сигнала к шуму  $C/\Pi$  в точке для различного числа строк  $L$ , укладываемых по высоте изображения объекта .



Фиг. 10.16. Пределы изменения вероятности опознавания в функции числа строк, укладываемых по высоте изображения объекта, для всех классов автотосредств .

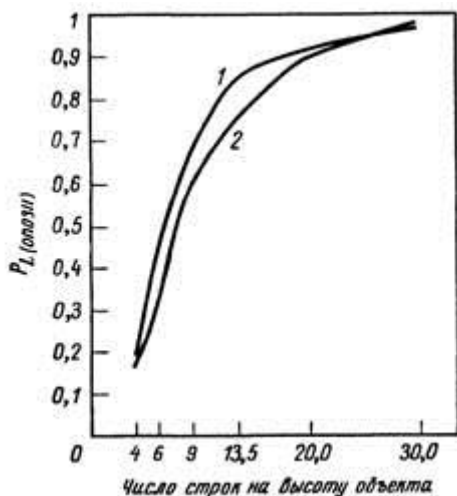


Рис. 10.17. Вероятность опознавания в функции числа строк, укладываемых по высоте изображения объекта, для всех классов автотосредств при наблюдении под углом  $45^\circ$  и в надир .

1 — наблюдение под углом  $45^\circ$ ; 2 — наблюдение в надир.



## **10.8. Эксперименты с обработкой на ЭВМ изображений, полученных системой FLIR**

Экономическая нецелесообразность создания систем FLIR с широким диапазоном изменения параметров для исследования особенностей интерпретации изображений стимулировала моделирование изменений параметров методом специальной обработки изображений. Одно из таких исследований провел Вильямс, который изучал влияние числа строк, укладываемых в размере объекта, увеличения, МПФ и отношения сигнала к шуму на точность различения.

Вильямс с сотрудниками создали цифровой формирователь изображения и использовали его вместе с термографическими изображающими системами для получения изображений с регулируемым ухудшением качества. Целью этих работ было моделирование характеристик изображения для обычных систем FLIR с растровым сканированием, использование этих изображений для количественных исследований влияния изменения параметров на способность наблюдателей различать объекты и установление обобщающих критериев характеристик изображения.

Термографическая система, на которой получалось исходное изображение, практически не имела шумов; отношение ширины к высоте картины составляло 2:1 при 250 строках на высоту кадра; МПФ имела гауссову форму со среднеквадратичным отклонением ФРЛ, равным половине расстояния между строками. Обработка фотографий производилась таким образом, что погрешности в исходном изображении были несущественны по сравнению с ухудшением качества изображения, вносимым при обработке. Каждая фотография передавалась матрицей, состоящей из 250 × 500 элементов, и регистрировалась при числе градаций на каждый элемент, равном 64, т. е. 6 бит. Информация выбиралась, как при процессе строчного сканирования, размывалась в двух направлениях, как от гауссовой функции рассеяния, ухудшалась контролируруемыми шумами и отпечатывалась на пленку растром, имеющим также гауссово рассеяние. Таким образом, было изготовлено 16 экземпляров изображений каждого из десяти типов объектов. При этом параметры изображения варьировались следующим образом:

Число строк растра на высоту картины:	11, 22, 44, 88
Число строк растра на высоту объекта:	3, 6, 12, 24
Величина $a$ гауссовой ФРЛ в долях расстояния между строками:	0,38; 0,48; 0,55; 0,61; 0,67; 0,72
Соответствующие значения гауссовой МПФ на частоте, равной половине строчной частоты:	0,47; 0,33; 0,23; 0,16; 0,11; 0,08
Отношение сигнала к шуму в изображении объекта:	25; 12,2; 6,58; 3,50; 2,04; 1,35

Эти изображения рассматривались затем с различных расстояний, чтобы получить следующие вариации увеличения:

Высота картины (градусы):	0,5; 1; 2; 4
Угловой размер ширины строки растра (мрад):	19,8; 9,9; 4,95; 2,48
Угловой размер объекта (мрад):	23,3; 11,7; 5,82; 2,91

Было проведено 15 тыс. отдельных наблюдений 18 наблюдателями по 160 изображениям с ухудшенным качеством изображения, и была проведена статистическая обработка полученных данных. Результаты Вильямса разошлись с принятым представлением, что небольшие изменения МПФ и отношения сигнала к шуму оказывают сильное влияние на характеристики различения. Вильямс обнаружил, что растровая структура, по-видимому, столь основательно разрушает изображение, что значительные изменения МПФ и отношения сигнала к шуму вызывают весьма небольшое ухудшение характеристик различения. Оценка корреляции переменных параметров качества изображения со степенью различения осуществлялась методом линейной регрессии. Лучшим единым критерием точности различения в этом эксперименте оказалась разрешающая способность по трехштриховому тест-объекту, длина штрихов которого параллельна строкам растра. Другим подходящим параметром является число строк растра, укладываемых в минимальном



размере объекта.

Разрешающая способность по трехштриховому тест-объекту является хорошим критерием, что согласуется с результатами Джонсона для электронно-оптических преобразователей, а также Розелла и Вильсона для телевидения. Преимущества этого критерия заключаются в том, что он учитывает одновременно влияние на реакцию наблюдателя степени выборки, вертикальной функции рассеяния, отношения сигнала к шуму и увеличения. Таким образом, разрешающая способность остается хорошим критерием качества и при наличии выборки.

На рис. 10.18 показано экспериментально полученное предельное разрешение штрихового тест-объекта со штрихами, ориентированными в направлении сканирования.

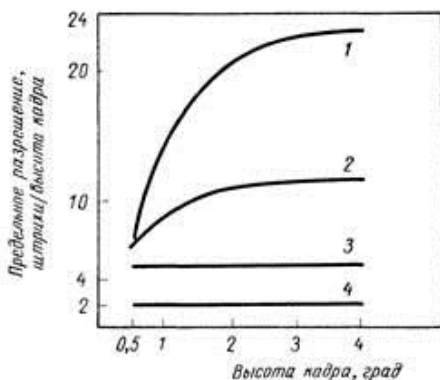


Рис. 10.18. Предельное разрешение трехштрихового тест-объекта. 1 — 88 строк на высоту кадра, 24 строки на объект; 2 — 44 строки на высоту кадра, 12 строк на объект; 3—22 строки на высоту кадра, 6 строк на объект; 4—11 строк на высоту кадра, 6 строк на объект.

Предельное разрешение представлено в функции общей высоты картины для различного числа строк. Из кривых ясно видно влияние роста увеличения при постоянном числе строк. Те же данные приведены на рис. 10.19, чтобы показать влияние роста числа строк при постоянном увеличении.

