

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НОВГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ЯРОСЛАВА МУДРОГО

Н. П. Корнышев

ТЕЛЕВИЗИОННАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Учебное пособие

ВЕЛИКИЙ НОВГОРОД
2011

УДК 621.397.13(075.8)
ББК 32.94я73
К67

Печатается по решению
РИС НовГУ

Р е ц е н з е н т ы:

кандидат технических наук, доцент **Р. Н. Шабалин**
кандидат технических наук, начальник отделения ФГУП НИИ ПТ «Растр»
А. В. Кузнецов
начальник сектора ФГУП НИИ ПТ «Растр» **Н. С. Никитин**

Корнышев, Н. П.
К67 Телевизионная визуализация: учеб. пособие (издание переработанное) / Н. П. Корнышев; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2011. – 164 с.

Рассматриваются теоретические аспекты создания систем телевизионной визуализации, а также основные методы и принципы, лежащие в их основе, а именно: принцип развертки, принцип накопления, методы преобразования «свет – сигнал» и «сигнал – свет», методы внутри- и межкадровой обработки и т.п. Приводятся конструктивные особенности и технические характеристики аппаратуры, предназначенной для этих целей.

Предназначено для студентов, аспирантов, преподавателей радиотехнических специальностей, а также специалистов, занимающихся проектированием телевизионных систем прикладного назначения и их эксплуатацией.

УДК 621.397.13(075.8)
ББК 32.94я73

© Новгородский государственный
университет, 2011
© Н. П. Корнышев, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ИЗ ИСТОРИИ ТЕЛЕВИДЕНИЯ.....	6
Глава 1. ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ.....	9
1.1. Система визуализации как система связи и информационная машина.....	9
1.2. Модели системы связи	12
1.3. Информационная оценка системы телевизионной визуализации	16
1.4. Пропускная способность системы. Избыточность и энтропия изображения.....	17
1.5. Статистические свойства сигналов изображения.....	19
1.6. Теорема Котельникова применительно к телевидению	19
1.7. Предельная пропускная способность канала связи.....	21
Глава 2. ЭЛЕМЕНТЫ ФОТОМЕТРИИ, ОПТИКИ И КОЛОРОМЕТРИИ	22
2.1. Основные фотометрические величины	22
2.2. Основные понятия и законы оптики	24
2.3. Об особенностях зрения	33
Глава 3. ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ	42
3.1. Задачи телевизионной системы.....	42
3.2. Принцип развертки	42
3.3. Сигналы яркости изображения.....	43
3.4. О принципах образования сигналов цветного изображения	47
3.5. Принципы образования сигналов в совместимых цветных ТВ-системах	49
Глава 4. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ «СВЕТ – СИГНАЛ».....	56
4.1. Фотоэффект и его закономерности	56
4.2. Способы преобразования «свет – сигнал»	58
4.3. Принципы действия передающих телевизионных устройств..	60
4.4. Твердотельные преобразователи «свет – сигнал».....	65
4.5. Пороговый контраст и отношение сигнал/шум.....	83
4.6. Цветные матричные преобразователи «свет – сигнал»	85
4.7. Принципы тепловидения.....	87

Глава 5. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ «СИГНАЛ – СВЕТ».....	90
5.1. Катодolumинесценция и люминофоры	90
5.2. Принцип работы кинескопа	90
5.3. Принцип работы жидкокристаллических экранов	93
5.4. Принцип работы плазменных экранов	94
5.5. Автоэмиссионные панели	95
5.6. Светодиодные экраны и видеопроекторы	96
5.7. Применение ЭВМ для просмотра и записи изображений	96
Глава 6. ОБ ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	101
6.1. Условная классификация методов обработки изображений....	101
6.2. Методы внутрикадровой обработки	102
6.3. Методы межкадровой обработки	112
6.4. Цифровое кодирование видеосигнала	119
Глава 7. МЕТОДЫ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ	123
Глава 8. ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	135
Глава 9. МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ	147
9.1. Автоматический анализ. Методы счета.....	147
9.2. Методы автоматического количественного анализа	151
9.2.1. Последовательный анализ	151
9.2.2. Параллельный анализ	157
9.3. Интерактивный анализ	157
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	160
ЛИТЕРАТУРА	161

ВВЕДЕНИЕ

Задачей визуализации является получение изображения исследуемого объекта (сцены), что весьма важно для практической деятельности человека, поскольку благодаря зрению мы воспринимаем свыше 80% информации об окружающем мире.

В настоящем учебном пособии рассматриваются электронные методы визуализации, основанные на получении и преобразовании электрического сигнала, несущего информацию о двумерном изображении, и связанные с принципом развертки (сканирования). Этот принцип, впервые реализованный в телевидении, стал универсальным и был впоследствии успешно применен для решения задач визуализации распределения различных поверхностных или объемных неоднородностей исследуемых объектов. Таким образом, методы визуализации тесно связаны с опытом разработки телевизионных средств получения, передачи и воспроизведения изображений.

Исходно под телевидением понималась область науки и техники, занимающаяся получением и передачей оптических изображений на основе методов преобразования «свет – сигнал» и «сигнал – свет». Однако визуализация не ограничивается получением и передачей изображений в видимой области спектра. Так, например, методы визуализации позволяют существенно расширить наблюдаемый спектральный диапазон за счет трансформации рентгеновского, ультрафиолетового, инфракрасного излучения в видимый свет. При помощи соответствующих сканирующих датчиков можно трансформировать в видимый свет картину распределения таких неоднородностей структуры объекта, как, например, силовые линии магнитного поля (магнитооптический эффект) или акустические волны, отраженные от неоднородностей исследуемого объекта. Таким образом, визуализация – понятие достаточно широкое и включает в себя различные методы получения изображений, которые основаны на поэлементном сканировании исследуемой сцены, получении сигнала от каждого элемента и его преобразовании в электрический сигнал для передачи, хранения и воспроизведения. В качестве воспроизводящего устройства обычно используется экран телевизионного или компьютерного монитора. Как правило, в современных системах визуализации компьютер является составной частью, на которую возлагается как функция воспроизведения изображений, так и функция их обработки с целью улучшения качества, получения количественных характеристик, хранения, документирования и обмена информацией через компьютерные сети.

Неотъемлемой частью для систем визуализации является канал связи, по которому передается электрический сигнал. Канал связи может быть минимальным и включать в себя, например, некоторый видеотракт, связывающий датчик с воспроизводящим устройством, или, наоборот, достаточно сложным, предполагающим передачу и прием радиосигналов по эфиру на значительном расстоянии от датчика сигнала. При этом параметры сканирования и методы формирования сигналов для различных сканирующих

устройств будут разные, требования к каналу связи также специфичны, а к преобразователю «сигнал – свет» требования будут единые.

ИЗ ИСТОРИИ ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Термин «телевидение» подразумевает получение и передачу изображений или информации о них при помощи электрических сигналов. Для создания телевидения необходимо было решить три важнейшие проблемы:

1. Преобразование лучистой (в частности световой) энергии в электрический сигнал.
2. Передача электрических сигналов на расстояние.
3. Преобразование электрических сигналов в световые.

Это оказалось возможным благодаря успехам в области физики в конце XIX – начале XX в., в частности:

- 1873 г. – открытие У. Смита (США) светочувствительности селена;
- 1873 г. – изобретение А.Н. Лодыгиным (Россия) электрической лампочки;
- 1887 г. – открытие Г. Герцем (Германия) внешнего фотоэффекта;
- 1888–1890 гг. – установление А.Г. Столетовым (Россия) основных закономерностей фотоэффекта;
- 1895 г. – изобретение А.С. Поповым (Россия) радио;
- 1897 г. – изобретение К. Грауном (Германия) катодной (электронно-лучевой) трубки;
- 1906 г. – создание Ли де Форестом (США) трехэлектродной лампы (триод).

Идея создания первой ТВ-системы была предложена в 1875 г. Дж. Керри (США). Мозаика из селеновых фотоэлементов, на которую проецируется передаваемое изображение, при помощи множества проводов соединяется с соответствующими электрическими лампочками на приемном экране. В каждом элементе мозаики и связанном с ним проводе пропорционально освещенности элемента возникает электрический ток. Свечение лампочки пропорционально этому току. Совокупность лампочек дает мозаичное изображение объекта.

Таким образом, основная идея – *разложение* (разбиение) изображения на *элементы* и передача средней яркости каждого элемента – это основа всех последующих ТВ-систем.

ТВ-система Керри *многоканальная*, и это ее недостаток, поскольку, например, для современного телевидения обычной четкости (625 строк с числом элементов в строке 800) число каналов, которые необходимо одновременно использовать, составит 500 000, что нереально.

С 1877 по 1888 г. независимо друг от друга проекты *одноканальных* ТВ-систем предложили П.И. Бахметьев (Россия), М. Санлек (Франция), А. де Пайва (Португалия). Все системы основаны на инерционности зрительного восприятия, благодаря которой становится возможной передача информации о яркости элементов изображения *последовательно*. Последовательное преобразование яркостей отдельных элементов изображения в электрический сигнал называется *разверткой* изображения.

Первые развертки были механическими. В «фототелеграфе» Бахметьева развертка осуществлялась за счет движения фотоэлемента по спирали в фокальной плоскости изображения. Наиболее удачно с практической точки зрения проблема механической развертки была решена в 80-х гг. XIX в. польским инженером Паулем Нипковым. Оптико-механическое устройство, известное как диск Нипкова, содержало ряд отверстий, расположенных по спирали Архимеда. Диски располагались на передающей (перед фотоэлементом) и приемной (перед лампочкой) сторонах. При достаточной скорости и синхронном вращении знаков движущаяся светящаяся точка воспринималась как слитное изображение. Яркость свечения лампочки пропорциональна сигналу с выхода фотоэлемента. ТВ-системы с механической разверткой с числом строк, равным 30 (1200 элементов разложения), существовали в конце 20-х – начале 30-х гг. XX в. в Англии, США, СССР.

Принципиально новой и весьма плодотворной явилась идея развертки изображения электронным лучом Б.Л. Розинга (Россия), который еще в 1907 г. получил патент на способ передачи изображений на расстояние. Б.Л. Розинг создал так называемое «безынерционное перо», превратив осциллографическую трубку в приемную телевизионную, способную воспроизводить полутону за счет модуляции электронного луча. В 1911 г. Розинг демонстрировал первое изображение – черные и белые полосы на экране. Так началась и до сих пор продолжается эра «электронного телевидения».

Ученик Розинга В.К. Зворыкин, эмигрировавший в США, стал создателем в начале 30-х гг. первой передающей трубки с накоплением – иконоскопа – и вещательной телевизионной системы, которая начала действовать в США.

Передающие трубки продолжали совершенствоваться, и в последующем появились так называемые супериконоскопы, а затем – суперортиконы – высокочувствительные трубки с двусторонней мишенью, на основе которых в конце 40-х гг. начали создаваться телецентры, работающие в стандарте разложения 625 строк.

Параллельно с развитием черно-белых ТВ-систем шла разработка цветных ТВ-систем. Однако цветное телевидение не нашло широкого применения до тех пор, пока не была решена проблема совместимости с уже созданными системами черно-белого телевидения. Несовместимость состояла в том, что предложенные ранее системы не позволяли цветным телевизорам принимать черно-белые сигналы, а черно-белые телевизоры не могли принимать сигналы цветных.

Первая совместимая система NTSC (National Television System Committee) была принята в 50-х гг. в США и распространилась на ряд стран Америки, Канаду, Японию. Несколько позднее во Франции была предложена система SECAM (Sequence de Couleurs Avec Memoire – поочередность цветов и память). Систему SECAM часто называют советско-французской системой, так как ее совместный вариант был принят в СССР, Франции и других европейских странах. В 60-х гг. в Германии была создана система PAL

(Phase Alternation Line – строка с переменной фазой), и с конца 60-х гг. по системе PAL ведутся передачи в Германии, Англии и ряде других стран [1–4].

В это же время продолжилось совершенствование трубок в направлении уменьшения их габаритов и повышения чувствительности, а в начале 70-х годов появились первые, еще далеко не совершенные твердотельные преобразователи «свет – сигнал» на матрицах приборов с зарядовой связью (ПЗС), которые постепенно практически вытеснили вакуумные трубки. Сейчас говорят об эре электронного твердотельного телевидения [5].

Одновременно с развитием вещательного телевидения начало развиваться прикладное телевидение, которое в зависимости от области применения имеет свою специфику.

Под прикладным телевидением понимают замкнутые телевизионные системы, в которых сигнал от камеры на видеопросмотровое (видеоконтрольное) устройство передается по кабелю. Основное назначение – наблюдение и управление на производстве, транспорте и др., в том числе в местах, где присутствие человека невозможно, нежелательно или небезопасно. Особенностью прикладного телевидения является дистанционное управление камерами. Конструктивное исполнение камер в зависимости от решаемых задач может быть самое разнообразное: коррозионно-стойкое (для эксплуатации в агрессивных средах, в условиях запыленности), влагонепроницаемое, радиационно-стойкое (для работ в условиях ионизирующих излучений), взрывозащищенное (для эксплуатации во взрывоопасных средах: метан, сероводород, водород), жаростойкое (с системой охлаждения, для наблюдения в условиях горячих производств) и т.п.

Существует множество различных технологических задач. Поэтому иногда вместо термина «прикладное телевидение» используют термин «технологическое телевидение», а прикладные телевизионные системы, работающие в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами, часто называют системами технического зрения.

Специфические виды телевизионных систем, такие как тепловизионные (наблюдение в инфракрасном спектре), рентгенотелевизионные, спектрозональные системы и др., выделяют в самостоятельные направления. Вместе с тем именно эти системы могут быть охарактеризованы как системы телевизионной визуализации, поскольку они предоставляют пользователю визуальную информацию, недоступную для обычного зрительного восприятия, и предполагают трансформацию получаемых изображений в видимую область спектра [6].

Глава 1

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

1.1. Система визуализации как система связи и информационная машина

Задачей любой системы визуализации является получение и передача информации о тех или иных пространственных неоднородностях структуры исследуемого объекта посредством электрического сигнала и его преобразование в видимое изображение. Основным принципом для технической реализации подобной системы является принцип развертки, заключающийся в разбиении картины распределения пространственных неоднородностей объекта на отдельные элементы и в последовательном получении и передаче информации об этих элементах методами электросвязи.

Можно выделить следующие разновидности неоднородностей, которые могут быть визуализированы при помощи технических средств:

- 1) неоднородности распределения яркости видимого света;
- 2) неоднородности цветового распределения;
- 3) неоднородности отражения в различных участках видимого, ультрафиолетового и инфракрасного диапазона спектра;
- 4) неоднородности люминесценции;
- 5) неоднородности теплового излучения;
- 6) неоднородности структуры, влияющие на прохождение проникающего излучения, например рентгеновского;
- 7) неоднородности магнитного поля и др.

Слово «визуальный», согласно толковому словарю, означает «относящийся к непосредственному зрительному восприятию», т.е. видимый. Визуализировать, таким образом, означает сделать видимым посредством тех или иных технических средств или, иначе говоря, получить изображение, поскольку слово «изображение» означает создание образа, доступного непосредственному зрительному восприятию. В литературе тем не менее часто встречаются термины «рентгеновское изображение», «инфракрасное изображение», «акустическое изображение» [7]. В таких сочетаниях слово «изображение» употребляется для характеристики вида исходного распределения пространственных неоднородностей объекта и подчеркивает специфику получения этого изображения.

С помощью зрения прежде всего осуществляется обработка информации с целью извлечения различных аспектов реального мира. Однако мозг обладает возможностью представления обработанной информации для принятия решения [8]. Непосредственное взаимодействие зрения и объекта, таким образом, можно представить в виде схемы (рис. 1.1, а).

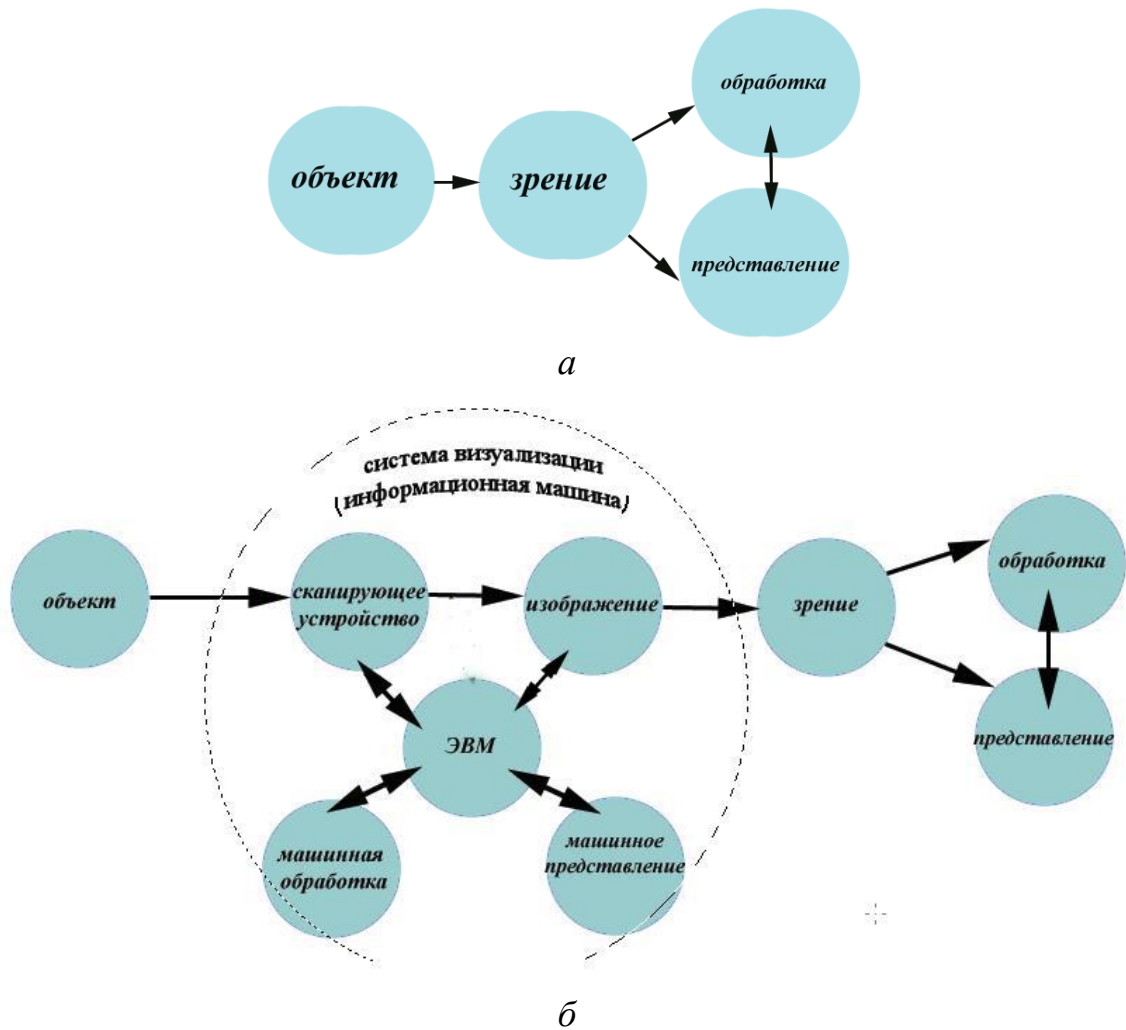


Рис. 1.1. Взаимодействие объекта и зрения человека:
а – непосредственное; *б* – через систему визуализации

Система визуализации как информационная машина, призванная расширить возможности зрения человека, становится, по сути дела, промежуточным звеном (посредником) между объектом и зрительным анализатором (рис. 1.1, *б*). Поэтому обработка и представление информации становится основной задачей, решаемой такой информационной машиной, наряду с задачей непосредственного получения исходной визуальной информации.