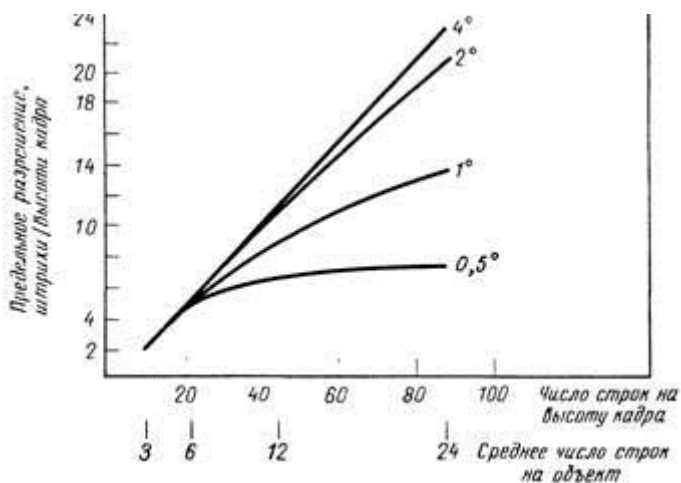


Рис.

10.19. Предельное разрешение трехштрихового тест-объекта. На кривых указана высота кадра в угловых градусах.

Другие результаты, полученные в этих исследованиях, представлены на рис. 10.20—10.23.

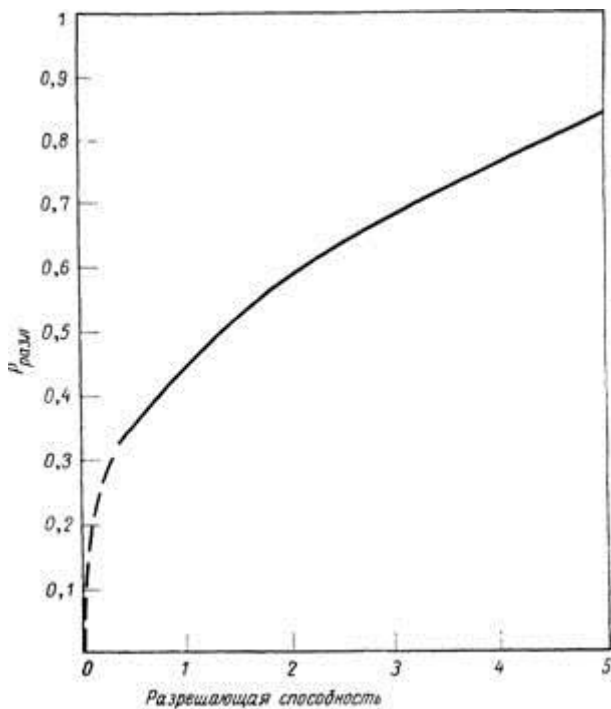
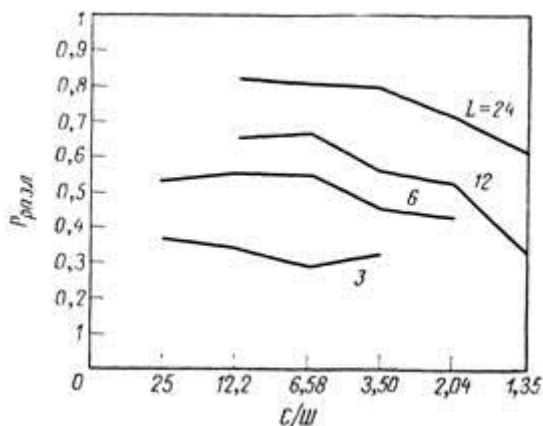
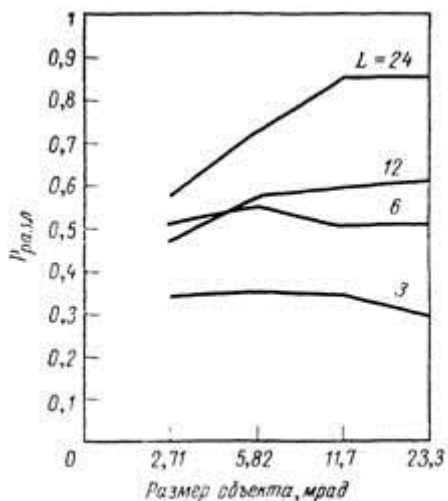


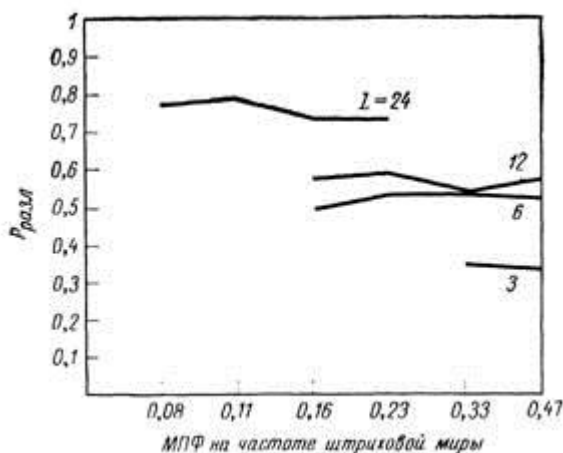
Рис. 10.20. Вероятность различения в функции разрешающей способности (штрихи/высота объекта).



Фиг. 10.21. Вероятность различения в функции отношения сигнала к шуму  $C/ш$  для различного числа строк  $L$ , укладываемых в размере изображения объекта.



Фиг. 10.22. Вероятность различения в функции углового размера объекта для различного числа строк  $L$ , укладываемых в размере изображения объекта.



Фиг. 10.23. Вероятность различения в функции МПФ на частоте, обратной расстоянию между центрами соседних полос тест-объекта, для различного числа строк  $L$ , \*•

Основной вывод из этих исследований заключается в том, что выборка оказывает определяющее влияние на характеристики изображения, а шум и МПФ играют при различении существенно меньшую роль. Это не противоречит многим более ранним исследованиям по интерпретации фотоизображений, в которых была обнаружена сильная зависимость характеристик изображения от МПФ в фотографии. Просто исследования Вильямса показывают,

укладывающихся в размере изображения объекта.

что псевдочастоты при выборке настолько искажают изображение при малом числе строк, укладываемом в размере изображения объекта, что изменения МПФ уже не оказывают существенного влияния на качество изображения.

На основании результатов этих исследований можно сформулировать несколько эмпирических выводов:

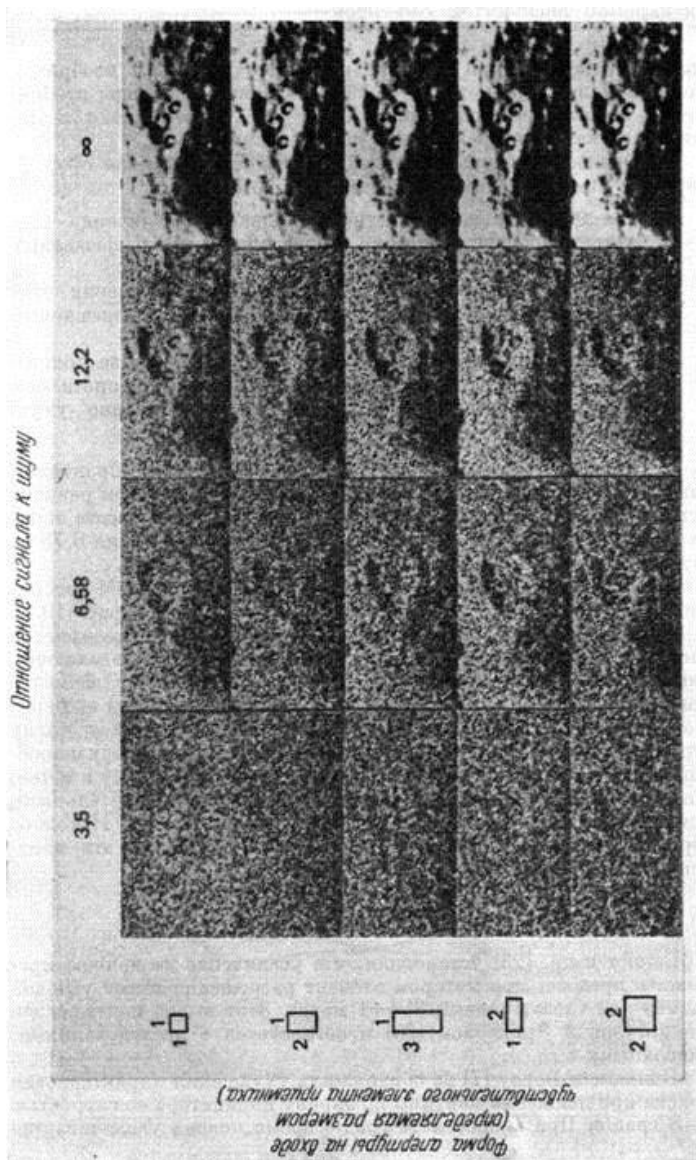
- Для 90%-ной вероятности правильного различения требуется в среднем 24 строки раstra или 12 пар разрешаемых штрихов на высоту объекта.
- Для 50%-ной вероятности правильного различения требуется в среднем 15 строк раstra или 7,5 пары

- разрешаемых штрихов на высоту объекта.
- Угловой размер одной строки растра для глаза должен быть не более 1 мрад и не менее  $\sim 0,5$  мрад, в противном случае характеристики изображения существенно ухудшаются.

Эти цифры хорошо согласуются с современной практикой разработки систем FLIR. Так, при 350 строках и угловом размере чувствительного элемента приемника 0,25 мрад, при высоте экрана 150 мм, рассматриваемого с максимального расстояния 0,75 м, угловой размер строки получается равным 0,57 мрад. Некоторые интересные примеры обработанных на ЭВМ изображений, полученных системой FLIR, показаны на рис. 10.24 и 10.25. Изображения обрабатывались, чтобы моделировать систему с параллельным сканированием, в которой определяющее влияние на МПФ оказывают размеры чувствительного элемента приемника (апертуры на входе) и светодиода (апертура на выходе). На рис. 10.24 показаны изображения, приведенные к числу строк, равному 125, при постоянном размере светодиода и при меняющихся размерах приемника и отношениях сигнала к шуму в точке. На рис. 10.25 показаны изображения с теми же относительными изменениями параметров при числе строк, равном 31. Исходное термографическое изображение, в которое вводились эти изменения, показано на рис. 10.26.

Беннет и др. установили, что увеличение не должно превышать предела, при котором элемент разрешения имеет угловой размер для глаза, равный  $3'$  ( $\sim 1$  мрад). Этот вывод подтвержден Хемингуэем и Эриксоном и согласуется с исследованиями, описанными в гл. 4.

Вильямс и Бороу не обнаружили ухудшения характеристик поиска при движении картины по экрану индикатора со скоростью  $0—8$  град/с. При скорости  $16$  град/с время поиска увеличивается на  $\sim 25\%$ , а при  $31$  град/с — на  $100\%$ . Они установили также, что горизонтальное движение приводит к меньшему ухудшению видения, чем вертикальное.





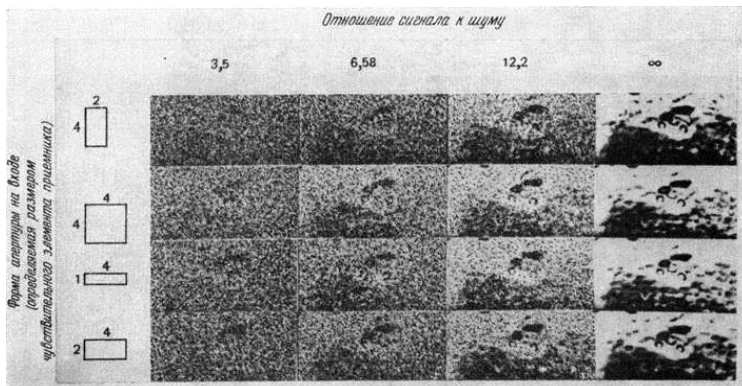
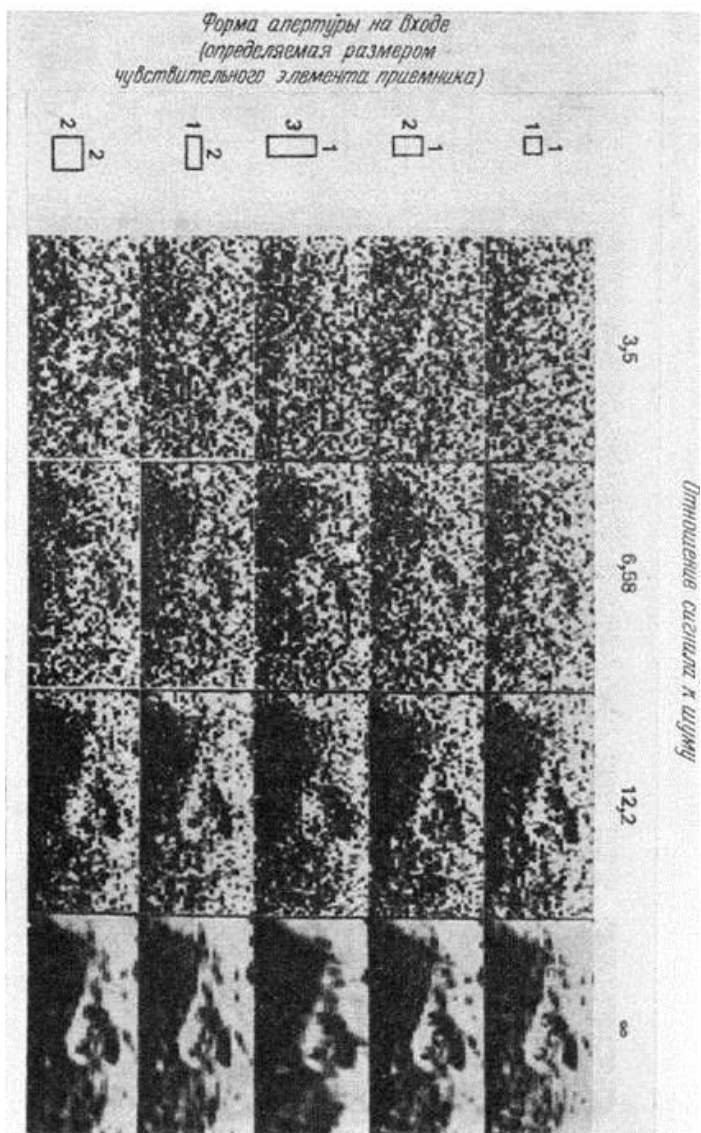