С точки зрения проектировщика, использующего методы визуализации и компьютерные технологии для создания информационной машины, требуется знать, каким образом «запрограммировать» зрение [8]. При этом под программированием зрения понимается не только собственно программирование на ЭВМ, но и реализация того или иного метода визуализации с точки зрения максимально возможного (или оптимального) качества сигнала визуализируемого объекта.

Основой такой информационной машины становятся:

1) сканирующее устройство, согласованное с априорно известными характеристиками объекта и преобразующее отклик объекта (излучение,

магнитное поле и др.) в электрический сигнал (видеосигнал) двумерного изображения, несущий информацию о пространственном распределении величины этого отклика;

2) преобразователь «сигнал – свет» (монитор), согласованный с характеристиками зрительного анализатора человека и обеспечивающий возможность наблюдения получаемого изображения;

3) ЭВМ, обеспечивающая возможность управления режимами работы сканирующего устройства, возможность обработки изображений с целью улучшения их визуального восприятия и количественного анализа, а также возможность интерпретации (представления) получаемых результатов в виде дополнительной текстовой, табличной и графической информации.

Д. Марр [8] выделяет три уровня рассмотрения информационной машины в процессе проектирования (рис. 1.2).

Первый (верхний) уровень – информационная теория, которая формально определяет вид входной и выходной информации и показывает возможность и целесообразность его использования.

Второй (центральный) уровень – алгоритм, который определяет способ преобразования входной информации в выходную как последовательность технически реализуемых операций.

Третий (нижний) уровень – техническая реализация, которая определяет подробности конкретной физической реализации алгоритма как детальную схему системы включая архитектуру ЭВМ и программное обеспечение.

По сути, различия в уровнях заключаются в том, что на первом уровне определяется, что делает система, на втором – как она это делает, а на третьем – какими техническими средствами это осуществляется.

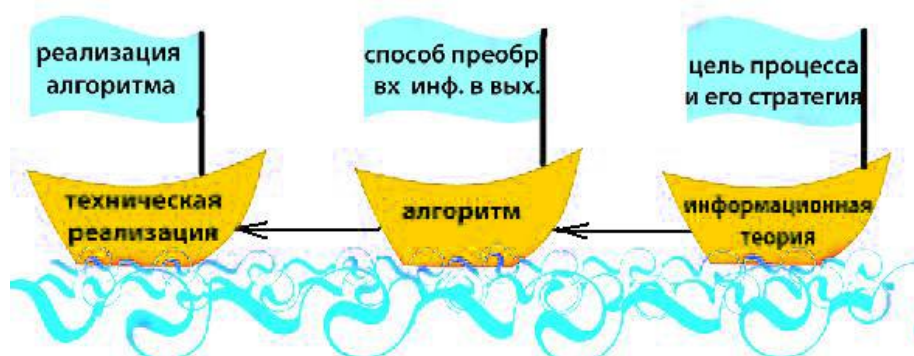


Рис. 1.2. Уровни рассмотрения информационной машины

Техническая реализация системы визуализации (рис. 1.3) с учетом возможности обработки и представления информации с помощью ЭВМ по определенному алгоритму требует наличия *источника информации*, которым является сканирующее устройство со своей спецификой в зависимости от решаемой задачи, *приемника информации*, в возможные функции которого входят обработка и представление, заключающееся в синтезе сигнала, пригодного для отражения на экране воспроизводящего устройства как

непосредственно самого изображения пространственных неоднородностей, так и форм представления информации об этом изображении (графиков, диаграмм, таблиц и т.п.), и *канала связи* между источником и приемником.

Таким образом, система визуализации относится к системе связи, осуществляющей фактически связь субъекта с внешним миром. К такой системе вполне применима классическая модель К. Шеннона, содержащая канал с шумом, искажающим сигнал, передаваемый источником.



Рис. 1.3. Структурная схема системы визуализации как системы связи

Современная концепция информационной теории связи Л.И. Хромова предусматривает выделение источника внешнего шума, действующего до канала непосредственно на источник сигнала, например, случайный шум фотонов [9–10]. В общем случае на входе канала связи может действовать как фотонный шум, так и детерминированные помехи, проникающие в источник, например, в виде фоновых составляющих. Учет такого внешнего шума весьма важен, поскольку в случае превышения им сигнала источника передача информации по каналу связи становится бесполезной. При этом в системе существуют пороговые условия, при превышении которых дальнейшее усиление сигнала перед каналом связи (в частности повышение чувствительности телевизионной камеры) не имеет смысла, поскольку полезный сигнал полностью маскируется внешним шумом.

Соотношение между полезным (целевым, доминантным) и шумовым (фоновым) сигналом определяет качество информации, создаваемой системой. Причем критерием для оценки качества может выступать информационный критерий избирательности системы (информационного риска), определяющий соотношение потери информации о полезном сигнале и торможения шумовой информации [11].

1.2. Модели системы связи

К моделям систем предъявляют противоречивые требования. С одной стороны, они должны быть достаточно просты, чтобы их можно было тщательно проанализировать, с другой – достаточно сложны, чтобы правильно отражать действительность. Развитие систем связи определялось совершенствованием их моделей [9; 10]. Наиболее простая и охватывающая все виды связи, в том числе двустороннюю связь между отправителем и получателем (адресатом), модель была предложена Р. Хартли:

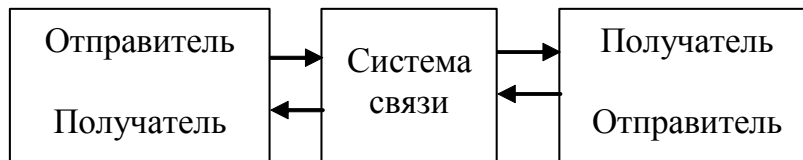


Рис. 1.4. Модель (схема) Хартли

К. Шеннон при создании математической теории связи дополнил модель шумящим каналом и выделил в ней ряд элементов системы:

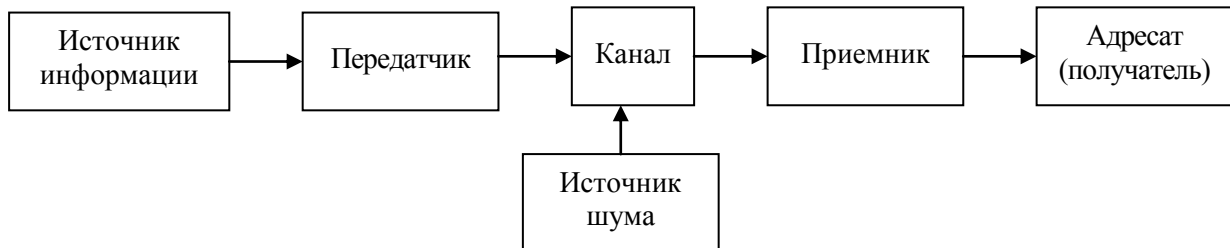


Рис. 1.5. Модель (схема) Шеннона

Более детальной является модель, в которой передатчик и приемник (связь через канал с шумом) разбит на две части: кодеры источника и канала, а также соответствующие декодеры:

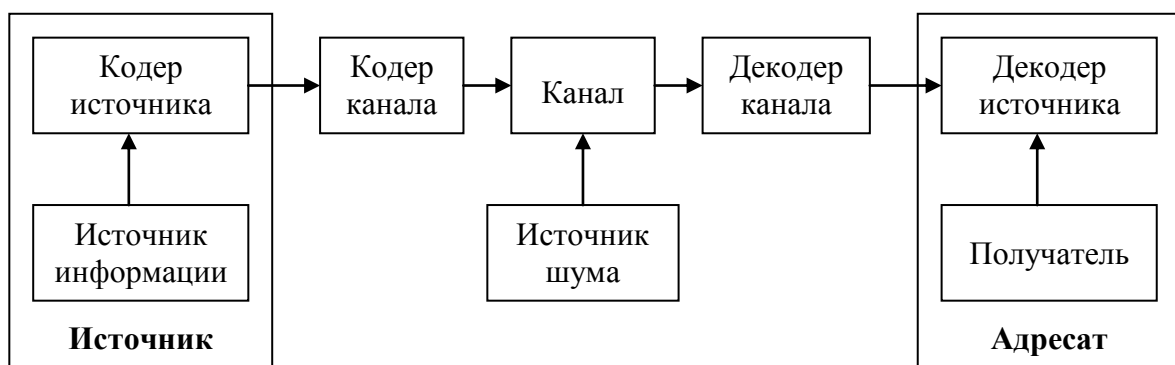


Рис. 1.6. Детализированная модель (схема) Шеннона

Кодер источника преобразует информацию в электрический сигнал, имеющий определенную форму представления (например аналоговую или цифровую). Кодер канала преобразует сигнал в форму, необходимую для передачи по каналу связи (например путем модуляции несущей частоты для передачи по эфиру или в световое излучение для передачи по волокну). Декодеры канала и источника выполняют функции, обратные кодерам.

Систему визуализации, как и любую систему связи, можно представить в виде обобщенной модели (рис. 1.7).

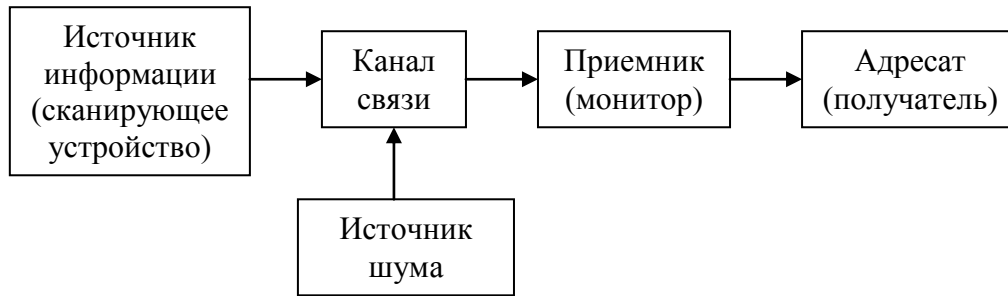


Рис. 1.7. Модель системы визуализации по К. Шеннону

Источник информации – сканирующее устройство, поэлементно преобразующее те или иные пространственно-временные неоднородности исследуемого объекта (например любое электромагнитное излучение в видимом, ультрафиолетовом, инфракрасном, рентгеновском диапазонах спектра, излучаемое или отражаемое объектом и окружающей его средой) в электрический сигнал.

Канал связи предназначен для передачи электрического сигнала на расстояние.

Источник шума оказывает искажающее воздействие на передаваемый по каналу связи сигнал.

Воспроизводящее устройство преобразует электрический сигнал в форму сообщения – изображение на экране монитора, пригодное для восприятия зрением человека.

Получатель – человек-оператор.

Современные системы предполагают не только визуализацию изображения на приемной стороне, но и его запоминание и хранение, а также обработку с целью улучшения визуального восприятия и получения количественных характеристик. Данные функции выполняются при использовании ЭВМ и специализированного программного обеспечения. Поэтому ЭВМ в современных системах становится их составной частью и при этом принимает на себя функции воспроизведения изображений. В связи с проникновением компьютерных технологий в сферу визуализации часто проводят аналогию между системой «глаз – мозг», говоря, что если глаз – это часть мозга человека, вынесенная на периферию, то система телевизионной визуализации – это вынесенная на периферию часть компьютера. Таким образом, для современной системы визуализации будет характерна следующая модель:

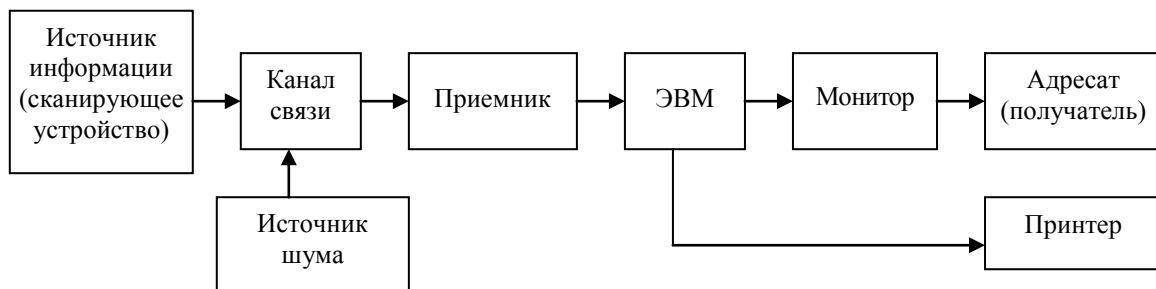


Рис. 1.8. Модель системы визуализации с ЭВМ

Л.И. Хромовым в его новой концепции, развивающей теорию связи, модель системы телевизионной визуализации (рис. 1.9) детализирована с учетом особенностей канала, а также с учетом особенностей воздействия фотонного шума при передаче электромагнитного (светового) излучения от объекта на фотоприемник (сам световой поток шумит, так как он идет не непрерывно, а порциями – квантами).

В центре внимания проектировщика находится телевизионная камера, которая выполняет функцию кодера. В ней непрерывное оптическое излучение преобразуется в видеосигнал (аналоговый или цифровой). Оптимизация системы с учетом шума канала и фотонного шума является весьма актуальной задачей в прикладном телевидении.

Из модели Хромова следует наличие шумового порога, при превышении которого дальнейшее усиление сигнала перед передачей по каналу связи становится бесполезным, поскольку сигнал поражается шумом в фотонном канале, т.е. перед непосредственным преобразованием «свет – сигнал».

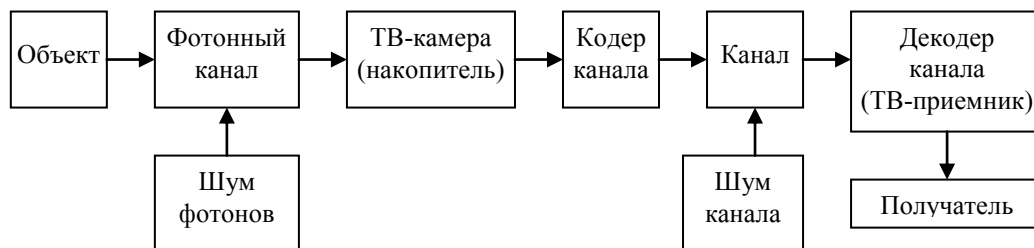


Рис. 1.9. Модель системы телевизионной визуализации по Л.И. Хромову

В заключение рассмотрим модель системы связи, с помощью которой Л.И. Хромов пытается показать, кто и как создает сигнал и информацию, не ограничиваясь вопросами их передачи. Для этого он предлагает ввести в модель объект исследования, субъект (проектировщика) и получателя сообщения. Модель показывает, что проектировщик строит источник и канал с учетом специфики объекта и субъекта-получателя, которому необходимо получить новую информацию об объекте, на основе априорных представлений.

Модель также показывает, что связь в телевизионной системе осуществляется между объектом и субъектом посредством сигнала, несущего информацию об объекте. Объект оказывает физическое воздействие на источник сигнала, который воспринимает это воздействие как некоторый стимул для создания информационного сигнала. Информационный сигнал нужно передать получателю через канал, в котором неизбежно присутствуют шумы.

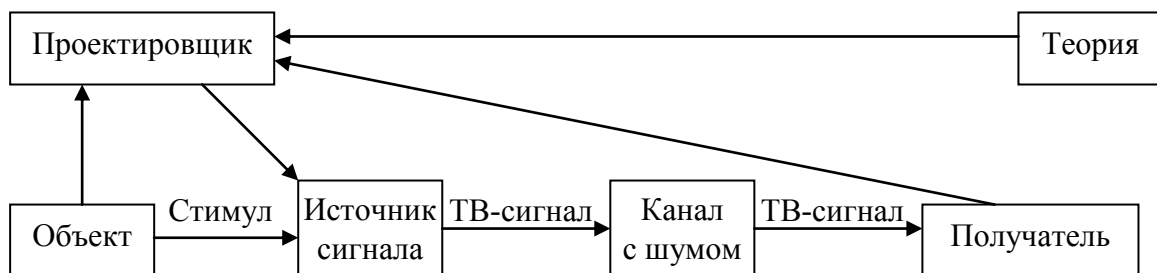


Рис. 1.10. Модель Хромова, отражающая связь системы связи и субъекта

В модели показан проектировщик системы, который обладает априорными сведениями, а также учитывает требования получателя к качеству информации и теоретические представления о принципах построения системы и который, в общем случае, может быть в одном лице и получателем сообщения.

Информация, передаваемая системой связи, может быть оценена как количественно, так и качественно. Понятие качества информации достаточно субъективно. Проектировщик, следуя рассмотренному подходу, должен удалить из смеси шумовой и полезной информации все лишнее для получателя. Л.И. Хромов образно сравнивает полезную информацию со скульптурой, вырубаемой из бесформенного куска мрамора в соответствии с замыслом скульптора.

Задача проектировщиков – построить оптимальную с точки зрения качества получаемой информации систему, а задача получателей (пользователей системы) – в полной мере использовать возможности системы с точки зрения выбора режимов работы. Оптимальной, по Л.И. Хромову, является система, дающая возможность получения изображения (информации) с максимально возможным качеством при минимальном количестве передаваемой информации [9; 10].

1.3. Информационная оценка системы телевизионной визуализации

Рассмотрим существующие подходы к информационной оценке систем телевизионной визуализации [1; 4]. С помощью этих систем мы взаимодействуем с внешним объектом. Система визуализации – это источник информации, информационная машина. Каким образом ее следует характеризовать? В каком изображении больше информации? С чисто количественной точки зрения система визуализации может быть охарактеризована некоторым абстрактным количеством создаваемой информации, измеряемой в единицах информации – битах (1 бит: «Да» или «Нет», есть сигнал – нет сигнала), т.е. в двоичных единицах.

По К. Шеннону – основоположнику теории информации, количество информации J_i , содержащееся в сообщении, имеющем вероятность P_i , выступает как некоторая абстрактная характеристика, лишенная смыслового (семантического) содержания: $J_i = -\log_a P_i$. Знак «-» ставится из-за того, что $P_i \leq 1$ и, следовательно, $\log < 0$, а информация должна быть со знаком «+», т.е. $J_i > 0$. Это выражение следует из предположения о том, что сигналы, несущие информацию, носят случайный характер, независимы друг от друга и заранее неизвестны получателю. Передача известной информации несет нулевое ее количество. При появлении нового случайного события информация добавляется.

Действительно, согласно теории вероятности и математической статистике для независимых сообщений P_i и P_j справедливо $P_{ij} = P_i P_j$, а, следовательно: $J_{ij} = -\log_a P_i P_j = (-\log_a P_i) + (-\log_a P_j) = J_i + J_j$, т.е. происходит суммирование (добавление) количества информации.