Рис. 10.24, Результаты обработки теплового изображения при числе строк на высоту кадра, равном 125, и квадратной апертуре луча монитора со стороной, равной ширине строки.



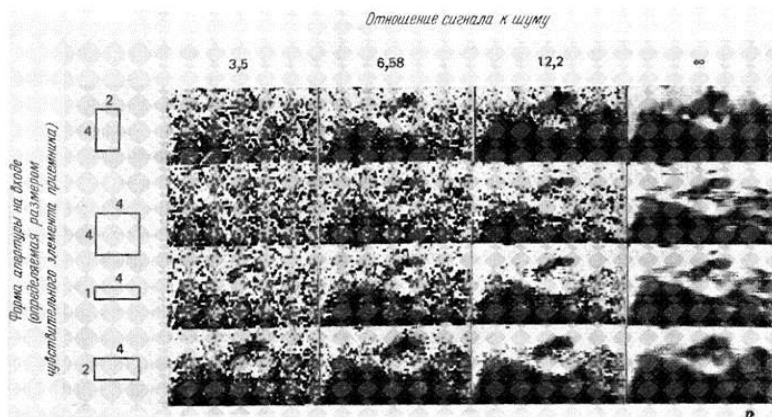


Рис. 10.25. Результаты обработки теплового изображения при числе строк на высоту кадра, равном 31, и квадратной апертуре луча монитора со стороны, равной ширине строки.



Рис. 10.26. Исходное термографическое изображение.

Вильямс и Бороу определили, что разброс по отдельным наблюдателям в способности извлекать информацию составляет 4:1. Аналогично Торнтон и др. установили, что точность оценки изображений, полнота восприятия и время поиска для различных наблюдателей варьируют в отношении 5:1. Эриксон обнаружил, что время поиска уменьшается при повышении периферической

остроты зрения. Беннет и др. нашли, что способность наблюдателей оценивать изображение объекта можно улучшить в 3 раза, если просто заранее сообщить им, что определенный объект (один из возможных) имеется на картине.

Жиклаи создавал быстро меняющуюся последовательность телевизионных изображений, содержащих только вполне определенные объекты, и установил, что в идеальных условиях можно различить от трех до пяти объектов или символов в секунду.

Для экономически эффективного проектирования необходимо обеспечивать только требуемые характеристики. Поэтому следует представлять себе, как взаимосвязаны в системе различные ограничения наблюдения. В качестве примера рассмотрим простую систему, имеющую квадратное поле зрения и растр с примыкающими друг к другу строками без пропусков и перекрытий. Предположим, что для обеспечения эффективности поиска по условиям ограничения размера экрана, восприятия мельканий оптимального коэффициента окружающего фона или по другим причинам мы выбрали угловые размеры экрана  $A' \times A'$  (мрад<sup>2</sup>). Предположим далее, что из общего рассмотрения качества изображения мы выбрали угловое увеличение  $M$ , которое обеспечивает требуемую эффективность совокупности система — глаз. Тогда приемное устройство будет иметь квадратное поле зрения со стороной  $A = A'M$  (мрад).

Предположим теперь, что требуется обеспечить определенную вероятность различения объекта с некоторым критическим линейным размером в метрах на наклонной дальности  $R$  (км). Угловой критический размер объекта  $\theta_C$  (мрад) будет равен отношению линейного критического размера объекта в метрах к дальности в километрах. Требуемая вероятность различения определяет примерное число строк растра (или элементов разрешения для систем без выборки) в угловом размере  $\theta_C$ ; пусть это число будет  $L$ . Тогда одна строка должна иметь угловой размер  $\theta_C$  (мрад). Требуемая вероятность различения определяет также (правда, в менее явном виде) некоторый минимальный угловой критический размер объекта для глаза, скажем  $\theta_c$ , который согласуется с РСВ глаза и спектром пространственных частот объекта. Параметры  $\theta_C$  и  $\theta_c$  связаны соотношением

$$M = \theta_c' / \theta_c, \quad (10.28)$$

но в то же время

$$M = A'/A, \quad (10.29)$$

поэтому

$$A'/A = \theta'_c / \theta_c, \quad \text{или} \quad A = A' \theta_c / \theta'_c. \quad (10.30)$$

Таким образом, поле зрения приемного устройства определяется выбором углового размера экрана, обеспечивающего эффективный поиск, и требованиями по различению. Например, реальные цифры могут быть следующими:  $A' = 160$  мрад ( $\sim 9^\circ$ ),  $\theta = 1$  мрад (3 м/3 км),  $\theta_c = 4$  мрад ( $\sim 12'$ ). Эти значения дают поле зрения  $A = 160 \cdot 1/4 = 40$  мрад =  $2,3^\circ$  и увеличение, равное 4. Если мы выберем  $P_{\text{разл}} = 50\%$ , подходящим значением числа строк будет  $L = 4$ . Тогда угловой размер одной строки составит  $\theta/L = 0,25$  мрад и общее число каналов будет равно  $40 \text{ мрад} / 0,25 \text{ мрад} = 160$ . Наконец, для эффективной дистанции наблюдения экрана  $D$  (м) и для малых значений  $A'$  ширина экрана  $W$  (мм) должна быть равна  $W \ll DA'm$ . При размещении экрана индикатора в кабине оператора дистанция  $D$  может быть равной 0,6 м, так что для нашего примера  $W$  составит  $0,6 * 160 = 96$  мм л;  $\ll 10$  см.