За единицу информации, как уже было сказано выше, принят бит (двоичная единица), когда основание логарифма $a = 2$. В этом случае для двух равновероятных событий $P_i = P_j = 0,5$ и $-\log_a 1/2 = \log_a 2 = 1$. Если сообщение состоит из M – равновероятных событий, то передается количество информации $J = -(\log_2 1/M) = \log_2 M$ (бит).

Оценим максимальное количество информации, содержащееся в телевизионном кадре. Количество информации в элементе кадра, если все градации равновероятны: $J_m = -\log_2 1/m = \log_2 m$. Тогда, рассматривая кадр как совокупность независимых градационных отсчетов, имеем количество информации в кадре $J = NJ_m = N \log_2 m$.

Величины J_m и J называют *информационной емкостью* элемента изображения и кадра соответственно.

Если кадр состоит из $N = 5 \cdot 10^5$ элементов (625 строк по 800 элементов в строке), а число передаваемых градаций яркости $m = 256$ (8-разрядное кодирование амплитуды сигнала, при котором глаз уже не различает перепадов яркости между уровнями квантования), то тогда $M_N = 256^{5 \cdot 10^5}$, и если все они равновероятны (хотя это заведомо не так), то информационная емкость кадра изображения составляет $J = N \log_2 m = 5 \cdot 10^5 \log_2 256 = 4 \cdot 10^6$ (бит/кадр).

1.4. Пропускная способность системы. Избыточность и энтропия изображения

Пропускная способность телевизионной системы (C) – это количество информации, пропускаемой системой в единицу времени: $C = Jf_k$ (бит/сек), где f_k – частота кадров.

Возникают вопросы:

- 1) Как оценить избыточность пропускной способности системы и в какой мере ее понижать?
- 2) Как сжать изображение?
- 3) Какое количество информации содержится в реальных изображениях?

Найти минимальную пропускную способность канала связи, способного передавать данное изображение, позволяет вычисление его энтропии.

Под энтропией сообщения (H), согласно К. Шеннону, понимается среднее количество информации на один элемент (математическое ожидание):

$$H = (-P_1 \log_2 P_1) + (-P_2 \log_2 P_2) + \dots + (-P_m \log_2 P_m) = -\sum_{i=1}^m P_i \log_2 P_i, \text{ где } P_i -$$

вероятность передачи градаций яркости, m – число градаций яркости.

Данное выражение соответствует правилу вычисления средних значений для случайных величин $\bar{a}_i = \sum_{i=1}^m a_i P(a_i)$, где a_i – случайная выборка,

P_i – ее вероятность. В нашем случае $a_i = -\log_2 P_i$ – количество информации в элементе, $P(a_i) = P_i$ – вероятность появления этого количества информации.

Пример

Наблюдаем частицы (например, клетки крови под микроскопом – темные точки на светлом фоне [4]). Их положение в кадре случайно и независимо друг от друга. Известно, что они составляют 1/16 всего кадра, т.е. вероятность появления сигнала от частицы в кадре – 1/16. Сигнал от частицы (темная точка) соответствует логическому «0», от фона – логической «1».

Пусть в строке (для простоты) 32 элемента. При данной вероятности в строке будет только 2 сигнала от частицы, остальное – фон. Пусть, например, эти сигналы случайно попали на 5-й и 14-й элементы. Если передавать сообщение последовательно о каждом элементе строки в виде 0 и 1 в зависимости от состояния элемента, то надо передать 32 бита. Но можно применить кодирование и передать ту же информацию, указав только номера элементов, в которых есть сигнал, – это 5 и 14, затратив в двоичном коде максимально по 5 знаков на передачу любого числа от 0 до 31.

Таким образом, информация о двух частицах в строке составит 10 бит. На приемной стороне первичный сигнал легко, без потерь может быть восстановлен. Следовательно, исходное сообщение избыточно и может быть сжато.

Его энтропия составит $H = (-\log_2 P_{\text{ч}})P_{\text{ч}} + (-\log_2 P_{\text{ф}})P_{\text{ф}}$, где $P_{\text{ч}}$ – вероятность появления частицы, а $P_{\text{ф}}$ – вероятность появления фона. Для нашего примера:

$$\begin{array}{ccc}
 P_{\text{ф}} = 1 - P_{\text{ч}} & & -\log_2 P_{\text{ф}} = \log_2 1/P_{\text{ф}} \\
 & \swarrow \quad \searrow & \\
 H = (1/16) \cdot 4 + (15/16) \cdot 0,0931 = 0,337 \text{ бит/эл} & & \\
 \uparrow & \swarrow & \\
 P_{\text{ч}} & & -\log_2 P_{\text{ч}} = \log_2 1/P_{\text{ч}}.
 \end{array}$$

Поскольку количество градаций в нашем примере $m = 2$, а информационная емкость на один элемент – $J_m = \log_2 m$, то $J_m = 1$ (бит/эл). Таким образом, если для равновероятных событий $J_m = 1$ (бит/эл), то за счет того, что вероятность сигнала частицы значительно меньше вероятности сигнала фона, энтропия сообщения (среднее количество информации на элемент) оказывается меньше информационной емкости. Всегда $J_m > H$, т.е. *информационная емкость на элемент больше энтропии сообщения (среднего количества информации на элемент)*.

Мерой избыточности сообщения может служить выражение $\delta J = (J_m - H)/J_m = 1 - H/J_m$. Оно показывает, на сколько можно сжать сигнал. В нашем примере $\delta J = (1 - 0,337)/1 = 0,663$, т.е. сигнал можно сжать на 0,337. Таким образом, отношение H/J_m показывает, во сколько раз можно сжать сигнал, а обратное отношение J_m/H показывает, какой выигрыш по-

лучается при применении того или иного метода кодирования. В нашем примере сигнал можно сжать в $1/0,337$, т.е. в 3 раза.

1.5. Статистические свойства сигналов изображения

Статистические свойства изображений необходимо определять для того, чтобы оценить энтропию сигналов изображений, их избыточность и потенциальную возможность их сжатия. Существуют различные способы сокращения избыточности (кодирования) видеосигнала [7].

Между соседними элементами в изображении, как правило, существуют корреляционные связи, т.е. вероятность градации последующего элемента зависит от градации предшествующего. Наличие корреляции между элементами повышает вероятность повторения градаций яркости. В сигнале, где есть корреляционная (статистическая) связь, количество информации на элемент в среднем (энтропия) меньше, чем в независимом (некоррелированном) сигнале.

Энтропия сообщения имеет глубокую аналогию с энтропией в термодинамике и, собственно, поэтому так и названа. Энтропия – мера хаоса или упорядоченности. Чем больше энтропия, тем больше хаоса, тем меньше взаимосвязей (корреляции), и, наоборот, чем энтропия меньше, тем больше в изображении упорядоченных структур, тем больше в нем степень корреляции элементов. Таким образом, энтропия существенно зависит от содержания изображения.

Для специфических сюжетов, как в примере с частицами, неравномерность распределения P_i значительна, что может быть использовано для эффективного сжатия. Для большинства сюжетов (портрет, пейзаж) в среднем вероятности всех градаций яркости P_i одинаковы, и неравномерность их распределения мала. Поэтому передача кода, как в примере с частицами, для них неэффективна. Для таких сложных сюжетов необходимо определять условные вероятности градаций яркости с учетом корреляционных связей между соседними элементами, что составляет довольно сложную задачу.

1.6. Теорема Котельникова применительно к телевидению

Согласно теореме Котельникова, сигнал, имеющий ограниченный спектр частот от 0 до $f_{\max}$, можно описать, указав его значения через интервалы $\tau = 1/2f_{\max}$. Таким образом, мы можем передавать значение сигнала в моменты «выборки» через интервалы τ . Только эти выборки несут последующую информацию, и она полностью сохраняется в ограниченной полосе частот сигнала. Промежуточные значения полезной информации не

несут, и их вычисляют на приемной стороне. Следовательно, делать выборки чаще не имеет смысла, а реже – будет потеря информации.

Применим теорему Котельникова для определения полосы частот телевизионного сигнала. Нас интересуют детали изображения, которые не меньше элемента; тогда τ надо взять равным времени передачи элемента. Следовательно, $f_{\max} = 1/2\tau = (N \cdot n)/2$, где N – число элементов раstra (кадра), n – число кадров в секунду ($\tau = 1/N \cdot n$). Отметим важный момент: теорема Котельникова предполагает точное измерение значения сигнала в момент выборки. Но абсолютно точное значение предполагает бесконечно большое число градаций яркости m , следовательно, количество информации (информационная емкость элемента) $J_m = \log_2 m \rightarrow \infty$. Однако такое количество информации нельзя ни создать, ни передать.

В телевидении измеряется средняя яркость элемента. При этом имеют место флуктуации (шум), т.е. случайные ошибки измерения. Таким образом, можно лишь указать некоторый интервал (определяемый уровень шума), в котором находится измеренное значение сигнала. Шум как бы квантует сигнал, ограничивая число воспринимаемых градаций яркости, и делает количество информации конечным.

В связи с этим возникает фундаментальный вопрос классической теории информации: как передавать точную информацию при наличии шума и как отличить сигнал от шума? На первый взгляд ответ такой: шум – случайный, а сигнал – нет. Однако сигналы также случайны, иначе они точно могли бы быть предсказаны и не несли бы никакой информации. Таким образом, что считать сигналом, а что – шумом, определяют получатель и отправитель информации в зависимости от поставленной цели. Каналу связи все равно, что передавать – сигнал или шум, и классическая теория информации не дает ответа, в чем разница между сигналом и шумом. С этой точки зрения шум тоже может быть оценен количеством «информации», надо знать только их вероятность. Выборки шума через интервал Котельникова независимы. Например, так называемый «белый шум», спектр которого непрерывен и равномерен, как спектр белого света, имеет Гауссов (нормальный) закон распределения вероятностей. Такой «белый шум» несет максимальное количество информации среди любых других сигналов равной средней мощности.

Главная задача телевидения, как и любой другой техники связи, выделить сигнал из шума и передать информацию без ошибок (или с их минимумом). В классической теории информации показано, что всегда можно выбрать такую скорость передачи информации (бит/сек), при которой она будет передана с заданной вероятностью ошибки. В пределе теоретически, чтобы передать сообщение без ошибки, его надо передавать или бесконечно долго, или бесконечно усилить сигнал перед каналом связи. В этом состоит идея идеального «шумодава», изобретенного основоположником

информационной теории связи К. Шенноном, решившим задачу неискаженной передачи информации, не затрагивая ее смыслового содержания.

1.7. Предельная пропускная способность канала связи

Пропускная способность телевизионного канала R – количество информации, передаваемое в единицу времени, определяется информационной емкостью кадра $J = N \log_2 m$, где N – число элементов разложения, а m – число передаваемых градаций яркости, и длительностью кадра T_K : $R = J/T_K$. С учетом длительности элементов разложения τ , соответствующих выборкам Котельникова при ограниченной полосе частот f_{max} , $T_K = \tau N$. Тогда пропускная способность (скорость передачи) телевизионного канала определится выражением $R_0 = (N/T_K) \log_2 m = (1/\tau) \log_2 m = 2f_{max} \log_2 m$ (бит/сек).

Число градаций яркости (уровней квантования) в выборке ограничено соотношением уровней сигнала U_c и шума $U_{ш}$: $m = U_c / U_{ш}$. Таким образом, пропускная способность также ограничена. К. Шеннон вывел формулу предельной пропускной способности канала связи с шумами, предположив, что информация закодирована наилучшим образом, шум в канале белый (Гауссов) и сигнал тоже имеет структуру белого шума: $R_0 = f_{max} \log_2(1 + U_c^2/U_{ш}^2)$ (бит/сек), где U_c^2 – средняя мощность сигнала, $U_{ш}^2$ – средняя мощность шума, f_{max} – ширина полосы пропускания канала связи. Из выражения видно, что пропускная способность возрастает при высоком отношении сигнал/шум.

Классическая теория информации не дает ответ, как выделить сигнал из шума, однако позволяет оценить параметры канала связи при условиях наилучшей кодировки сигнала. Таким образом, главной задачей связи, в том числе телевидения, стало: как наилучшим образом закодировать сигнал и наилучшим образом использовать канал связи.

Вычест шум из сигнала на выходе канала нельзя, так как шум случаен, однако можно построить «шумодав», в котором используются статистические свойства сигнала. Так, например, при передаче неподвижных изображений используют принцип накопления (усреднения), позволяющий повысить отношение сигнал/шум в $\sqrt{n}$ раз, где n – число накапливаемых кадров.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается специфика системы телевизионной визуализации?
2. Какие основные задачи решает система визуализации с информационной точки зрения?
3. Чем определяется информационная емкость кадра и элемента изображения?
4. Что характеризует энтропия и избыточность изображения?
5. Чем определяется полоса пропускания телевизионной системы?
6. Чем определяется предельная пропускная способность системы связи?

Глава 2 ЭЛЕМЕНТЫ ФОТОМЕТРИИ, ОПТИКИ И КОЛОРОМЕТРИИ

2.1. Основные фотометрические величины

Свет является электромагнитным излучением и характеризуется рядом фотометрических величин [1; 12]. Всякий источник света характеризуется распределением мощности в спектре излучения: $P = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T) d\lambda$,

где P – мощность, Вт; $W(\lambda, T)$ – некоторая функция распределения, Вт/см; λ – длина волны, см; T – абсолютная температура источника, К; λ_1, λ_2 – диапазон длин волн, см.

Распределение мощности непрерывных источников (накаленные тела, камни накаливания, солнце и т.п.) имеет обычно один максимум. Для абсолютно черного тела длина волны максимального излучения обратно пропорциональна его абсолютной температуре, что позволяет по максимуму излучения судить о температуре тела.

Ненакаливаемые источники (люминесцентные лампы, экраны, все светящиеся газы и т.п.) имеют линейчатый спектр с рядом максимумов. Функцию $W(\lambda, T)$ обычно определяют опытным путем.

Световой поток

Глаз воспринимает свет различных длин волн (цвета) неодинаково. При равных мощностях желтый цвет кажется интенсивнее фиолетового. Чтобы стандартизировать световые единицы и сделать их независимыми от индивидуальных особенностей зрения, введено понятие относительной видности – $v(\lambda)$ (рис. 2.1).

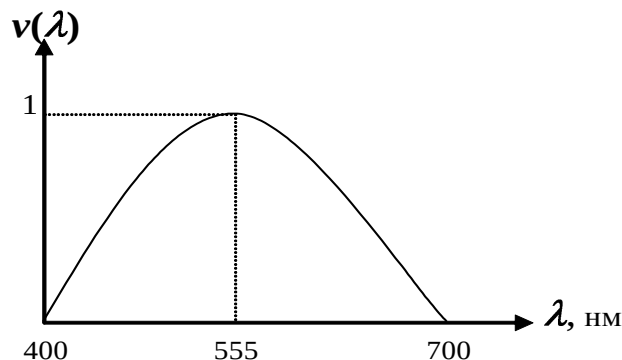


Рис. 2.1. Кривая относительной видности глаза человека

Равным участкам спектра $d\lambda$ соответствует равная мощность P . Световой поток $d\Phi$, измеряемый в люменах в участке спектра $d\lambda$, соответ-

ствуется $d\Phi = A\nu(\lambda)dP$ (лм), где A – коэффициент пропорциональности, лм/Вт. $A = 680$ лм/Вт – определено опытным путем. Полный световой поток, излучаемый источником света в диапазоне λ_1, λ_2 , соответствует выражению $\Phi = A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T) \nu(\lambda) d\lambda = AP\nu(\lambda)$ (лм). Так, если в источнике света с мощностью 1 Вт вся подводимая энергия обращается в монохроматическое излучение 555 нм (максимум соответствует желтому цвету), то световой поток, создаваемый этим источником, будет равен 680 лм.

Сила света

Для измерения силы световых потоков используется одна из основных единиц СИ – *кандела* (кд). Для ее определения имеется эталон специальной конструкции. Световой поток Φ соответствует произведению силы света J на телесный угол Ω . Таким образом, *сила света* J – величина светового потока Φ в телесном угле Ω . Источник света с силой в 1 кд излучает световой поток 1 лм в телесный угол 1стерадиан (ср).

Сила света – величина векторная. Всякий источник света обладает *диаграммой направленности* в полярных координатах. Таким образом, световой поток в пределах телесного угла Ω_0 равен $\Phi = \int_{\Omega_0} J(\Omega) d\Omega$ (лм).

Если источник света обладает равномерной диаграммой (т.е. излучает по всем направлениям одинаково), то $J(\Omega) = J_0$ (кд) и $\Phi = 4\pi J_0$ (лм). Для оптического излучения вне видимого диапазона спектра, например для инфракрасного или ультрафиолетового диапазона, используется *энергетическая сила света* (излучения), измеряемая в Вт/ср.

Яркость

Яркость (B) – величина силы света в данном направлении с единицы поверхности, перпендикулярной к данному направлению. Как и сила света, это величина векторная. Измеряется в кд/м².

Если яркость неравномерна, то $B = dJ/dS \cos \alpha$, где α – угол между нормалью к поверхности и данным направлением.

Распределение силы света $J(\Omega)$ и яркости $B(\Omega)$ имеет разный характер. Если диаграмма распределения силы света имеет форму сферы, т.е. $J = J_0 \cos \alpha$ (так называемый закон Ламберта), то яркость не зависит от направления, т.е. $B = B_0$. Такие источники света называются *равнояркими*.

Освещенность и светимость

Освещенность (E) – величина светового потока $d\Phi$, падающего на единицу площади dS . Измеряется в *люксах*: $E = d\Phi/dS$ (лк). Освещенность 1 лк соответствует световому потоку 1 лм, падающему на 1 м^2 поверхности. Освещенность E обратно пропорциональна квадрату расстояния R до источника с силой света J : $E = J/R^2$.

Светимость – величина светового потока, приходящаяся на единицу площади излучаемой поверхности. Измеряется, как и освещенность, в люксах.

Вне видимого диапазона спектра используется *энергетическая освещенность* (*светимость*), измеряемая в Вт/м^2 .

Диффузное отражение (рассеивание)

Если свет отражается по закону Ламберта, то такая поверхность считается идеально рассеивающей. Все поверхности, которые мы видим, рассеивающие (матовые). Зеркальную поверхность мы не видим непосредственно, а видим отражения в ней матовых поверхностей.

Коэффициент отражения (альбедо) $\sigma = \Phi/\Phi_0$, где Φ – отраженный световой поток, Φ_0 – падающий световой поток.

Коэффициент отражения σ для различных материалов принимает, например, следующие значения: 0,01 – черное сукно, 0,1 – мокрая булыжная мостовая, 0,28 – бетон, 0,43 – зеленая краска, 0,9 – снег, свинцовые белила.

Контраст (интервал яркости)

Контраст – отношение яркостей самого светлого участка изображения и самого темного. Контраст определяет динамический диапазон сигналов изображений, измеряется в размах, %, Дб. Глаз реагирует не на абсолютную разницу яркости, а на относительную. Относительным контрастом, или контрастностью, называется отношение $K = (B - B_{\text{ф}})/B$, если $B > B_{\text{ф}}$ (т.е. светлые объекты на темном фоне), или $K = (B_{\text{ф}} - B)/B_{\text{ф}}$, если $B < B_{\text{ф}}$ (т.е. темные объекты на светлом фоне). $K = 1$ для любого светлого объекта, если $B = 0$ – абсолютно черный фон.

2.2. Основные понятия и законы оптики

Простейшие оптические расчеты основаны на геометрической оптике. Как известно [12], основные законы геометрической оптики следующие:

- 1) лучи света в однородной среде прямолинейны;
- 2) для зеркальной поверхности угол падения равен углу отражения;

3) закон преломления $\sin i / \sin i' = n' / n$, где i – угол падения, i' – угол преломления, n, n' – показатели преломления для двух сред;

4) пересечение лучей не влияет друг на друга.

Задача геометрической оптики и элементарных оптических расчетов – получение резкого изображения требуемого масштаба. Законы геометрической оптики позволяют уяснить принципы построения изображений с помощью объективов и сформулировать требования к объективам для телевизионных камер.

Линзы

Объективы состоят из линз. На рис. 2.2 показан ход лучей в так называемой тонкой линзе, толщина которой мала по сравнению с ее диаметром.

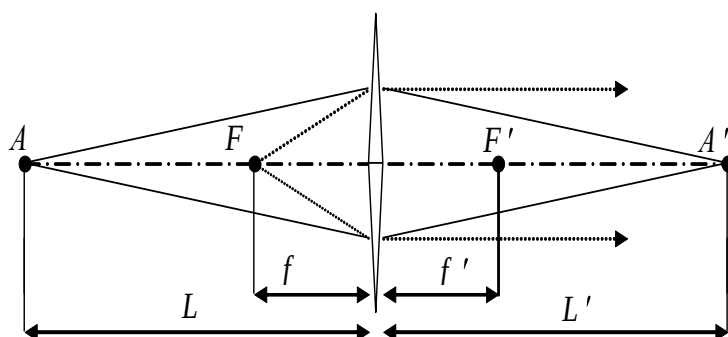


Рис. 2.2. Ход лучей в тонкой линзе

AA' – оптическая ось. В точке A находится точечный источник света на расстоянии L от линзы. Расходящийся пучок света из-за преломления в линзе становится сходящимся.

Лучи в точке A' пересекаются и на расстоянии L' образуют действительные изображения точки A .

F – фокусное расстояние. Точки F и F' являются главными (передним и задним) фокусами линзы.

Уравнение линзы $1/L + 1/L' = 1/F$ позволяет при известном ее фокусном расстоянии найти L' , если известно L .

Если источник A поместить в точку F , то $1/L' = 0$, т.е. изображение точки A' будет в бесконечности – из линзы выходит параллельный пучок. Иными словами, сферическую волну линза преобразует в плоскую.

Если источник A сместить от оси, то его изображение смещается в противоположную от оси сторону.

При построении изображения каждую точку предмета считают точечным источником света и строят ее изображения. Для этого (например, для точки A) проводят два луча: один – параллельно оси, другой – через главный фокус F . Первый пройдет через задний фокус F' , а второй – параллельно оси. Их пересечение даст изображение A' точки A .

Действительное изображение перевернуто на 180° . В зависимости от расстояния L оно может быть увеличенным или уменьшенным.

Фокусное расстояние зависит от радиуса линзы R и показателя преломления стекла n .

Величина, обратная фокусному расстоянию, называется оптической силой линзы и определяется выражением $1/f = 2(n - 1)/R$. Чем выпуклее линза (меньше R) и «тяжелее» стекло (больше n), тем ниже f и «сильнее» линза. Если f определяется в метрах, то $1/f$ – в диоптриях. Одна диоптрия соответствует линзе с фокусным расстоянием 1 м.

Если сложить ряд линз (т.е. поставить их друг за другом), то все они действуют как одна суммарная линза.

Объективы

Простые линзы дают искажения изображений, имеющие общее название – *абберации*. Главная причина – хроматические aberrации, так как показатель преломления зависит от длины волны света.

Таким образом, фокусное расстояние линзы для красных, зеленых, синих цветов, тем более для инфракрасного и ультрафиолетового света, будет различное. В результате вокруг точки получаются радужные кольца или полосы.

Хроматическая aberrация устраняется путем склейки линз из разных сортов стекла, в которых характер зависимости показателя преломления от длины волны компенсирует эти искажения.

В «толстых» линзах возникают геометрические aberrации (искажения). В общем случае увеличение системы линз оказывается неодинаковым для различных зон поля изображения. В результате этого искажения, называемого *дисторсией*, изображение квадрата получается в виде подушки (положительная дисторсия) либо в виде бочки (отрицательная дисторсия). Степень искажения выше по направлению к краям раstra. Чем меньше фокусное расстояние – f , т.е. чем больше степень увеличения объектива, тем выше дисторсия.

В объективах комбинируют линзы различной формы, сводя к минимуму геометрические искажения, однако даже при полной коррекции существует размытость изображения из-за *дифракционных* искажений. Геометрические искажения ниже при малой диафрагме. В этом случае главную роль начинают играть дифракционные искажения, приводящие к «размытию» изображения.

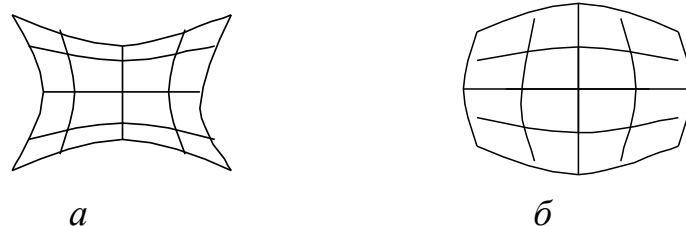


Рис. 2.3. Дисторсия:

a – положительная («подушка»); b – отрицательная («бочка»)

Созданы разные виды объективов, в которых используются различные приемы уменьшения искажений. Различные конструкции объективов имеют названия «ахромат», «апланат», «анастигмат». Их подробное рассмотрение выходит за рамки нашего курса. С точки зрения практического применения объективы можно разделить на две большие группы: объективы с постоянным фокусным расстоянием и объективы с переменным фокусным расстоянием.

Объективы с переменным фокусным расстоянием, так называемые вариообъективы, или трансфокаторы (в английской аббревиатуре – ZOOM), позволяют плавно изменять фокусное расстояние в достаточно широких пределах (от 1:2 до 1:20) за счет взаимного перемещения линз, что позволяет плавно менять масштаб изображения, добиваясь эффекта «наезда» камеры.

При выборе объектива необходимо иметь в виду, что существует минимальное расстояние, с которого обеспечивается фокусировка изображения. Современные типы объективов имеют режимы макросъемки, позволяющие получать увеличение изображения путем съемки объекта с близкого расстояния. Однако, как правило, в данном случае существенно понижается диапазон плавного изменения масштаба, в котором сохраняется фокусировка изображения. При этом глубина резкости становится тем меньше, чем больше масштаб изображения (степень увеличения).

Основные характеристики объективов

При выборе объектива необходимо учитывать целый ряд его характеристик. Ниже, на рис. 2.4, показаны главные точки и плоскости оптической системы объектива.

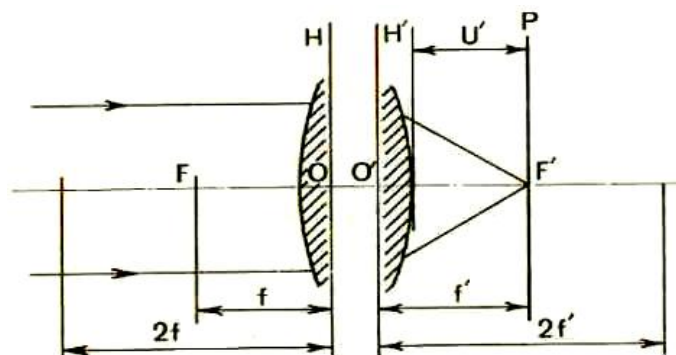


Рис. 2.4. Главные точки и плоскости оптической системы объектива:

O – передний оптический центр; O' – задний оптический центр;

H – передняя оптическая плоскость; H' – задняя оптическая плоскость;

F – передний фокус; F' – задний фокус; $2f$ ($2f'$) – двойное фокусное расстояние;

U' – вершинный отрезок; P – фокальная плоскость

Главное фокусное расстояние (или, в обиходе, *фокусное расстояние*) – это расстояние от задней оптической плоскости объектива (от последней

линзы объектива) до плоскости, где фокусируется параллельный (идущий из бесконечности) пучок света, входящий в объектив.

Отношение диаметра (отверстия) объектива D к фокусному расстоянию f называется *относительным отверстием*: $\ddot{O} = D/f$. Выражается в виде дроби с числителем 1 и знаменателем f/D . Установлен ряд относительных отверстий 1:0,7; 1:1; 1:2; 1:2,8; 1:4 и т.д. Знаменатель дроби часто называют диафрагмой (например, диафрагма 2,8). Смежные значения отличаются в 1,41 раз, а площади соответствующих световых отверстий – в 2 раза.

Величина $\ddot{O}^2$ часто называется *светосилой объектива*. Более точно, светосила – это способность объектива обеспечивать данный уровень освещенности в плоскости изображения при данной яркости объекта, что реально несколько меньше той, которую должно обеспечивать относительное отверстие из-за потерь света в стекле и отражений от поверхностей линз.

Угол поля изображения (2ω) определяет формат кадра в пространстве изображений.

Угол поля зрения (γ) определяет возможность съемки в пространстве предметов. Эти углы соответствуют друг другу и определяются задним фокусным расстоянием. В зависимости от угла изображения (угла поля зрения) различают короткофокусные (угол поля зрения большой), нормальные и длиннофокусные (угол поля зрения мал) объективы.

Объективы рассчитаны на определенный формат кадра, что необходимо учитывать при их выборе. Ниже, на рис. 2.5, показаны основные элементы объектива, характеризующие его угол поля зрения.

Разрешающая способность объектива (идеальный безабберационный объектив в монохроматической среде) может быть оценена следующим образом: $R \approx \ddot{O}/\lambda$ линий/мм. В предельном случае для $\ddot{O} = 1/0,5 = 2$ и $\lambda = 0,5$ мкм $R = 4000$ линий/мм.

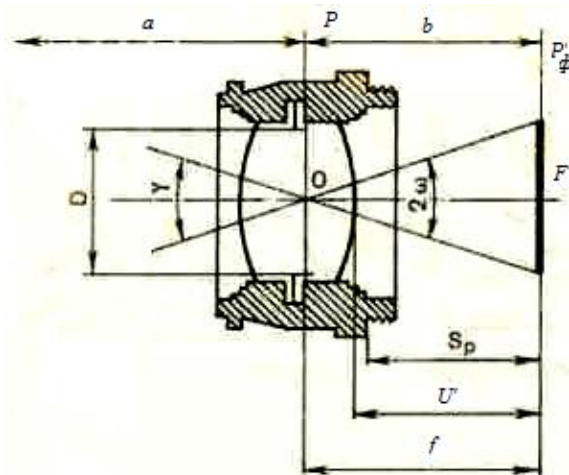


Рис. 2.5. Основные элементы объектива:

D – диаметр светового отверстия; F' – задний фокус; f' – фокусное расстояние;
 U' – вершинный отрезок; S_p – задний рабочий отрезок; a – пространство предметов;
 b – пространство изображений; P – оптическая плоскость; P_{Φ}' – задняя фокальная плоскость;
 2ω – угол поля изображения; γ – угол поля зрения

В реальных объективах разрешающая способность значительно меньше (в 10–100 раз). Если $R \approx 100$ линий/мм – это уже хорошо. Вследствие aberrаций яркостные перепады (границы между темным и белым) размываются.

Существуют испытательные таблицы – *миры* – в виде штрихов (радиальных, горизонтальных, вертикальных, наклонных), по которым можно судить о частотно-контрастной характеристике объектива (рис. 2.6).

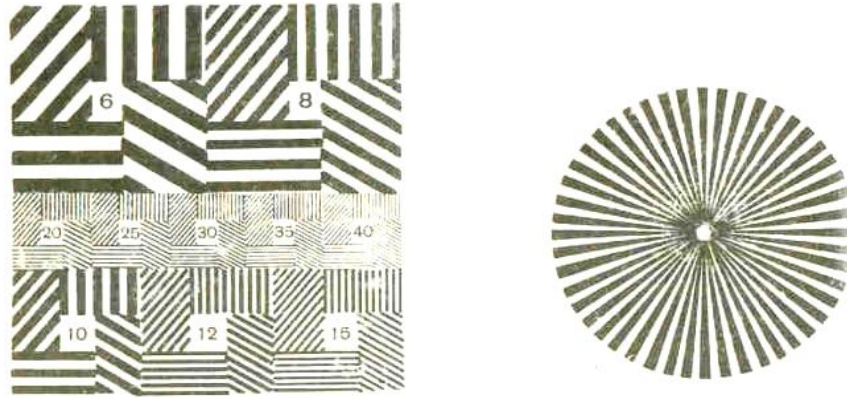


Рис. 2.6. Оптические миры

Глубина резкости характеризует резко изображаемое пространство. Его переднюю и заднюю границы определяют, исходя из *допустимого кружка рассеяния*, при котором изображения отдельных точек, получаемые в виде кружков, считаются достаточно резкими.

Различают глубину резкости в пространстве предметов и пространстве изображений. Глубина резкости зависит от размера диафрагмы. Чем меньше диафрагма, тем больше глубина резкости, однако тем меньше света попадает в объектив (рис. 2.7).

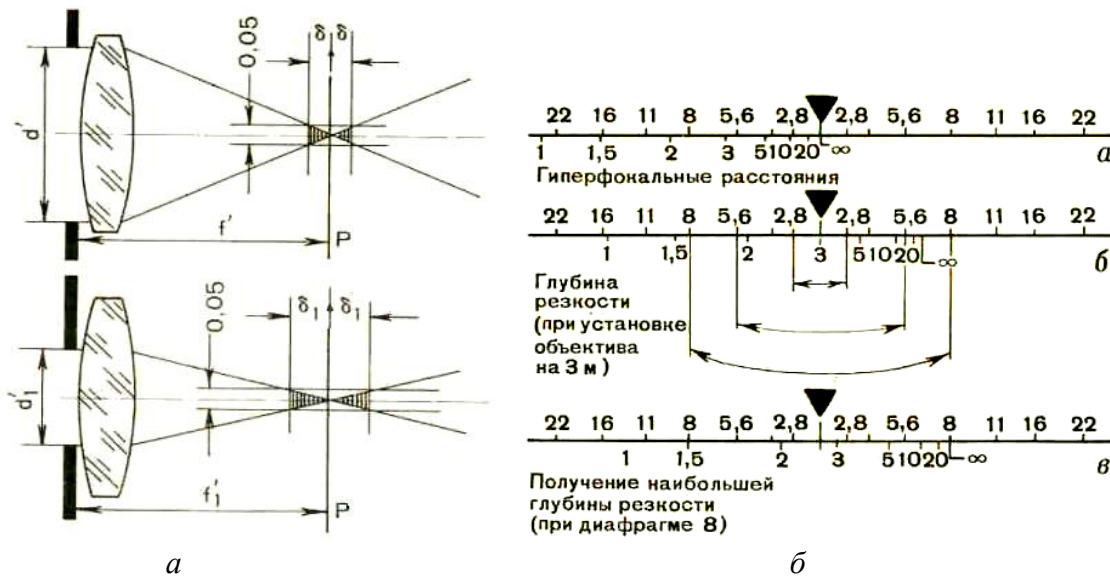


Рис. 2.7. Величина диафрагмы и глубина резкости:

a – допустимый кружок рассеяния (0,05)

и глубина резкости δ в пространстве изображений в зависимости от диафрагмы d ;

б – шкала глубины резкости в пространстве предметов (три варианта)

Ряд объективов имеет на оправе шкалу глубины резкости в виде симметричных значений диафрагмы и установочной метки. Устанавливая расстояние до объекта по шкале расстояний, определяют глубину резкого изображаемого пространства. На рис. 2.8 показаны пять различных случаев расположения объекта и соответствующего изображения. Если объект находится в бесконечности, то его изображение получается в главной фокальной плоскости (рис. 2.8, 1).

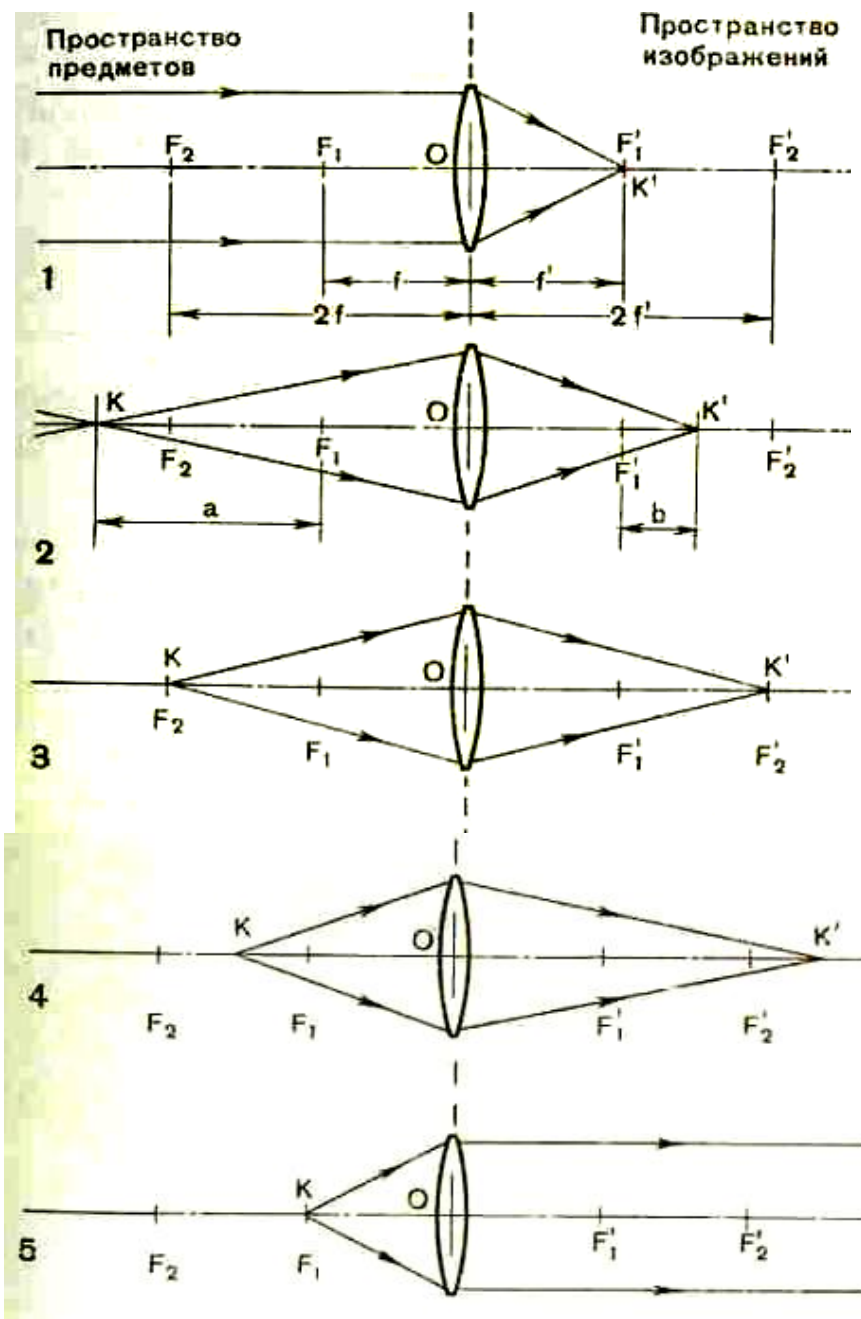


Рис. 2.8. Связь между расположением объекта и его изображением

При приближении к объекту изображение смещается. До тех пор, пока изображение находится между главным и двойным фокусными расстояниями, его размер меньше размера объекта (рис. 2.8, 2).