Многие применяемые системы тепловидения не вполне оптимальны, по крайней мере в том отношении, что размер экрана, угловой размер строки, поле зрения и увеличение обычно выбираются независимо. Например, поле зрения может быть выбрано из условия перекрытия определенного участка земной поверхности с определенной высоты, в то время как увеличение выбирается независимо из условия эффективного разрешения. Тогда значительная часть экрана не будет использоваться, поскольку наблюдатель не сможет охватить всю информацию. Опасность спроектировать систему с завышенными характеристиками всегда довольно велика, поскольку технически возможно обеспечить более высокое отношение поля зрения к разрешению по сравнению с тем, которое наблюдатель сможет эффективно использовать. В приведенном выше численном примере число строк 160 на все поле зрения мало для современных систем FLIR с высокими характеристиками. В результате характеристики FLIR обычно ограничиваются не возможностями прибора, а возможностями оператора.



## 11. Измерение характеристик систем

### 11.1. Передаточная функция сигнала и динамический диапазон

Мы определили систему тепловидения как устройство, которое **преобразует оптическое излучение дальнего инфракрасного диапазона в видимое излучение** таким образом, что информацию можно извлекать из полученного изображения. В типичном случае **коэффициент преобразования мощности** можно **регулировать** путем изменения **контраста** и путем изменения **яркости** добавлением произвольного уровня постоянной составляющей. Необходимо уметь описывать и измерять коэффициент преобразования мощности и его зависимость от упомянутых видов регулирования, чтобы наблюдатель мог с уверенностью оптимизировать свою способность извлекать информацию из изображения, манипулируя ручками регулировок. Под этим подразумевается, что могут быть достигнуты удовлетворительные значения коэффициента окружающего фона для ожидаемых условий, что может быть получено изображение, восприятие которого ограничивается шумами, и может быть достигнут высокий контраст изображения.

Для удобства **коэффициент преобразования (как отношение выходной мощности к входной)** измеряют в точке изображения **большого квадратного объекта**. **Входная мощность** обычно выражается как эквивалентная черному телу разность эффективных температур объекта и фона в градусах Цельсия, измеренная в спектральном диапазоне теплового излучения, в котором работает система. **Выходная мощность** обычно представляется яркостью изображения на экране индикатора, оцениваемой в соответствии с дневной кривой видности глаза и измеряемой фотометром .

Преобразование мощности описывается **передаточной функцией сигнала ПФС**, по терминологии Молтона и др. ПФС определяется как световая яркость на выходе системы (на экране индикаторного устройства) в функции разности температур объекта и фона в тест-объекте для различных уровней регулировки (рис. 11.1).

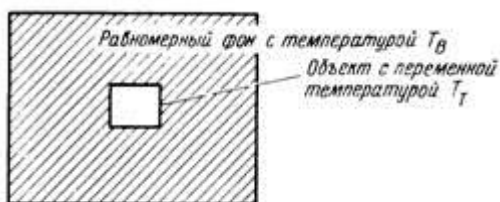


Рис. 11.1. Тест-объект для определения передаточной функции сигнала НФС.

Типичный способ определения ПФС заключается в следующем. Температура квадрата и окружающего его фона устанавливается равной температуре окружающей среды, а яркость и усиление регулируются таким образом, чтобы создать наиболее благоприятные условия наблюдения. На центр изображения квадрата на экране индикатора фокусируется микрофотометр и регистрируется яркость, соответствующая  $\Delta T = 0$ . Затем температура квадрата последовательно получает небольшие приращения и определяется яркость в функции разности температур квадрата и фона. Измерения повторяются для других уровней регулировки, и, таким образом, достаточно полно характеризуется работа системы. Совокупность идеализированных ПФС для различных уровней регулировки яркости  $B$  и регулировки контраста  $C$  показана на рис. 11.2.

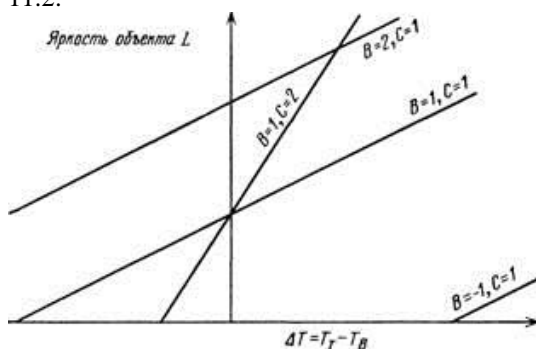


Рис. 11.2. Идеализированные ПФС для различных уровней регулировки яркости  $B$  и контраста  $C$ .



**Динамический диапазон системы** описывается динамическими диапазонами по  $\Delta T$  и яркости, каждый из которых является функцией уровня регулировки и может быть определен по ПФС. Динамический диапазон по  $\Delta T$  есть максимальная разность температур картины, которая передается на экран без нелинейных искажений при определенных условиях регулировки. Максимальный динамический диапазон по  $\Delta T$  равен максимальной разности температур  $\Delta T$ , переданной на экран без искажений при минимальном усилении. Динамический диапазон по яркости — это максимальная яркость, которую может обеспечить система.

### **11.2. Измерение оптической передаточной функции**

Ранее приводилось определение **оптической передаточной функций (ОПФ)** для систем тепловидения и указывался метод ее расчета по результатам измерений **функции рассеяния линии (ФРЛ)**. На рис. 11.3 показана упрощенная типичная схема испытаний, в которой имеется источник излучения (черное тело) в виде линии и которая позволяет измерять ФРЛ и ОПФ. Показаны два варианта: щель фотометра сканирует по изображению неподвижной щели источника или изображение щели источника перемещается по щели фотометра.

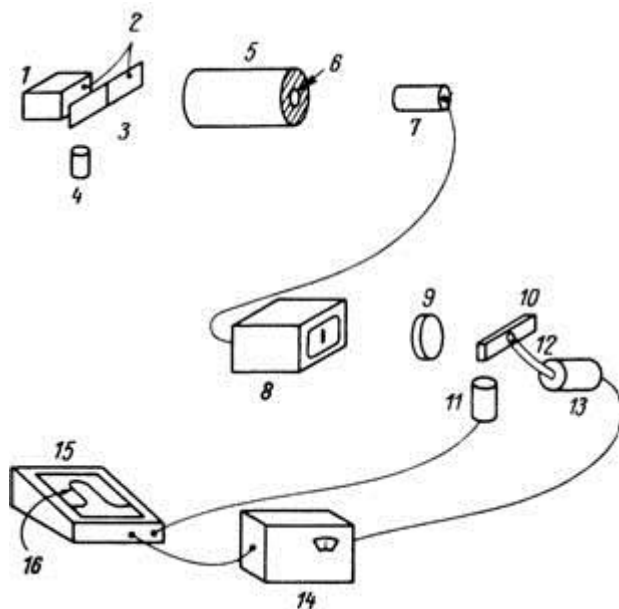


Рис. 11.3. Схема типичной экспериментальной установки для определения функции рассеяния линии ФРЛ.