При расположении объекта на двойном фокусном расстоянии размер его изображения, получаемого на таком же расстоянии от оптического центра, становится равным размеру объекта (рис. 2.8, 3).

При приближении объекта к главному фокусу его увеличенное изображение получается за двойным фокусным расстоянием (рис. 2.8, 4). При достижении объектом главного фокуса из объектива выходит параллельный пучок света, и изображение отсутствует.

Некоторые элементарные оптические расчеты

Освещенность изображения E' (освещенность фотомишени) связана с освещенностью на объекте E соотношением $E' = E\sigma T_0 \ddot{O}^2/4$, где σ – коэффициент отражения поверхности объекта, T_0 – прозрачность объектива (отношение выхода светового потока к входному, обычно берется значение $T_0 = 0,7-0,8$).

На практике чаще используется обратная формула $E = 4 E' / \sigma T_0 \ddot{O}^2$, позволяющая, исходя из известной чувствительности датчика, выраженной в люксах (освещенности фотомишени), получить значение освещенности объекта, требуемое для обеспечения приемлемого количества.

При выборе объектива и определении места установки камеры используют формулу

$$a = AFH/hL,$$

где a – линейный размер изображения на экране, мм;

A – линейный размер предмета, мм;

F – фокусное расстояние объектива, мм;

L – расстояние от предмета до передней линзы объектива, мм;

H – высота экрана, мм;

h – высота мишени фотоприемника, мм.

Из этой формулы в качестве характеристики масштаба получаемого изображения может быть взято отношение $M = A/a$.

Для перемещающихся объектов может быть определена предельно допустимая скорость их перемещения в плоскости перпендикулярно оси камеры при четкости изображения во время движения приблизительно 300 телевизионных линий (практически без смаза): $V = 3L/F$ (мм/с), где L – расстояние от камеры до объекта, см; F – фокусное расстояние объектива, см.

Об использовании волоконной оптики

Луч, запущенный в торец волокна, испытывает полное внутреннее многократное отражение и распространяется по волокну. Волокно можно изгибать. В хорошем волокне потери на поглощение и рассеяние весьма

малы. Складывая волокна в пучок, получают световод, по которому можно передавать оптическое изображение (см. рис. 2.9).

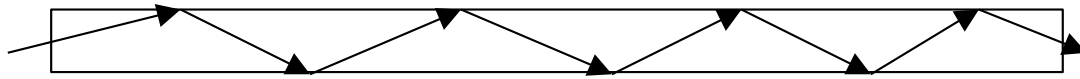


Рис. 2.9. Распространение света по оптическому волокну

Чтобы свет из одной нити не попадал в соседние и изображение не размывалось, делают оптическую изоляцию в виде оболочки из стекла с меньшим показателем преломления. Толщина нитей может быть сделана в несколько микрометров, обычно около 10 мкм, что обеспечивает разрешающую способность 15–50 лин/мм. Изображение, прошедшее через волоконный пучок, дискретизировано точечным растром.

При изготовлении исходные волокна собираются в пучок и подвергаются вытягиванию, затем пучки собираются в блоки и снова вытягиваются. Полученные блоки собираются в жгут. Многократная вытяжка понижает диаметр исходного волокна от 1 мм до нескольких микрометров. В результате получается жгут с ячеистой структурой.

Объектив может быть соединен с входным торцом жгута, в плоскости которого формируется оптическое изображение. Входной объектив требуется, если исследуется поле зрения, соответствующее размеру торца световода. Передаваемое световоду изображение на выходном торце жгута либо стыкуется непосредственно с фотоприемником, либо проецируется на фотоприемнике отдельным объективом. Жгут может быть гибким. Для этого волокна собирают вместе только на торцах.

Волоконная оптика дает возможность построения телевизионных эндоскопов. Через волоконный жгут может дополнительно осуществляться подсветка исследуемого объекта.

Ниже, на рис. 2.10–2.12, приведены примеры стыковки световодов с фотоприемниками.

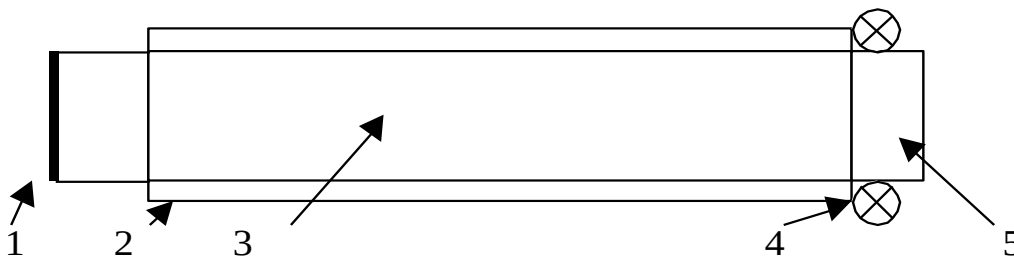


Рис. 2.10. Вариант фотоприемника, непосредственно состыкованного со световодом:

1 – объект; 2 – часть волоконного жгута для подсветки объекта;
3 – часть световода для передачи изображения; 4 – источник света; 5 – фотоприемник

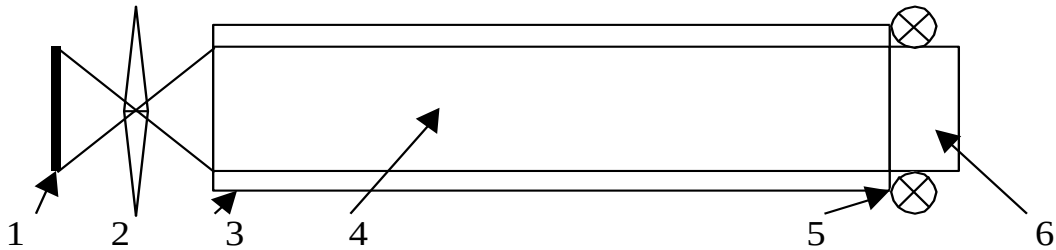


Рис. 2.11. Вариант с дополнительным объективом:

1 – объект; 2 – объектив; 3 – часть волоконного жгута для подсветки объекта;
4 – часть световода для передачи изображения; 5 – источник света; 6 – фотоприемник

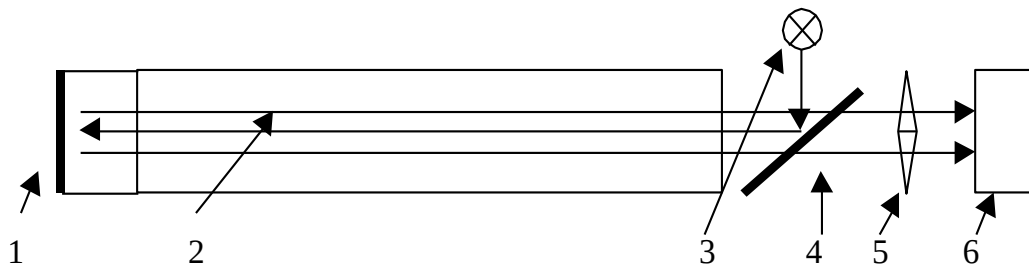


Рис. 2.12. Вариант с объективом переноса и полупрозрачным зеркалом:

1 – объект; 2 – световод; 3 – источник света; 4 – полупрозрачное зеркало;
5 – объектив переноса; 6 – фотоприемник

2.3. Об особенностях зрения

Рассмотрим некоторые свойства зрения, которые необходимо учитывать при построении систем визуализации [1–4].

Глаз имеет *зрачок*, проходя через который, свет попадает на *хрусталик* и проецируется на *сетчатку*, обладающей светочувствительностью. Хрусталик работает как линза. Фокусное расстояние нормального глаза, наблюдающего удаленные предметы, равно 22,9 мм. При этом на сетчатке образуется наиболее резкое изображение. Зрачок работает как диафрагма, автоматически меняя диаметр от 2 до 8 мм в зависимости от уровня освещенности (*адаптация*).

Глаз обладает свойством *аккомодации*: он способен менять кривизну хрусталика при рассматривании близких предметов. Расстояние наилучшего зрения составляет 250 мм. Оптической системе глаза, как и обыкновенной линзе, присущи все виды аберраций, однако мы не видим этих недостатков.

Сетчатка имеет сложное строение. Ее часто называют частью мозга, вынесенной на периферию, так как в ней осуществляется семантическая обработка информации, посылаемой через зрительный нерв, пропускная способность которого, по оценкам исследователей, много меньше количества информации, содержащейся в наблюдаемом изображении.

В сетчатке примерно 7 млн. палочек и 150 млн. колбочек. Распределены они по поверхности сетчатки неравномерно. Колбочки концентрируются в центральном участке сетчатки – желтом пятне, палочки – на периферии. Размеры желтого пятна $2 \times 1,5$ мм, его центральный участок (углубление) имеет диаметр около 0,4 мм.

Колбочки образуют аппарат дневного зрения (работают при освещенностях более 0,01 лк), обладают высокой разрешающей способностью, способны различать цвета. *Палочки* образуют аппарат сумеречного зрения, обладают более высокой чувствительностью, способны отличать черное от белого при весьма малой освещенности.

Связь палочек и колбочек со зрительным нервом осуществляется через сеть нейронов, сложным образом соединенных между собой. Последний слой нейронов связан с волокнами зрительного нерва через так называемые ганглиозные клетки. Механизм видения до сих пор не ясен. Системам визуализации до возможностей зрительного анализатора еще очень далеко. Ограничиваясь задачами визуализации, остановимся на таких свойствах зрения, как *чувствительность, разрешающая способность и инерционность*.

Чувствительность глаза

Рабочий диапазон освещенностей для глаза весьма велик: от 0,0001 лк ночью до 100 000 лк при солнце. Глаз способен адаптироваться в данном диапазоне. Однако при выходе из темноты на свет или наоборот глаз слепнет. Адаптация происходит достаточно медленно: от десятков секунд до десятков минут. При увеличении освещенности *родопсин*, или зрительный пурпур (особое вещество, содержащееся в палочках), разлагается, а при некотором пороговом значении – исчезает совсем, и ночное зрение полностью исключается. Начинают работать одни колбочки (благодаря им видим отчетливо, различаем цвета). В темноте родопсин восстанавливается, и включается ночное зрение.

Глаз реагирует на *относительный контраст*. Выведен закон Вебера – Фехнера, согласно которому пороговый контраст $K_{\text{пор}} = B_{\text{пор}}/B \approx 1,7\%$ в широком диапазоне яркостей (B).

Обратная величина, т.е. $1/K_{\text{пор}} = B/B_{\text{пор}}$, называется *контрастной чувствительностью* глаза.

Согласно закону Вебера – Фехнера, приращение зрительного ощущения $\Delta A = Q\Delta B/B$, где Q – коэффициент пропорциональности.

Пороговая различимость $\Delta A_{\text{пор}} = Q\Delta B_{\text{пор}}/B$, где B – яркость одной из 2 соприкасающихся поверхностей, яркость которых отличается на ΔB . Дифференцируя, получим $dA = QdB/B$. Интегрируя, получим $A = Q\lg B + C$, т.е. *зрительное ощущение пропорционально логарифму яркости*. В этом и состоит суть закона Вебера – Фехнера.

Рассмотренные величины субъективны. Контраст изображения ниже при внешней засветке. При данном среднем уровне освещенностей количество градаций яркостей, воспринимаемых глазом, невелико. Минимальное число градаций, при которых глаз перестает замечать разницу яркостей, $m = 64$. Однако передача всего динамического диапазона (от черного до белого) с равным шагом дискретизации требует увеличения числа передаваемых градаций до $m = 256$. В этом случае черно-белый «клин» выглядит плавным.

Знание особенностей чувствительного зрения позволяет оптимизировать параметры телевизионного приемника. Яркость экрана должна быть такой, чтобы работал аппарат дневного зрения – колбочки. Количество передаваемых градаций яркости должно быть в пределах 64–256.

Разрешающая способность зрения

Разрешающая способность зрения – способность глаза различать мелкие детали. Определяется минимальным углом зрения (углом разрешения) – α_0 , при котором две точки видны отдельно. Теоретически это будет, если изображения точек попадут на две колбочки, между которыми будет еще одна. С учетом размера колбочки $\delta_k = 2$ мкм и $f_{\text{гл}} = 23$ мм, $\alpha_0 \approx 2\delta_k/f_{\text{гл}} = 0,6'$. Опыты дают примерно ту же цифру.

Однако реально при рассматривании целого изображения разрешающая способность несколько хуже, она снижается при удалении от центральной ямки и при снижении освещенности. При лунном свете 0,1–0,2 лк читать невозможно, так как колбочки отключаются.

Зная α_0 , можно рассчитать число строк Z_0 , необходимое в кадре для оптимальной четкости изображения. Расстояние между строками δ должно быть такое, чтобы они наблюдались под углом $\alpha_0/2$. Такие строки уже будут различаться.

Опыты показывают, что наиболее приятно смотреть на экран, когда его высота видна под углом 15° , что соответствует отношению $h/L = 1/4$, где h – высота экрана, L – расстояние до глаза. Тогда $Z_0 = 15^\circ/\alpha_0/2$. Пусть $\alpha_0 = 2'$ (т.е. больше $0,6'$), тогда $Z_0 = 2 \cdot 15^\circ \cdot 60'/2 = 900$ строк.

Стандарт телевидения 625 строк взят исходя из того, что если мы отойдем еще на 0,5 м от наиболее приятного для глаз положения до экрана, то строк не увидим. Однако надо иметь в виду, что при прикладных задачах, в отличие от вещательных, экран рассматривают с более близкого расстояния, так как он размещается, как правило, на рабочем столе. При этом обычно $h/L = 1/3$, что соответствует углу примерно 20° (например, при работе на расстоянии $L = 75$ см от экрана в $17''$, т.е. $h = 25$ см). В этом случае желательно иметь $Z_0 = 2 \cdot 20^\circ \cdot 60'/2 = 1200$ строк. Если монитор $9''$, то при $h = 14$ см и $L = 75$ см, $h/L = 1/5 = 10^\circ$ и $Z_0 = 2 \cdot 10^\circ \cdot 60'/2 = 600$ строк, что практически соответствует вещательному стандарту. Таким образом, оптимальный настольный телевизионный монитор должен быть не более $9''$.

Следует иметь в виду, что поле зрения глаз соответствует углу 100–120°. Однако изображение на периферии сетчатки служит лишь для общей ориентировки, для поиска и наведения зрительной оси на тот или иной участок. Глаза всегда «перебегают» от одного участка к другому. Угол центрального зрения – всего 1,3°. Поэтому, даже наблюдая экран под углом 15°, детально, с полным разрешением, мы рассматриваем только лишь отдельные участки, составляющие 1% раstra. Налицо явная избыточность. Однако такая избыточность оказывается необходимой для детального визуального контроля изображения.

Разрешающая способность, или острота зрения, – величина, обратная углу разрешения, – $1/\alpha_0$. Острота зрения зависит от яркости фона и контраста (рис. 2.13).

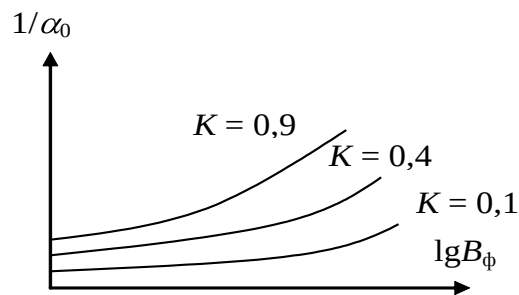


Рис. 2.13. Зависимость остроты зрения от яркости и контрастности для темных объектов на светлом фоне (отрицательный контраст)

Как видно из рис. 2.13, при наблюдении темных объектов на светлом фоне с понижением контраста острота зрения падает.

При наблюдении светлых объектов на темном фоне с увеличением яркости острота зрения сначала растет, а затем снижается («расползание» белых пятен). Поэтому белый круг на черном фоне кажется больше, чем такой же круг на белом фоне (рис. 2.14).

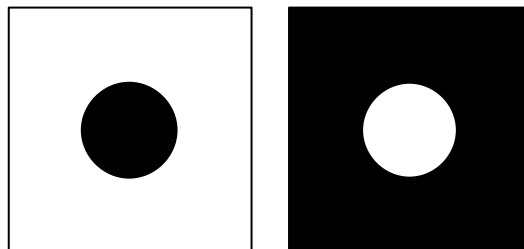


Рис. 2.14. К субъективному восприятию объектов с положительным и отрицательным контрастом

Острота зрения зависит от сочетания цветов. Например, если принять за 100% остроту зрения для черно-белого сюжета, то острота зрения для объекта таких же размеров при сочетаниях других цветов окажется следующей: черный – зеленый – 94%, черный – красный – 90%, зеленый – красный – 40%, черный – синий – 26%, красный – синий – 23%, зеленый – синий – 19%.

Инерционность зрения

Зрение не позволяет наблюдать быстрые процессы вследствие инерционности зрительного ощущения (оно не возникает и не пропадает сразу – задержка составляет около 0,1 с). Полное ощущение слитности можно получить при 10 кадр./сек. Однако из-за эффекта мелькания света в телевидении выбрана частота кадров 25 Гц. Для еще большего подавления мельканий в телевидении используется чересстрочная развертка, при которой кадр состоит из двух последовательных полей, содержащих соответственно нечетные и четные строки, передаваемые с частотой полей 50 Гц.

Спектральная чувствительность зрения

Зрение сумеречное, обусловленное палочками, более чувствительно в синей области спектра, а зрение дневное, обусловленное колбочками, – в зеленой. Рассмотренная ранее кривая видности (рис. 2.1) соответствует работе обоих аппаратов зрения и является собой нечто среднее:

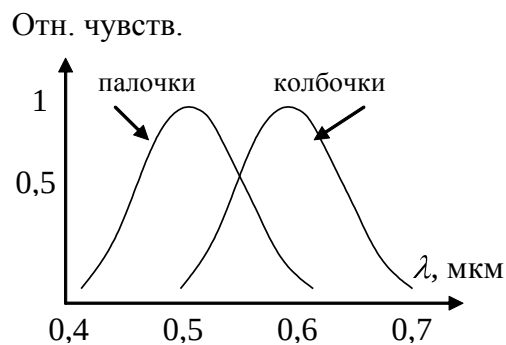


Рис. 2.15. Спектральная чувствительность дневного и сумеречного зрения

Ощущение пространства

Глаза человека дают ощущение пространственного видения. При наблюдении двумя глазами (бинокулярное зрение) зрительные оси глаз в наблюдаемой точке скрещиваются под углом конвергенции, или сведения. Возникает так называемый *угловой параллакс* (угловое смещение крайних точек объекта), приводящий к образованию на сетчатке линейного параллакса, т.е. к смещению изображений объекта относительно зрительных осей для левого и правого глаз, что и дает ощущение глубины пространства. Порог глубины определяется минимальным угловым параллаксом и составляет 10–20″.