1 — источник черного излучения; 2 — датчики температуры; 3 — щель (неподвижная или перемещающаяся); 4 — датчик положения щели; 5 — коллиматор инфракрасного излучения; 6 — диафрагма; 7 — приемное устройство; 8 — видеоконтрольное устройство; 9 — объектив фотометра; 10 — щель фотометра (неподвижная или перемещающаяся); 11 — датчик положения щели; 12 — световод; 13 — фотоумножитель; 14 — фотометр; 15 — двухкоординатное регистрирующее устройство; 16 — вид полученной кривой ФРЛ.

Источник излучения в виде линии создается с помощью термоэлектрической холодильной машины или электрически нагреваемой пластины, перед которой установлена непрозрачная маска с профрезерованной или химически вытравленной тонкой щелью. Источник и маска должны иметь одинаковую спектральную излучательную способность и должны позволять регулировать и обеспечивать постоянство разности температур как по температуре, так и по излучательной способности с точностью  $\Delta = 0,05^\circ \text{C}$  для

измерения характеристик тепловизионных систем высокого качества. На схеме, приведенной на рис. 11.3, плоскость маски со щелью расположена в фокальной плоскости инфракрасного коллиматора, а источник находится на достаточном удалении от маски, чтобы свести к минимуму теплообмен излучением между источником и маской.

В идеальном случае кажущаяся и измеренная контактным способом температуры каждой поверхности должны быть одинаковыми, так что температура источника и маски может измеряться термометрами, термисторами или полупроводниковыми диодами, находящимися в контакте с поверхностями. Это более предпочтительный способ, поскольку небольшие разности температур надежнее и дешевле измерять контактными, а не радиометрическими методами.

Излучающая щель должна быть намного уже, чем пространственное разрешение системы, но не настолько узкой, чтобы нельзя было получить достаточного для обеспечения высокого отношения сигнала к шуму излучения, измеряемого в единицах разности температур. Эффективная разность температур щели приблизительно равна действительной разности температур, умноженной на отношение угловой ширины щели к разрешению системы.

Коллиматор может быть линзовым или зеркальным, однако объектив с высоким разрешением, используемый в широком спектральном диапазоне, легче и дешевле изготовить зеркальным. Недостатком зеркальных коллиматоров является необходимость применения диафрагм для исключения попадания на приемник его отраженного расфокусированного изображения и отраженных бликов от посторонних окружающих предметов.

Прежде чем приступить к измерению ОПФ, необходимо знать ОПФ всех измерительных и регистрирующих приборов, а также пространственно-частотный спектр излучающей щели. К приборам, ОПФ которых может отличаться от единицы, относятся коллиматор, микрофотометр и двухкоординатный самописец. Отличный от единицы пространственно-частотный спектр линейного источника влияет на ОПФ измеряемой функции рассеяния, и это необходимо учитывать при расчетах.

Первым этапом при измерении ОПФ является фокусировка приемного устройства на изображение в фокальной плоскости коллиматора и установка приемного устройства таким образом, чтобы щель оказалась перпендикулярной направлению, в котором предполагается измерить ОПФ. Если в системе есть окуляр, его

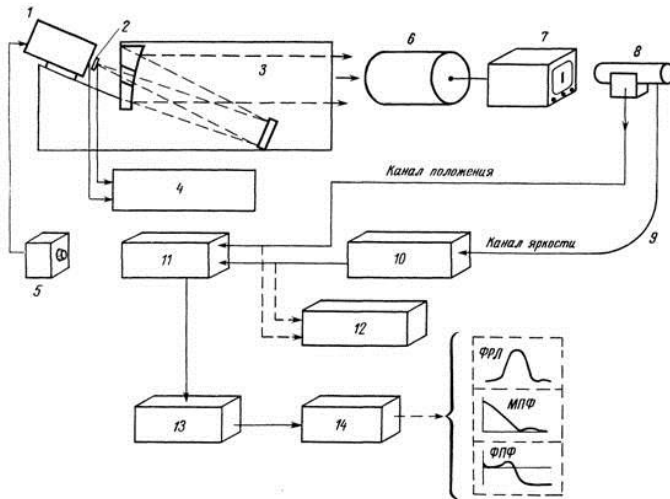
необходимо отрегулировать, чтобы выходящий пучок был параллельным. Затем изображение щели на экране необходимо сфокусировать на сканирующую щель фотометра, обеспечив параллельность обеих щелей.

Второй этап заключается в определении масштабного коэффициента для данного эксперимента, т. е. переводного коэффициента от миллиметров в плоскости сканирующей щели фотометра к миллирадианам в пространстве объектов. Это позволяет перевести ФРЛ, измеренную по миллиметровой шкале, в шкалу миллирадиан в выбранной плоскости объекта. Способ определения коэффициента перевода, который сводит к минимуму ошибку из-за рассеяния изображения, заключается в использовании штрихового тест-объекта с известным угловым периодом и определении усредненных расстояний между пиками яркости на экране индикатора.

Третьим этапом в измерении ОПФ является установление условий существования ОПФ, определенных ранее, а именно: линейности, пространственной инвариантности и высокого отношения сигнала к шуму. По-видимому, требование пространственной инвариантности будет выполняться, если выбрать достаточно малый участок на экране для проведения измерений. Однако чрезвычайно трудно обеспечить одновременно выполнение требований линейности и низкого уровня шумов, поскольку, по существу, все системы имеют шумы, являются нелинейными и обладают ограниченным динамическим диапазоном. Таким образом, достаточно яркое изображение, характеризуемое высоким отношением сигнала к шуму, вероятно, будет обрабатываться нелинейно, в то время как линейно преобразуемое изображение, по-видимому, будет иметь большие шумы. По этой причине важно знать вид передаточной функции сигнала. Еще одна, связанная с обеспечением надлежащих условий измерения задача заключается в том, что фотоумножитель, используемый для измерения яркости экрана, должен быть относительно малозащумленным и иметь линейную характеристику. Существенным на третьем этапе является выбор эффективной разности температур, обеспечивающей отношение сигнала к шуму, равное  $\sim 10$  или более, а также выбор такого уровня регулировки яркости и контраста системы, при котором ПФС была бы практически линейна во всем диапазоне изменения сигнала к шуму. Четвертый этап заключается в формировании функции рассеяния линии (ФРЛ) и зондировании ее движущейся щелью фотометра. Движение щели должно быть медленным, чтобы кадровая развертка в системе совместно с движением щели не приводила к

недостаточному числу выборок ФРЛ. Медленное движение позволяет также сузить полосу подавляющего шума электрического фильтра без искажения ФРЛ. ФРЛ обычно регистрируется двухкоординатным самописцем, хотя может использоваться описанная ниже более сложная техника автоматической записи. Можно приближенно осуществить преобразование ФРЛ, приводя ее к такой функции, преобразование которой известно, например к гауссовой. Однако, за исключением некоторых частных случаев, такой способ недостаточно точен, и преобразование ФРЛ приходится производить с помощью ЭВМ. В полученную ОПФ требуется затем вносить поправки, учитывающие ошибки измерений, для чего ее делят на ОПФ измерительной аппаратуры и пространственно-частотный спектр линейного источника.

Изложенная в общих чертах методика определения ОПФ требует больших затрат времени и весьма утомительна, поэтому желательно автоматизировать получение данных. Обычно исследователю приходится несколько раз измерять характеристики, прежде чем ему удастся решить все экспериментальные проблемы и получить удовлетворительные результаты. Таким образом, процесс измерений вполне может занять целый рабочий день. Молтон и др. объединили установку для определения ОПФ с цифровыми электронными вычислительными устройствами, чтобы уменьшить ошибки, связанные с определением ОПФ вручную. Принципиальная схема такой установки с ЭВМ показана на рис. 11.4.



1 — термоэлектрический источник холодного фона; 2 — объект; 3 — коллиматор; 4 — цифровой термисторный термометр; 5 — дистанционный регулятор температуры; 6 — сканирующее устройство; 7 — индикаторное устройство; 8 — сканирующая щель микрофотометра; 9 — волоконнооптический световод; 10 — фотометр; 11 — аналого-цифровой преобразователь; 12 — двухкоординатное регистрирующее устройство; 13 — ЭВМ; 14 — графопостроитель.

Аналоговое напряжение, соответствующее амплитуде ФРЛ при определенном положении сканирующей щели, поступает на управляемый вычислительной машиной двухканальный аналого-цифровой преобразователь, а затем в память вычислительной машины. ЭВМ производит быстрое фурье-преобразование ФРЛ и строит графики ФРЛ, МПФ и ФПФ. Пример полученных таким образом графиков был приведен ранее.

Имеется множество экспериментальных погрешностей, которые могут привести к тому, что результаты определения ОПФ окажутся неверными. Сендалл указывает, что высокое мгновенное значение яркости элемента разложения на экране индикатора, требуемое для достижения приемлемой средней яркости в системах с быстройкадровой разверткой, может вызвать насыщение сигнала используемого фотоумножителя. Поэтому следует обеспечить

соответствующий динамический диапазон работы фотоумножителя. Браун указал, что для систем с окуляром входной зрачок фотометра при измерении ФРЛ должен быть согласован со зрачком глаза. Это предотвращает влияние aberrаций объектива, не видимых оператором, которые в противном случае вносят свой вклад в ОПФ, и последняя окажется несогласованной с условиями зрительного восприятия. Другой проблемой при измерении ОПФ является трудность оценки точности результатов. Возможно, лучший способ проверки правильности полученных результатов заключается в сравнении измеренных значений ОПФ с ожидаемыми и с экспериментальными данными по  $\Delta T_{\text{разр}}$ .

Рис. 11.4. Схема автоматической экспериментальной установки для определения оптической передаточной функции ОПФ.

### **11.3. Измерение минимальной разрешаемой разности температур**

Минимальная разрешаемая разность температур  $\Delta T_{\text{разр}}$  была определена в гл. 5 как эквивалентная черному телу разность температур объекта и фона (фиг. 5.5), при которой отдельные штрихи объекта на данной частоте разрешаются наблюдателем. При проектировании установки и разработке методики измерений нужно обеспечить условия, необходимые для определения  $\Delta T_{\text{разр}}$ . Система должна иметь такой уровень регулировки или такие пределы его изменения, чтобы ее характеристики были практически линейными и шумы были хорошо видны на экране индикатора. Таким образом, возможности системы будут ограничены скорее шумами, а не недостаточно высоким контрастом. Насколько выполняется первое условие, можно проверить, обратившись к кривым ПФС, в то время как в справедливости второго можно убедиться только по субъективной оценке наблюдателем уровня шумов. Тест-объекты можно устанавливать на конечном расстоянии, и тогда объектив должен быть сфокусирован на это расстояние, а можно рассматривать и на бесконечности, для чего их нужно поместить в фокальную плоскость коллиматора. Установка на конечном

расстоянии имеет тот недостаток, что тест-объекты с низкой частотой должны быть довольно большими. В этом случае обеспечение и контроль равномерности излучения объекта могут вызывать значительные трудности. В рассматриваемой здесь методике предполагается, что при испытаниях используется коллиматор.

Необходимо иметь достаточно большой набор тест-объектов, чтобы перекрыть диапазон пространственных частот системы. Требуется определить положение фокальной плоскости коллиматора и помещать тест-объекты именно в этой плоскости. Излучательные способности объекта и фона должны быть одинаковыми, постоянными и известными. Аппаратура, обеспечивающая получение и контроль приращения температуры, должна быть прокалибрована. Источник нагревания объекта должен быть стабильным, контролируемым и должен обеспечивать пространственную равномерность нагревания  $+0,01^{\circ}\text{C}$ . Точность такого же порядка должны обеспечивать приборы, измеряющие температуру. Коллиматор должен иметь диафрагмы, а приемное устройство должно располагаться таким образом, чтобы свести к минимуму блики от окружающих предметов на приемник.

Спектральная характеристика и ОПФ коллиматора не должны оказывать нежелательного воздействия на приемное устройство.

Наблюдатель, или наблюдатели, проводящие испытания, должны иметь высокую остроту зрения и нормальное цветовое зрение. Они должны быть хорошо знакомы с тепловыми изображениями и уметь интерпретировать изображение в присутствии шумов. Они должны быть адаптированы на среднюю яркость экрана индикатора, а уровень окружающей яркости в лаборатории должен быть примерно согласован с уровнем яркости экрана. Кроме того, наблюдатели должны иметь достаточный опыт в установке и воспроизведении условий, при которых их способность к различению объектов достаточно высока.

Типичный порядок проведения испытаний следующий. Приемное устройство исследуемой системы помещают на пути пучка лучей из коллиматора и соответствующим образом фокусируют. В поле зрения в известной наблюдателю позиции располагают тест-объект самой низкой частоты и разность температур  $\Delta T$  устанавливают равной  $0^{\circ}\text{C}$ . Затем достаточно медленно сообщают  $\Delta T$  положительные значения, чтобы обеспечить равномерность излучения объекта и точность измерения температуры и чтобы дать наблюдателю достаточное время для принятия правильного



решения. Наблюдатель определяет величину  $\Delta T$ , при которой он разрешает штрихи объекта. Затем процедура повторяется для все более высоких частот до тех пор, пока наблюдатель оказывается не в состоянии разрешить штрихи, какова бы ни была  $\Delta T$ . Для определения отрицательной ветви  $\Delta T_{\text{разр}}$ : можно использовать отрицательные  $\Delta T$ , достаточно малые, чтобы не нарушить линейность характеристик системы как при положительных, так и отрицательных контрастах (обычно только на низких частотах). Это позволит оценить любые изменения температуры при испытаниях.