Восприятие цвета и элементы колориметрии

Воздействие на глаз светового потока с различной длиной волны от фиолетовой границы 400 нм до красной 700 нм дает ощущение цвета. Физиологически (субъективно) цвет оценивается *светлотой*, *цветовым тоном* и *насыщенностью*, например: белый, серый, темно-серый отличаются светлотой, желтый, красный, зеленый – цветовым тоном, а розовый, красный – насыщенностью [3; 4; 7; 13].

Светлоту оценивают по яркости, *цветовой тон* – по доминирующей длине волны, т.е. по длине волны того спектрального цвета, который, будучи смешан в определенной пропорции с белым, дает субъективное зрительное тождество с цветом исследуемого излучения. Иными словами, цветовой тон характеризует свойства цвета, отличающего его от белого (зеленый, синий, черный). *Насыщенность* оценивают по *чистоте цвета* (P), под которой понимают долю спектрального цвета (для которого $P = 1$), обеспечивающую в смеси с белым (для которого $P = 0$) зрительное тождество с исследуемым излучением.

Чистота цвета $P = B_{\lambda}/B = B_{\lambda}/(B_{\lambda} + B_w)$, где B_{λ} – яркость спектрального цвета, B_w – яркость белого, B – яркость смеси. Иными словами, насыщенность – это степень «разбавленности» цвета белым. Цвет с насыщенностью 100% – это спектральный цвет с определенной длиной волны. Чем больше разбавленность, тем меньше насыщенность. Белый цвет – это смесь цветов в определенных пропорциях.

В зрительном аппарате наряду с яркостной адаптацией существует и цветовая адаптация. Она выражается в том, что цвет, к которому адаптируется глаз, как бы выцветает. Это приводит к изменению цветового ощущения в результате предварительного воздействия других цветов. Например, серое на красном приобретает зеленоватый оттенок. Желтое на красном кажется зеленоватым, а на зеленом – оранжевым. Вместе с тем белые детали всегда легко узнаются, и по отношению к ним глаз оценивает все остальные цвета.

Наука об измерении и количественном выражении цвета называется *колориметрией*. Колориметрией установлено, что монохроматическое излучение с определенной длиной волны всегда создает вполне определенное ощущение цвета. Однако обратное утверждение неверно. Ощущения одинакового цвета могут быть вызваны разными спектральными излучениями. Такие одинаковые цвета называются *метамерными*.

Существует два способа образования цветов:

1. *Субтрактивный* (вычитательный) – применяется в кино, фотографии, производстве красок. Например, если пропустить солнечный свет последовательно через желтый и голубой светофильтры, то оставшийся световой поток будет зеленым. То же самое будет, если смешать эти краски.

2. *Аддитивный* (слагательный), используемый в телевидении, способ образования цветов, т.е. их пространственное смешение, основанное на

слитном восприятии разноцветных точек (штрихов), угловые размеры которых меньше угла разрешения глаза.

В основе теоретической колориметрии лежат результаты многочисленных экспериментов по смешению цветов. Колориметрией установлено, что существуют *линейно зависимые* цвета, т.е. такие, которые могут быть связаны между собой линейным алгебраическим уравнением, и *линейно независимые*. Любой цвет может быть выражен комбинацией из трех линейно независимых цветов, называемых *основными*. В 1931 г. были стандартизованы три основных цвета – красный R ($\lambda = 700$ нм), зеленый G ($\lambda = 546,1$ нм) и синий B ($\lambda = 435,8$ нм). Эти основные цвета и приняты в телевидении.

Математически любой цвет D выражается через основные цвета R , G , B линейным уравнением $D = Rr + gG + Bb$, где r , g , b – *цветовые коэффициенты*, причем $r + g + b = 1$. Таким образом, цвет – трехмерная величина, представляемая вектором в трехмерном (цветовом) пространстве. Длина вектора характеризует количество цвета, направление – цветность (качество цвета). Все векторы выходят из начала координат, соответствующего черному цвету. Если взять векторы R , G , B и пересечь их, то получим цветовой треугольник, в вершинах которого расположены значения основных цветов (рис. 2.16). Достоинством данной колориметрической системы является то, что в ней используются реальные основные цвета. Однако она имеет недостатки, затрудняющие ее использование при расчетах.

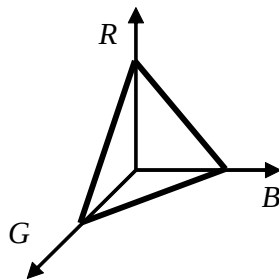


Рис. 2.16. Колориметрическая система RGB

Произвольно выбирая основные цвета, можно создать множество колориметрических систем, позволяющих производить расчеты и оценку качества цветопередачи телевизионной системы. Эти расчеты весьма специфичны и выходят за рамки задачи данного курса. Отметим лишь, что для цветной системы, помимо числа передаваемых градаций яркости, важным параметром является число воспроизводимых градаций цветности.

Понятно, что для передачи цветного изображения в системе основных цветов количество передаваемой информации выше в 3 раза за счет того, что вместо одного сигнала яркости передаются три – R , G и B . Поэтому возникает задача оптимизации системы с целью снижения количества передаваемой информации при сохранении приемлемого качества цветопередачи.

Из колориметрических представлений следует, что нет необходимости передавать все цвета. Достаточно передать информацию только о количественном соотношении трех основных цветов. Их синтез в приемнике позволяет получить цветное изображение, окрашенное в соответствии с оригиналом. Для измерительных целей была создана колориметрическая система с символическими (условными) цветами X , Y , Z , суммирование которых дает любой реальный цвет. Данной системе соответствует аналогичное линейное уравнение $D = xX + yY + zZ$, где x , y , z – цветовые коэффициенты, причем $x + y + z = 1$. Из уравнений следует, что для определения цветности достаточно задать две координаты, а третью можно легко вычислить путем их вычитания из единицы. Таким образом, можно перейти от трехмерной системы к двумерной и получить на плоскости цветовой график (локус), который строят по осям X и Y , а ось Z помещают в начало координат (рис. 2.17).

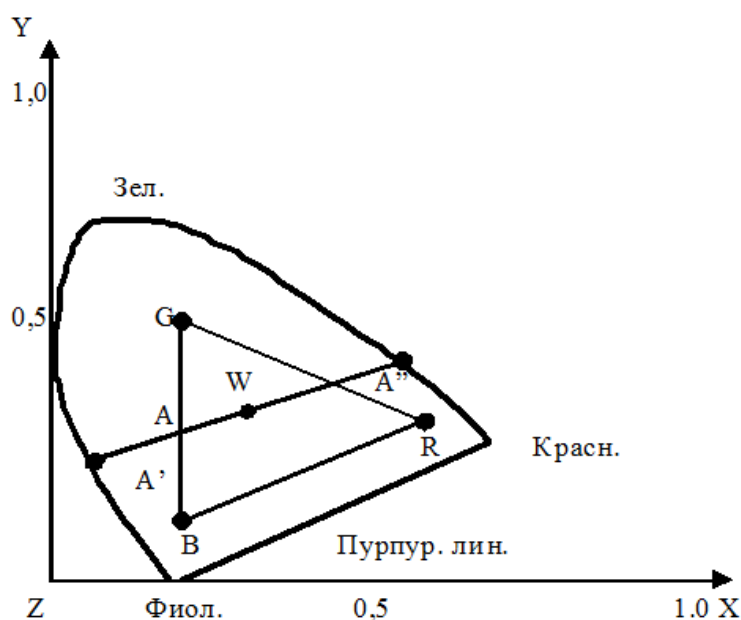


Рис. 2.17. Колориметрическая система XYZ

На графике *подковообразная* кривая является геометрическим местом точек всех видимых спектральных цветов: от фиолетового до красного. Прямой от фиолетового до красного цветов (*пурпурная линия*) соответствуют пурпурные цвета, смешанные с красным и фиолетовым в различных соотношениях. Все видимые цвета лежат внутри локуса и могут быть определены координатами (x, y) , а $z = 1 - x - y$. В центре тяжести – точка W (точка белого цвета). По локусу может быть найден цветовой тон и насыщенность любого источника. Для этого проводят прямую через точку A , соответствующую источнику, и через точку W , получая точки A' и A'' .

Точка A' показывает цветовой тон источника (голубой для точки A), а отношение отрезков AW/AW' служит мерой насыщенности (чем ближе

точка A к точке W , тем меньше насыщенность). Точка A'' определяет *дополнительный* цвет, который в смеси с A' дает белый цвет. Цвет смеси двух цветов лежит на прямой линии, соединяющей эти цвета. Яркость источника на цветном графике не определяется. Цвет смеси трех цветов лежит внутри треугольника на локусе, в вершинах которого находятся смешиваемые основные цвета. Чем меньше треугольник, тем будет меньше чистота и насыщенность цвета воспроизводимого изображения. Таким образом, построение цветовых треугольников на локусе позволяет сравнивать качество цветопередачи вариантов систем.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные фотометрические единицы.
2. Перечислите основные виды искажений, возникающие в объективах.
3. В чем заключается специфика применения волоконной оптики в системах визуализации?
4. Каковы основные свойства зрения человека?
5. Что изучает колориметрия? Приведите примеры колориметрических систем.
6. Назовите основные характеристики качества цветопередачи.
7. Какой способ образования цветов применяется в телевидении?
8. Какие характеристики системы можно определить путем построения цветовых треугольников на локусе?

Глава 3

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

3.1. Задачи телевизионной системы

Требования к телевизионной системе зависят от характера решаемой задачи. Тем не менее общим для всех телевизионных систем является получение и передача электрического сигнала [3; 4].

В каждый момент времени в одноканальной системе имеется возможность передачи только одного значения напряжения сигнала $U = f(t)$ (1).

Между тем любое изображение трехмерного объекта (сцены) в общем случае может быть описано уравнениями вида $B = f(x, y, z, t)$; $Y = f(x, y, z, t)$ (2), где B – яркость, Y – цветовая характеристика (оттенок или чистота цвета), x, y, z – пространственные координаты объекта, t – время.

Основные задачи телевизионной системы – это преобразование видимого изображения в сигнал для последующей передачи методами электросвязи. Для этого уравнения (2) необходимо привести к виду (1).

Чтобы решить основную задачу, необходимо найти ряд существенных упрощений и отказаться от передачи по каналу связи ряда параметров. Упрощения в основном связаны со свойствами зрения.

Например, можно ограничиваться получением и передачей плоского черно-белого (одноцветного) изображения. Так, исключаются координата z и цветовая характеристика Y . Если ограничиться передачей неподвижного изображения, то параметр t также можно исключить. Таким образом, неподвижное черно-белое изображение может быть описано уравнением $B = f(x, y)$, что дает распределение яркости в каждой точке плоскости изображения.

Чтобы снизить требования к каналу связи, изображение передают не сразу, а последовательно, по частям, путем его развертки.

3.2. Принцип развертки

Изображение разбивается на элементы с координатами x, y . Чем больше таких элементов, тем меньше их различимость глазом. Соответственно с точки зрения требуемой разрешающей способности может быть определено некое оптимальное число элементов разложения и количество передаваемой информации (пропускная способность канала связи) как некоторый компромисс между ними.

Развертка заключается в последовательном обходе всех элементов в определенном порядке с определенной скоростью. В процессе развертки средняя яркость каждого элемента преобразуется в сигнал изображения пропорционально этой яркости. Закон развертки может быть, вообще говоря, любой, например по спирали. Однако для формирования прямо-

угольного кадра используется так называемая прогрессивная развертка (построчная или чересстрочная) [1–4].

Кадр состоит из последовательности строк, прочерчиваемых сверху вниз, слева направо с постоянной скоростью V_x в пределах строки (прямой ход развертки) и быстрым возвращением в начало следующей строки (обратный ход развертки). В электронно-лучевых трубках (ЭЛТ), например, это достигается путем формирования пилообразного напряжения для горизонтальной и вертикальной отклоняющей системы.

Развертка передаваемого и принимаемого изображений должна быть *синхронной*. Для передачи движущихся изображений скорость развертки должна быть достаточно высокой, чтобы глаз не успевал следить за перемещением развертывающего элемента, вследствие инерционности зрения.

Исходя из особенностей зрения и с учетом опыта кинематографа для вещательного телевизионного стандарта были выбраны: число строк – $N_c = 625$, число кадров/сек – $n = 25$, формат кадра – $B/H = 4/3$.

В случае чересстрочной развертки кадр дополнительно разбивается на два поля – четное и нечетное, которые разворачиваются в течение кадра последовательно: четное поле содержит четные строки кадра, нечетное поле – нечетные. В результате кадр состоит как бы из двух вложенных друг в друга полей, что позволяет снизить эффект мерцания изображения.

3.3. Сигналы яркости изображения

Основные особенности сигналов изображения (см. рис. 3.1):

1. *Униполярность*. Напряжение сигнала, пропорциональное яркости, всегда больше нуля, так как яркость не бывает отрицательной.

2. *Ступенчатый характер сигнала*. Скачки на границах объектов (яркостные перепады) определяют контуры объектов. Крутизна скачков определяет четкость изображения. Уменьшение крутизны вызывает «размытие» контуров (потерю четкости). Крутизна зависит от размера элемента разложения. Изменение формы вершины импульса воспринимается как изменение характера освещенности объекта. Сигнал изображения отсчитывается от уровня черного (минимального значения в сигнале) до уровня белого (максимального значения в сигнале).

3. *Среднее значение сигнала* изображения пропорционально *средней яркости* всего кадра. Среднее значение часто называют постоянной составляющей сигнала, однако это значение постоянно только для неподвижной сцены, поэтому лучше применять термин «*средняя составляющая*».

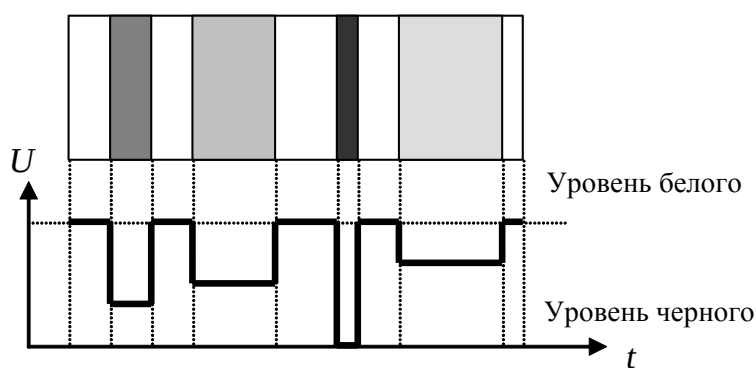


Рис. 3.1. Изображение полос с различной яркостью (вверху) и вид сигнала (внизу)

О полном телевизионном сигнале

Телевизионный сигнал (видеосигнал) имеет сложную форму и состоит из сигнала яркости, сигнала синхронизации, сигнала гашения. Все это называют полным телевизионным, или композитным, сигналом (ПТС). Сигнал яркости представляет собой последовательность видеоимпульсов напряжения, снимаемых в процессе развертки. Различают положительную полярность (позитив) сигнала (когда наибольшая амплитуда соответствует наибольшей яркости) и отрицательную полярность (негатив) сигнала (когда наибольшая амплитуда соответствует наименьшей яркости):

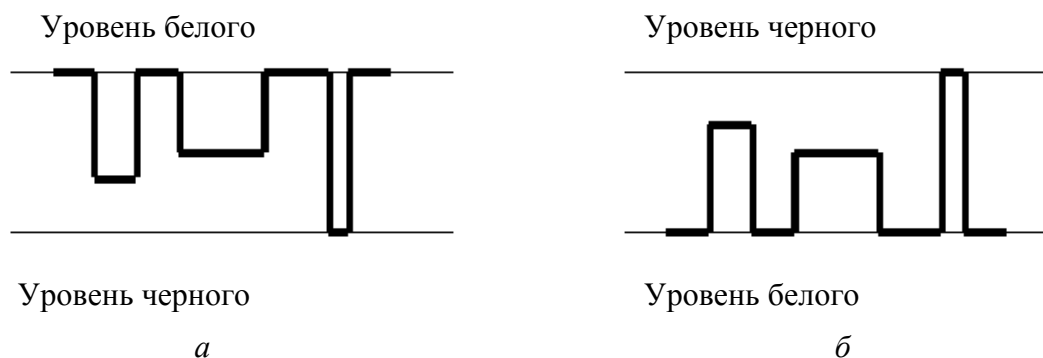


Рис. 3.2. Позитив (а) и негатив (б) сигнала изображения

В стандарте для видеосигнала принята положительная полярность. Вместе с тем при передаче на расстояние негатив используется в силу того, что визуально шумы на белом менее заметны.

Все развертывающие устройства телевизионной системы должны работать синхронно, что обеспечивается принудительной синхронизацией. Различают строчные (ССИ) и кадровые (КСИ) синхронизирующие импульсы. Они имеют различную длительность и период следования. Смесь ССИ и КСИ образует так называемый сигнал синхронизации приемника (ССП). При чересстрочной развертке необходимо обеспечить сдвиг растров полей относительно друг друга на половину строки.

Для полного запираания приемной ЭЛТ (кинескопа), а также передающей трубки, используются так называемые сигналы гашения, которые представляют собой смесь строчных (СГИ) и кадровых (КГИ) гасящих импульсов (рис. 3.3).

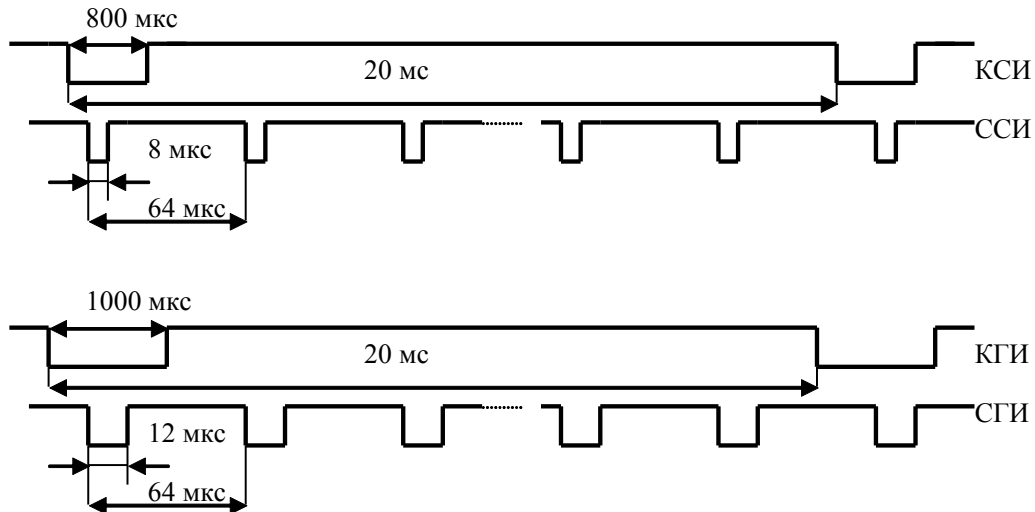


Рис. 3.3. Синхросигналы и сигналы гашения

Смесь СГИ и КГИ образует сигнал гашения приемника (СГП). По времени СГИ и КГИ соответствуют ССИ и КСИ, однако гасящие импульсы несколько расширены по отношению к синхронизирующим, что обеспечивает надежное запираение кинескопа во время обратного хода разверток, чтобы электронный луч в это время не оставил ни малейшего следа на экране (гашение луча).