#### **11.4. Измерение эквивалентной шуму разности температур**

Рассмотрение результатов измерения эквивалентной шуму разности температур  $\Delta T_{\text{пор}}$  не имеет смысла, если не приведены характеристики ограничивающего шуму электрического фильтра, используемого при измерениях. Для стандартизации и облегчения сравнения желательно использовать однозвенный ЛС-фильтр нижних частот, полоса частот которого (по уровню 3 дБ) равна обратной величине удвоенного времени элемента разложения. Чтобы сохранить высокое качество изображения, электрическая фильтрация шумов в самой системе обычно минимальна, и этот эталонный фильтр часто делают внешним, т. е. он, по существу, является частью экспериментальной установки.

Чтобы учесть в измерениях все источники шумов, принято брать сигналы с последней ступени схемы обработки в аналоговой форме, т. е. до коммутатора или широтно-импульсного модулятора. Если эта точка доступна, проведение испытаний для определения  $\Delta T_{\text{пор}}$  будет тривиально. Нужно просто сформировать большой квадратный объект, излучающий как черное тело, угловой размер которого в несколько раз превосходит разрешение системы и температура которого больше ожидаемого значения  $\Delta T_{\text{пор}}$  примерно в 10 раз, а затем измерить полную (от максимума до минимума) амплитуду сигнала и среднеквадратичное значение шума в электронном изображении этого объекта. Величина  $\Delta T_{\text{пор}}$  определяется тогда как частное от деления разности температур на отношение максимального значения амплитуды сигнала к среднеквадратичному значению шума. Необходимо обеспечить условия, при которых характеристики системы являются линейными, а помехи, которые не попадают на экран индикатора, такие, как переходные процессы при

коммутации или сигналы отметок, появляющиеся в то время, когда трубка индикатора заперта, не оказывают влияния на измерения. Хотя  $\Delta T_{\text{пор}}$  — довольно сомнительный критерий качества, он, по-видимому, будет еще долго использоваться, поскольку для его измерения не требуется такой сложной аппаратуры и методики, как для определения ОПФ и  $\Delta T_{\text{разр}}$  и каждый может определить  $\Delta T_{\text{пор}}$  достаточно точно.

### Литература

1. В.Ф.Асмус. Проблема интуиции в философии и математике. «Мысль», М.1965.
2. Дж. Барвайс. Введение в логику первого порядка. Справочная книга по математической логике. Ч.1. «Наука», М.1982. Пер. с англ.: Handbook of mathematical logic. J. Barwise (Ed). North-Holland P.C. 1977.
3. Дж.Булос, Р.Джеффри. Вычислимость и логика. М. «Мир» 1994. Пер. с английского: George S. Boolos, Richard C. Jeffrey. Computability and logic. Cambridge University press, 1989.
4. Е.А.Беляев, В.Я.Перминов. Философские и методологические проблемы математики. Изд-во Московского университета, 1981.
5. М.Бунге. Интуиция и наука. «Прогресс», М. 1967. Пер. с английского: M.Bunge. Intuition and Science. New York, 1962.
6. Н.Бурбаки. Начала математики. Ч.1, кн.1. Теория множеств. Мир. М. 1965. Пер. с французского.: Elements de Mathematique par N.Bourbaki. Livre 1. Theorie des ensembles. Troisieme edition, 1958.
7. Е.Вигнер. Непостижимая эффективность математики в естественных науках. УФН, т.94, вып.3, 1968, 535 – 546. Пер. с англ.: E.Wigner. The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences, Comm. Pure and Appl. Math. 131, 1 (1960).
8. Р.Декарт. Правила для руководства ума. Избранные произведения. М.1950. Пер. с французского: Descartes R. Oeuvres, t. X. Paris, 1908.
9. М.Клайн. Математика. Утрата определённости. М. «Мир», 1984. Пер. с англ.: Morris Kline. MATHEMATICS. The Loss of Certainty. N-Y, Oxford University Press, 1980.
10. С.К.Клини. Введение в метаматематику. ИЛ М. 1957. Пер.с англ. : Introduction tu metamathematics by Stephen Cole Kleene. 1952.

D.van Nostrand Company, inc. New York , Toronto.

11. М.Кац, С.Улам. Математика и логика. Ретроспектива и перспективы. «Мир», М. 1971. Пер. с англ.: Mathematics and Logic. Retrospect and Prospects. Mark Kac and Stanislaw M. Ulam. N.-Y. Washington. London. 1968.

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](http://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](http://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](http://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.diit.edu.ua:81/ft/index\\_ru.html](http://ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html)

16. А.Е. Кононюк. Информациология. Общая теория информации. Кн.2. Киев: «Освіта України», 2011. 476 с. [ecat.diit.edu.ua:81/ft/index\\_ru.html](http://ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html)

17. А.Е. Кононюк. Информациология. Общая теория информации. Кн.3. Киев: «Освіта України», 2011. 412 с. [ecat.diit.edu.ua:81/ft/index\\_ru.html](http://ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html)

18. А.Е. Кононюк. Информациология. Общая теория информации. Кн.4. Киев: «Освіта України», 2011. 488 с. [ecat.diit.edu.ua:81/ft/index\\_ru.html](http://ecat.diit.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.diit.edu.ua:81/ft/index\\_ru.html](http://ecat.diit.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.diit.edu.ua:81/ft/index\\_ru.html](http://ecat.diit.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.diit.edu.ua:81/ft/index\\_ru.html](http://ecat.diit.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.diit.edu.ua:81/ft/index\\_ru.html](http://ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html)
26. А.Е. Кононюк. Общая теория распознавания. Кн.1. Киев: «Освіта України», 2012. 584 с. [ecat.diit.edu.ua:81/ft/index\\_ru.html](http://ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html)
27. А.Е. Кононюк. Общая теория распознавания. Кн.2. Киев: «Освіта України», 2012. 588 с. [ecat.diit.edu.ua:81/ft/index\\_ru.html](http://ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html)
28. А.Е. Кононюк. Консалтология. Общая теория консалтинга. Кн.1. Киев: «Освіта України», 2013. 448 с. [ecat.diit.edu.ua:81/ft/index\\_ru.html](http://ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html)
29. А.Е. Кононюк. Консалтология. Общая теория консалтинга. Кн.2. Киев: «Освіта України», 2013. 412 с. [ecat.diit.edu.ua:81/ft/index\\_ru.html](http://ecat.diit.edu.ua:81/ft/index_ru.html)
30. А.Е. Кононюк. Консалтология. Общая теория консалтинга. Кн.3. Киев: «Освіта України», 2013. 520 с. [ecat.diit.edu.ua:81/ft/index\\_ru.html](http://ecat.diit.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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](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
105. Дж. Ллойд. Системы тепловидения. Москва, 1978