Период следования ССИ и СГИ – 64 мкс при их длительности 8 и 12 мкс соответственно. Таким образом, прямой ход строчной развертки, в котором передаются сигналы изображения, составляет 52 мкс.

Для одновременной передачи сигнала изображения и сигналов синхронизации по каналу связи их размещают в различных участках диапазона амплитуд композитного сигнала. Так, ССП и СГП в композитном сигнале соответствуют уровням «чернее черного». При этом в композитном сигнале отношение размаха сигнала изображения к размаху синхросигналов составляет примерно 2:1 (0,6 и 0,3 В соответственно), а отношение размаха ССП к СГП – приблизительно 3:1 (0,3 и 0,1 В соответственно). Полный размах ПТС составляет $1,0 \pm 0,3$ В на нагрузке $R_n = 75$ Ом.

ПТС положительной полярности, содержащий сигнал яркости, имеет следующий вид:



Рис. 3.4. Примерный вид композитного сигнала

Для более качественного воспроизведения при чересстрочной развертке внутри КСИ делают «прорези» (врезки), а на часть КГИ, лежащую вне КСИ, «насаживают» так называемые уравнивающие импульсы, представляющие собой укороченные ССИ, следующие с интервалом в полстроки. Это обеспечивает точность совмещения (вложения) в кадр четных и нечетных строк (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Примерный вид КГИ и КСИ с врезками и уравнивающими импульсами

Рассмотренные виды сигналов представляют собой упрощенную форму ПТС. Вид ПТС строго регламентируется. Вместе с тем на практике допускают отход даже от упрощенной формы, и, например, для работы видеопросмотрового устройства (ВПУ) достаточно подавать композитный сигнал, состоящий из сигнала изображения и СГП (ССП может быть пропущен).

Спектр частот сигнала изображения

Ранее мы оценили спектр частот ТВ-сигнала по Котельникову (теорема отсчетов). Вернемся и оценим спектр, исходя из представлений об импульсном характере сигнала изображения.

Очевидно, что чем больше деталей в изображении, чем они мельче, тем более часто в сигнале будут следовать импульсы. Таким образом, крупным деталям соответствуют низкие частоты, а мелким – высокие.

Оценим самую низкую частоту в спектре сигнала – $f_{\min}$. Возьмем самое простое изображение – белая и черная полосы в кадре (один яркостный перепад), что дает самую минимальную частоту следования импульсов в сигнале (рис. 3.6).

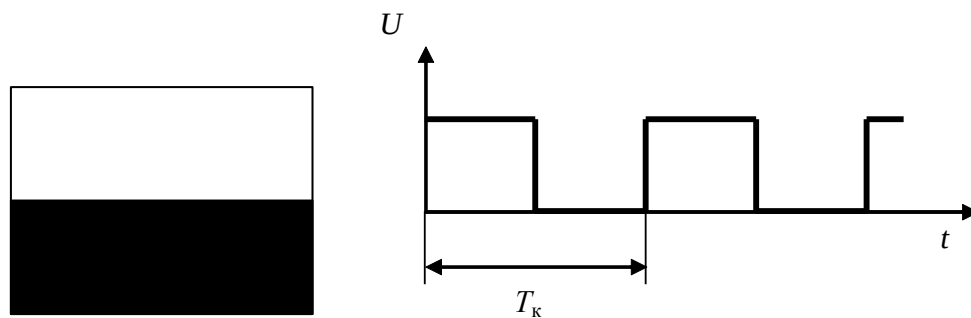


Рис. 3.6. Черно-белый перепад в кадре и сигнал его изображения

Если T_k – период следования кадра, то $f_{\min} = 1/T_k = n$, где n – число передаваемых кадров в секунду.

Для оценки верхней границы спектра $f_{\max}$ воспользуемся понятием о номинальном элементе изображения или раstra. Будем считать, что это

квадрат со стороной $a = h/Z$, где h – высота кадра, Z – число строк, т.е. a – это межстрочное расстояние.

Тогда общее число элементов раstra $N = (b/a)(h/a) = Z^2 b/h = KZ^2$, где b – размер строки, (b/a) – число элементов в строке, (h/a) – число элементов в колонке, а $K=b/h$ – формат кадра.

Если мы будем передавать вертикальные черно-белые полосы, то это дает искомую верхнюю границу спектра.

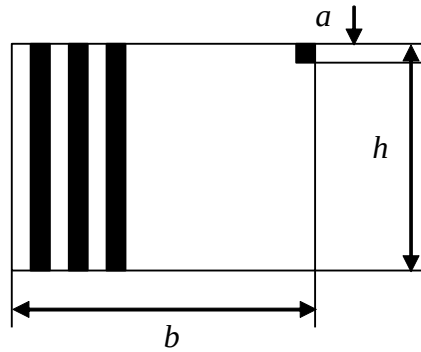


Рис. 3.7. К определению максимальной частоты в спектре сигнала изображения

Действительно, в этом случае при $N = KZ^2$ элементов будем иметь $N/2$ периодов повторения сигнала в строке и при передаче n кадров в секунду $f_{\text{макс}} = Nn/2$, т.е. получили то же самое, что и по теореме Котельникова. С учетом формата кадра $K = 4/3$ и $n = 25$ кадров/сек $f_{\text{макс}} = Nn/2 = KZ^2 n/2 \approx 16,7Z^2$. Таким образом, например, для количества элементов 800×600 максимальная ширина спектра ограничивается 6,0–6,5 МГц.

В телевидении часто используют оценку разрешающей способности системы в так называемых телевизионных линиях (т.л.). Для оценки используются специальные испытательные таблицы с нанесенными в центре и на краях штрихами, вписываемые в поле зрения телевизионной камеры. Оценка в т.л. является субъективной, однако она позволяет оценить весь видеотракт. Так, разрешающая способность в 350–400 т.л., которую имеют недорогие стандартные видеоустройства (стандарт SVHS), соответствует полосе частот 3,5–4,0 МГц и числу элементов изображения от 640×480 до 768×512 , что является вполне достаточным для многих прикладных задач. Если понизить разрешение до 320×240 элементов, то полосу пропускания можно сократить до 1–1,5 МГц.

При оценке разрешающей способности можно пользоваться соотношением: количество элементов в строке = $(1,7–1,8) \cdot \text{т.л.}$

3.4. О принципах образования сигналов цветного изображения

Рассмотрим некоторые вопросы, связанные с передачей цветного изображения [7; 13]. Очевидно, что количество информации, необходимое для передачи цветного изображения, в три раза превышает количество ин-

формации, необходимое для передачи черно-белого изображения, так как необходимо передавать сигналы 3 основных цветов – R , G , B .

Для получения сигналов RGB необходимо выделить в оптическом диапазоне соответствующие участки спектра и преобразовать оптическое излучение в каждом из участков в электрические сигналы. Для этого используется так называемая цветоделительная оптика, которая может быть построена на светофильтрах, призмах, дихроичных зеркалах и других оптических элементах.

Для передачи всех трех сигналов цветности одновременно с использованием трех датчиков необходимо отвести для каждого из них три канала (три полосы частот), каждый из которых имеет ширину $f_{\text{макс}}$, полученную выше при оценке величины спектра частот ТВ-сигнала.

Для передачи трех сигналов цветности последовательно, с использованием одного датчика, на который последовательно проецируются цветоделенные оптические изображения, с сохранением слитного восприятия передаваемого сюжета необходимо увеличить частоты параметров разложения в три раза, что потребует повышения быстродействия устройств и соответствующего увеличения $f_{\text{макс}}$.

Для неподвижного изображения можно передавать три сигнала последовательно в одной полосе частот, на выходе их запомнить, а затем синтезировать цветное изображение, одновременно подавая эти сигналы на соответствующие входы RGB -монитора.

Данные способы исходят из сохранения полноты передачи информации о цвете, т.е. их характеризует максимально возможное качество цветопередачи, обеспечиваемое в системе основных цветов RGB .

Оптимизация цветной ТВ-системы возможна за счет сокращения избыточности. При этом используются особенности зрения, позволяющие исключить часть информации о цвете, которая или почти не заметна для глаз, или заметна, но не мешает восприятию.

Например, мелкие детали можно не окрашивать и передавать их как черно-белые, так как глаз обращает наибольшее внимание на цвет крупных деталей. Это, в частности, позволяет сократить полосу пропускания для передачи цвета в 3–4 раза (до 1,5 МГц).

Для решения задачи совместимости черно-белой и цветной ТВ-систем в спектре частот яркостного сигнала располагают поднесущую частоту, модулированную сигналом цветности. На приемной стороне поднесущая выделяется, и сигнал цветности детектируется.

Если такой сигнал при передаче черно-белого сюжета использовать непосредственно для воспроизведения на цветном мониторе без отключения сигнала цветности и подавления поднесущей, то на черно-белом изображении будут наблюдаться помехи в виде цветных шумов («снега») от сигнала цветности (сигнал на уровне шумов, так как цвета нет) и «сетки» от биений цветовой поднесущей.

Поэтому в цветных телевизионных мониторах и телевизорах после выделения сигнала цветности поднесущая удаляется с помощью режекторного фильтра, а канал цветности при уменьшении сигнала цветности до некоторого порогового уровня автоматически отключается.

Совместимые ТВ-системы появляются в вещательном телевидении из экономических соображений, поскольку в свое время имелся большой парк как передающего, так и приемного оборудования для черно-белого телевидения. Тем не менее принятые для совместимых ТВ-систем стандарты сохраняются несмотря на практическое отсутствие в настоящее время черно-белого вещания, поскольку слишком много такого совместимого оборудования уже используется.

В прикладном телевидении черно-белое изображение используется достаточно широко, например, при визуализации объектов в различных спектральных диапазонах, при визуализации малоконтрастных объектов, когда требуется высокая чувствительность, и в других случаях.

В цветных прикладных ТВ-системах в основном используются стандартные цветные камеры. Однако существуют задачи прикладного характера, требующие высокого качества цветопередачи. В этом случае от принципа совместимости, как правило, отходят, используя методы формирования R -, G -, B -сигналов в полных полосах частот.

В целом можно выделить следующие методы получения сигнала цветного изображения:

1. Метод разделения света после оптической системы на 3 составляющие и проецирования на 3 монохромные фотоэлектронные преобразователя (ФЭП).
2. Последовательное экспонирование одного монохромного ФЭП через светофильтры R , G , B . (По сравнению с 1-м методом происходит ухудшение динамики.)
3. Последовательное экспонирование одного монохромного ФЭП при последовательном освещении объекта спектральными компонентами R , G , B . (По сравнению с 1-м методом ухудшается динамика, требуется устранение постороннего света на объекте.)
4. Использование многосигнальных ФЭП с нанесенными непосредственно на фоточувствительные элементы кодирующими светофильтрами. (По сравнению с 1-м методом разрешение ухудшается в два раза.)

3.5. Принципы образования сигналов в совместимых цветных ТВ-системах

Для совместимости черно-белого и цветного телевидения необходимо передавать, кроме сигналов цветности, сигнал яркости, соответствующий черно-белому изображению [7; 13].

Сигнал яркости получается сложением всех трех основных цветов. Однако человеческий глаз имеет разную чувствительность к цветам (см. рис. 2.1). Поэтому необходимо использовать смесь основных цветов RGB , в котором зеленого больше, чем красного и синего. Экспериментально установлено, что относительное содержание R , G и B в сигнале яркости должно быть следующее: $E_Y = 0,3E_R + 0,59E_G + 0,11E_B$.

Получение сигнала яркости (матрицирование) осуществляется на резистивных матрицах (рис. 3.8). Если $U_R = U_B = B_G$, то за счет делителей образуется $E_R = U_R R_4 / (R_1 + R_4)$; $E_G = U_G R_4 / (R_2 + R_4)$, $E_B = U_B R_4 / (R_3 + R_4)$. Подобрать соответствующие резисторы, получим на выходе матрицы (т.е. на R_4) сигнал яркости. При этом должно обеспечиваться следующее условие: $R_4 / (R_1 + R_4) = 0,3$; $R_4 / (R_2 + R_4) = 0,59$; $R_4 / (R_3 + R_4) = 0,11$.

В системах цветного телевидения, для того чтобы не повышать полосу частот, сигнал E_G отдельно не передается, а передают E_Y , E_B , E_R .

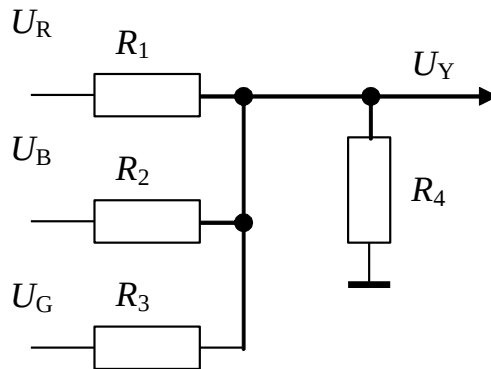


Рис. 3.8. Простейшая резистивная матрица

Сигнал E_G восстанавливают в приемнике путем матрицирования, т.е. вычисления $E_G = (E_Y - 0,11E_B - 0,3E_R) / 0,59$. Знак « $\leftarrow$ » говорит о необходимости изменения полярности сигналов при матрицировании.

Поскольку в цветном телевидении используют свойство зрения плохо различать цвета мелких деталей, которые соответствуют высоким частотам в спектре сигнала, то цветной сигнал может быть передан в более узкой полосе частот. Так, например, очень мелкие детали соответствуют 3–6 МГц, мелкие – 1–3 МГц, средние – 0,5–1 МГц, крупные – до 0,5 МГц. Цвет передают в полосе частот порядка 1,5 МГц.

Во всех совместимых цветных ТВ-системах передают не цветные сигналы E_R , E_G , E_B , а так называемые цветоразностные сигналы $E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$. Это устраняет мелкоструктурную сетку, появляющуюся из-за биения поднесущих на белых и светлых участках изображений, поскольку при $E_R = E_B = E_G = E_Y$ (т.е. на белых и серых участках) имеем $(E_B - E_Y) = (E_R - E_Y) = 0$. Иными словами, при малых насыщенностях цветоразностные сигналы малы по амплитуде и не создают заметных помех.

О совместимых системах цветного телевидения

Кратко остановимся на существующих в настоящее время системах (стандартах) цветного телевидения, которые являются совместимыми с черно-белой системой [3; 7; 13]. В совместимой системе сигнал цветного изображения должен иметь возможность воспроизведения в полутонах на черно-белом мониторе, а сигнал черно-белого изображения – возможность воспроизведения в полутонах на цветном.

Первая совместимая система NTSC (National Television System Committee) была создана в США, распространена в Америке. Затем в Германии была разработана система PAL (Phase Alternation Line) как усовершенствованный вариант NTSC. Распространена в Европе и ряде стран Азии.

Совместно разработанная Францией и СССР система SECAM (Sequense de Couleurs Avec Memoire – поочередность цветов и память) стала третьей системой, получившей распространение во Франции, России и некоторых других странах.

Причины возникновения этих систем, скорее всего, лежат в плоскости политики и экономики. Каждой из систем присущи свои достоинства и недостатки с точки зрения качества получаемых изображений и с точки зрения аппаратных затрат при технической реализации передающей и приемной частей системы. В результате изображения, полученные в одном стандарте, не могут быть воспроизведены в другом, поскольку возникает не только потеря цвета, но и потери синхронизации. Для перехода из стандарта в стандарт требуется специальная декодирующая и кодирующая аппаратура. Ниже упрощенно рассматриваются принципы работы совместимых систем цветного телевидения.

Принцип действия систем NTSC и PAL

В системах NTSC и PAL для передачи двух цветоразностных сигналов $E_{R-Y} = E_R - E_Y$ и $E_{B-Y} = E_B - E_Y$ используется одна поднесущая, модулируемая методом квадратурной (балансной) модуляции. Сущность квадратурной модуляции заключается в том, что оба цветоразностных сигнала модулируют одну и ту же частоту, но сдвинутую по фазе на 90° . Результирующий сигнал цветности в смесителе имеет фазу φ и амплитуду $|U_{\text{цв}}|$, зависящие от величин смешиваемых сигналов E_{R-Y} и E_{B-Y} , а именно: $U_{\text{цв}} = |U_{\text{цв}}|\sin(\omega t + \varphi)$, причем $|U_{\text{цв}}| = \sqrt{E_{R-Y}^2 + E_{B-Y}^2}$, а $\varphi = \arctg E_{B-Y}/E_{R-Y}$. Таким образом, изменение цветового тона приводит к изменению угла φ , а изменение насыщенности – к изменению амплитуды $|U_{\text{цв}}|$ (рис. 3.9).

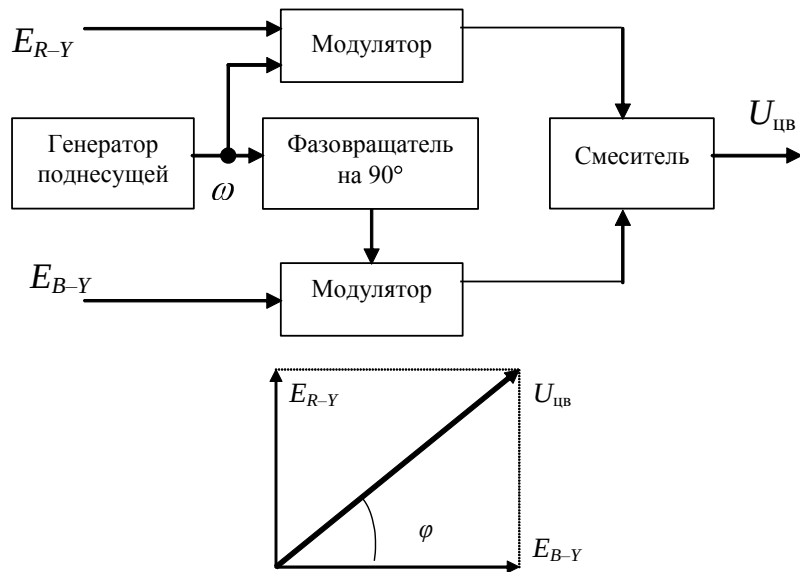


Рис. 3.9. Функциональная схема балансного модулятора и векторная диаграмма, поясняющая принцип его работы

В приемниках систем NTSC и PAL производится выделение цветовой поднесущей и разделение сигнала цветности на два цветоразностных сигнала методом синхронного детектирования (см. рис. 3.10). Сущность синхронного детектирования заключается в том, что в результате взаимодействия сигнала цветности с частотами гетеродина, сдвинутыми относительно друг друга по фазе на 90° , возникают биения частот (высокочастотные составляющие) и постоянные составляющие. Амплитуды постоянных составляющих пропорциональны амплитудам соответствующих цветоразностных сигналов E_{R-Y} и E_{B-Y} . Далее сигнал цветности смешивается с сигналом яркости и передается в полосе частот яркостного сигнала (см. рис. 3.11).

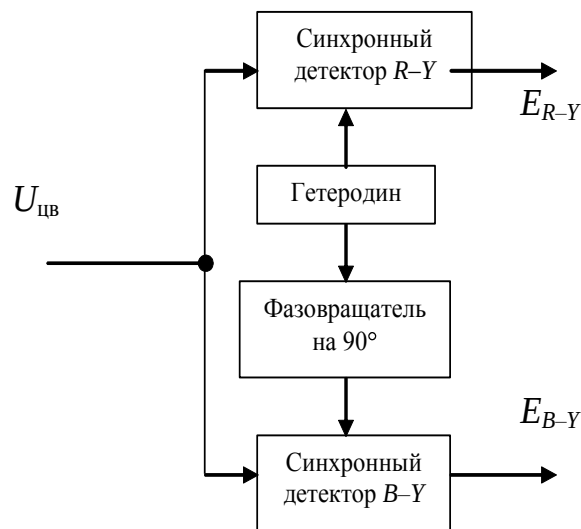


Рис. 3.10. Функциональная схема синхронного детектора

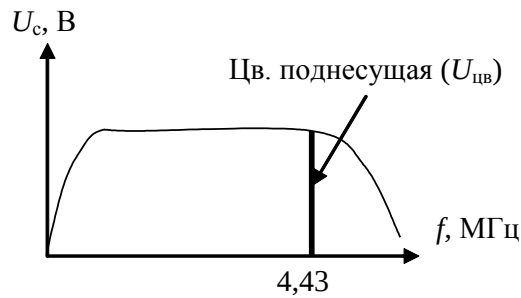


Рис. 3.11. Спектр сигнала яркости и цветовой поднесущая

Высокочастотные составляющие не используются и отфильтровываются. Так как в NTSC каждому цвету соответствует свой фазовый угол поднесущей, то фазовые сдвиги из-за нелинейности фазовых характеристик в трактах передачи и приема ведут к искажениям цветов. В этом состоит основной недостаток данного стандарта, требующего высокой точности фазовых характеристик приемо-передающих устройств.

В системе PAL предприняты меры для уменьшения влияния фазовых искажений за счет дополнительного, от строки к строке, изменения фазы цветовой поднесущей на 180° . В системе PAL для сокращения избыточности и, следовательно, полосы частот сигнала цветности используются несколько отличающиеся по структуре от NTSC цветоразностные сигналы. При этом используется свойство зрения одинаково воспринимать некоторые мелкие разноцветные детали изображения. Например, мелкие детали красного и желтого цвета субъективно воспринимаются оранжевыми, а синие и зеленые — голубыми. При дальнейшем уменьшении размера деталей они становятся черно-белыми, причем цвета исчезают в определенном порядке: сначала исчезает синий, затем — желтый, красный и голубой цвет.

Достоинством системы PAL является существенное снижение влияния фазовых искажений и, следовательно, сохранение цветового тона, однако при этом происходит некоторое снижение насыщенности и усложнения аппаратной части. Реверс фазы, применяемый в системе PAL, дает значительную компенсацию фазовых искажений, так как фазовая ошибка меняет знак, оставаясь по величине постоянной (если система линейна).

При этом уменьшается насыщенность, а также возникающий эффект мерцания с кратностью полей ($1/2$ при реверсе фазы по полям и $1/4$ при реверсе фазы по строкам) при больших фазовых сдвигах (больше 20°). Для уменьшения эффекта мерцания («жалюзи») используют задержку одного из сигналов на строку при синхронном детектировании в приемнике.

В результате эффект мерцания уменьшается, однако падает четкость в цвете по вертикали из-за усреднения цветностей в смежных строках.

Принцип действия системы SECAM

В системе SECAM цветоразностные сигналы передаются поочередно через строку. Для получения сигнала цветности на текущей строке в качестве второго цветоразностного сигнала используется сигнал предыдущей строки. Такой метод сокращения избыточности в сигнале цветности приводит к уменьшению четкости цветного изображения по вертикали. Иными словами, цвет мелких деталей по вертикали в системе SECAM передается хуже, чем в системах NTSC и PAL. Однако для глаза это практически незаметно, потому что четкость мелких цветных деталей все равно ограничена полосой пропускания порядка 1,5 МГц.

Технически поочередная передача цветоразностных сигналов реализуется следующим образом. В кодере передающего устройства используется электронный коммутатор цветоразностных сигналов, переключающийся во время обратного хода строчной развертки. Сигнал с чередующимися через строку цветами модулирует поднесущую, которая смешивается с сигналом яркости (рис. 3.12, а).

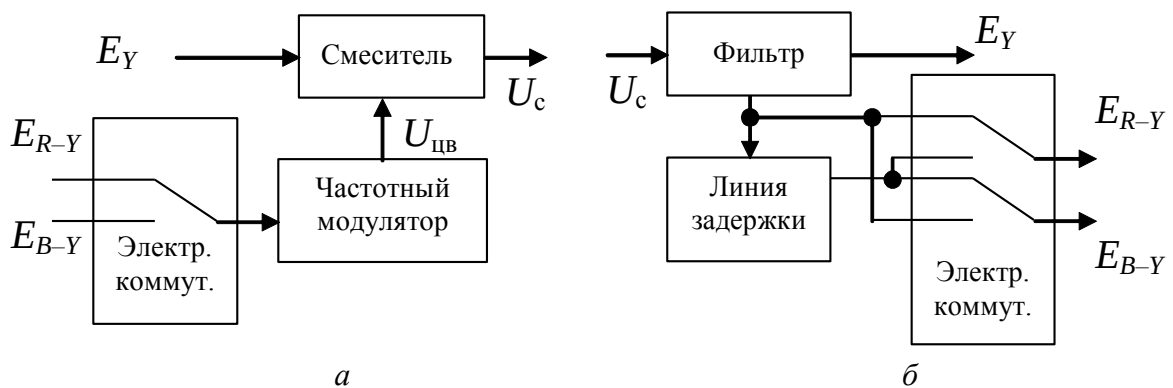


Рис. 3.12. Функциональные схемы кодера (а) и декодера (б) SECAM

В декодере приемного устройства (см. рис. 3.12, б) используется линия задержки на длительность строки и электронный коммутатор, переключающийся во время обратного хода строчной развертки синхронно и синфазно с электронным коммутатором кодера. В результате на каждом из двух выходов электронного коммутатора выделяется только один вид цветоразностного сигнала. В системе SECAM, как и в других системах, возникает проблема помехоустойчивости, которая решается в ней специфически, в частности, введением так называемых предыскажений сигнала цветности на передающей стороне и последующей их коррекцией на приемной. В системе SECAM принципиально не устранимы помехи от поднесущей на черно-белых участках изображения, в то время как в системах NTSC и PAL на таких участках сигналы цветности отсутствуют.

Считается, что приемная часть системы SECAM несколько проще и дешевле, чем в системах NTSC и PAL, а передающая — несколько сложнее.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип развертки?
2. Какова специфика сигналов яркости изображений?
3. Что представляет собой полный (композитный) видеосигнал?
4. Каковы основные принципы образования сигнала цветного изображения?
5. В чем заключается общий принцип образования сигналов в совместимых телевизионных системах?
6. В чем заключается принцип действия системы NTSC?
7. В чем заключается принцип действия системы PAL?
8. В чем заключается принцип действия системы SECAM?

Глава 4 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ «СВЕТ – СИГНАЛ»

4.1. Фотоэффект и его закономерности

Преобразование «свет – сигнал» основано на фотоэффекте, вызывающем появление электрического тока (фототока) под действием подающего светового потока. Мишень фотоприемника (преобразователя «свет – сигнал») представляет собой фоточувствительный слой, который можно рассматривать как совокупность фотоэлементов, сигнал (фототок) которых соответствует сигналу от каждой точки изображения объекта [1; 2].

Различают *внутренний* (в полупроводнике появляются свободные электроны) и *внешний* (электроны вылетают за пределы полупроводника или проводника) *фотоэффект*.

Внешний фотоэффект (фотоэлектронная эмиссия) был обнаружен Г. Герцем в 1887 г. в известных опытах с электромагнитными волнами, когда искра начинала проскакивать на большем расстоянии между электродами, если их освещать ультрафиолетовым светом. Наибольшей фотоэлектронной эмиссией обладают щелочные металлы (калий, натрий, рубидий, цезий).

Основные закономерности фотоэффекта (существование фототока и его характеристики) установил А.Г. Столетов. По закону Столетова, $I = \varepsilon \Phi$, т.е. фототок I пропорционален световому потоку Φ , падающему на фотокатод, ε – чувствительность фотоэлемента (фотокатода), мА/лм. Фототок *униполяр*ен (ток течет от катода к аноду) и *безынерцион*ен.

В своих опытах Столетов использовал цинковую пластинку, перед которой располагал металлическую сетку. Все это он помещал в колбу, откачивал воздух, создавая вакуум, подключал между пластинкой и сеткой батарейку и гальванометр, освещал пластинку УФ-светом и регистрировал фототок. Для фотоэлементов были получены вольт-амперные характеристики, имеющие участок насыщения, на котором и выполняется закон Столетова (рис. 4.1).

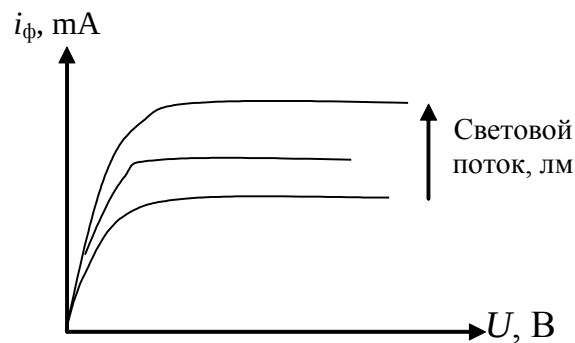


Рис. 4.1. Вольт-амперные характеристики фотоэлемента

Фотокатоды обладают спектральными свойствами, т.е. их чувствительность $\varepsilon = f(\lambda)$ в зависимости от вещества, используемого в фотокатод.

Если известна спектральная чувствительность $\varepsilon(\lambda)$, то всегда может быть рассчитана интегральная чувствительность фотоэлемента как отношение фототока насыщения i к вызывающему его световому потоку Φ : $\varepsilon = i/\Phi$.

Пусть распределение мощности в источнике света – $\omega(\lambda, T)$, где T – абсолютная температура. Тогда полный фототок, протекающий в цепи, фотоэлемента $i = i_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) \omega(\lambda, T) d\lambda$, где i_0 – ток, соответствующий максимуму чувствительности. Если необходимо рассчитать интегральную чув-

ствительность, то с учетом $\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega(\lambda, T) d\lambda$ можно воспользоваться указанным выше соотношением $\varepsilon = i/\Phi$.

Если спектральная характеристика фотоэлемента совпадает с кривой видности, то $\lambda_1 = \lambda_{\text{фиол}} = 400$ нм, $\lambda_2 = \lambda_{\text{красн}} = 700$ нм и, с учетом коэффициента $A = 680$ лм/вт, получим $\varepsilon = i_0/680$ (А/лм). Такая спектральная характеристика крайне желательна, например, для цветного телевидения.

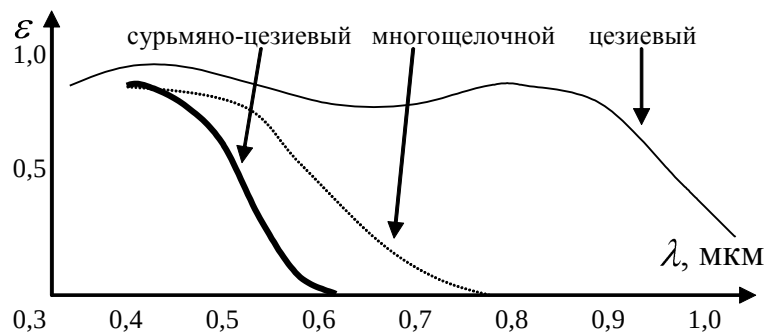


Рис. 4.2. Спектральные характеристики фотокатодов

Фотоэлектронное преобразование отражает переход фотонного представления видеоинформации к электронному. Качество фотоэлектронного преобразования характеризуется квантовым выходом, т.е. отношением числа накопленных фотоэлектронов к числу упавших фотонов.

Идеальный фотоприемник, не теряющий информации, – это счетчик фотонов, имеющий 100-процентный квантовый выход. В реальности такого, конечно, нет. Считается, что фотоприемник с внутренним фотоэффектом имеет на $\lambda = 0,7$ мкм квантовый выход приблизительно 50–60%, который падает до 10–20% на границах диапазона спектральной чувствительности $\lambda = 1,0$ мкм.

Фотоприемник с внешним фотоэффектом имеет еще меньший квантовый выход, так как для выхода фотоэлектронов во внешний объем должна быть затрачена большая работа выхода, чем для простого перехода фотоэлектронов на более высокие энергетические уровни при внутреннем фотоэффекте.

Энергия фотона зависит от длины волны. Чем короче длина волны, тем выше энергия. Таким образом, диапазон чувствительности («красная» граница) для фотоприемников с внутренним фотоэффектом может быть продвинут в более длинноволновую (красную и инфракрасную) область спектра.

В зависимости от материала fotocувствительного слоя эта длинноволновая граница фотоэффекта различна. Например, селен имеет «красную» границу 0,7 мкм, т.е. соответствующую спектральной чувствительности глаза человека, кремний (наиболее распространенный полупроводник) – примерно 1,1 мкм, германий – 1,8 мкм (кремний и германий прозрачны для инфракрасного излучения). Сульфиды и селениды свинца и более сложные соединения (арсениды, антимониды индия) позволяют «уйти» на десятки микрометров (10–30 мкм) в ИК область спектра.

Таким образом, можно сделать фотокатоды чувствительными не только в видимой, но и в ИК и УФ областях спектра.

4.2. Способы преобразования «свет – сигнал»

Фотоэлектронные умножители

Существуют различные способы получения и усиления слабых фототоков [1–4]. Один из них основан на вторичной электронной эмиссии и реализован в фотоэлектронных умножителях (ФЭУ).

Вторичная электронная эмиссия заключается в том, что каждый падающий на поверхность электрон способен выбить из нее несколько вторичных электронов. Процесс характеризуется коэффициентом вторично-электронной эмиссии $G = n_2/n_1 = i_2/i_1$, где n – соответствующее количество выбитых и падающих электронов, а i – вторичный и первичный токи. ФЭУ могут усилить фототок в миллионы раз.

Микроканальные пластины и электронно-оптические преобразователи

Для построения высокочувствительных преобразователей «свет – сигнал» в телевидении используются электронно-оптические преобразователи (ЭОП), называемые также усилителями яркости. Основой ЭОП являются микроканальные пластины (МКП).

Суть работы ЭОП на базе МКП заключается в следующем. Выбитые электроны из фотомишени каждого элемента разгоняются по отдельным туннелям (каналам) до больших энергий. В результате эффекта вторичной электронной эмиссии от соударений электронов со стенками канала образуются электронные лавины, бомбардирующие люминесцентный экран, на котором визуализируется изображение, усиленное по яркости.

Интересна технология изготовления МКП. В ее основе и лежит эффект уменьшения диаметра оптического волокна при сохранении формы его сечения в процессе вытяжки. Сначала производят последовательную вытяжку волокон из специального состава, вложенных в стеклянные трубки. Образованные таким образом пары трубки-волокна собираются в пучки и вновь подвергаются вытяжке. Вытянутые пучки собираются в блоки и снова вытягиваются. В результате достигают диаметра волокон до нескольких микрон при их количестве до нескольких миллионов в жгуте с диаметром до 1 дюйма. Жгут режут на тонкие планшайбы и подвергают их травлению с целью удаления внутренних волокон, находящихся в микротрубочках. Важно обеспечить достаточную равномерность получаемой структуры в виде микроскопической решетки, имеющей миллионы отверстий. Торцы планшайбы металлизуют, создавая электроды.

При подаче на электроды МКП высокого напряжения можно получить направленное движение электронов от фотомишени, располагаемой непосредственно перед МКП к люминесцентному экрану, размещаемому за МКП.

В процессе изготовления осуществляется автоматизированный контроль геометрических параметров МКП. Контролируемые параметры для МКП – это диаметр каналов МКП, его среднеквадратическое отклонение от заданного значения, а также количество дефектов (спекшихся каналов на поверхности) на единицу площади.

Фотосопротивления

Фотосопротивления – это полупроводники (селен, сернистый свинец и др.), которые под влиянием поглощенного света резко снижают свое сопротивление. Для внутреннего освобождения электронов требуется меньшая энергия, чем для осуществления работы выхода, следовательно, фотопроводимость могут вызвать кванты света с меньшей энергией. Квантовый выход близок к единице. Это определяет высокую чувствительность. Порог внутреннего фотоэффекта лежит в ИК-области.

Однако высокая чувствительность в фотосопротивлениях «оплачивается» инерционностью. Проводимость фотосопротивления при изменении освещенности не устанавливается мгновенно. Время установления может достигать 1 мс.

Тем не менее после Второй мировой войны были созданы трубки с мишенью на фотосопротивлениях – видиконы, которые просуществовали почти 50 лет и лишь в 90-х гг. прошлого века были практически окончательно вытеснены ПЗС.

4.3. Принципы действия передающих телевизионных устройств

Бурное развитие телевизионной техники связано с появлением электронного телевидения, основой которого стали электровакуумные передающие трубки [1; 2]. В пособии их особенности не рассматриваются подробно, так как современный этап развития телевидения характеризуется широким применением твердотельных преобразователей «свет – сигнал». Они окончательно вытеснили передающие телевизионные трубки, безраздельно господствовавшие еще 25 лет тому назад. Поэтому в настоящее время говорят о наступлении «эры твердотельного телевидения», которое, впрочем, также является электронным [5; 14].

Первые твердотельные матричные фотоприемники не имели достаточной разрешающей способности и обладали (из-за несовершенства технологии изготовления) дефектами, проявлявшимися в виде черных или белых локальных точек, пятен, «столбов». В настоящее время эти технологические проблемы практически решены.

Однако передающие трубки до сих пор применяются в специальных целях (пировидиконы, рентгеновидиконы). Основная идея, реализованная в электровакуумных передающих трубках, заключается в том, что заряд, образованный фотонами, падающими на фотомишень (фоточувствительный слой трубки), последовательно переносится (коммутируется) сканирующим электронным лучом.

Передающие трубки прошли достаточно долгий путь развития от иконоскопов, супериконаскопов, ортиконов, суперортиконов до малогабаритных видиконов. В трубках в основном использовался внешний фотоэффект. Исключение составляет видикон, в котором, как и в твердотельных фотоприемниках, используется внутренний фотоэффект.

В вакуумных трубках использованы законы так называемой электронной оптики. Согласно этим законам, основанным на глубокой аналогии со световыми лучами, электронные лучи можно проецировать, фокусировать, отклонять, переносить и т.д. с помощью электрических или магнитных полей.

Принято различать два принципа действия передающих телевизионных устройств: мгновенный и одновременный (параллельный). В системах мгновенного тока сигнал пропорционален яркости передаваемого в данный момент времени элемента изображения. Несмотря на ряд достоинств (линейность световой характеристики, широкий динамический диапазон сигнала, высокая разрешающая способность), они имеют общий недостаток – низкую чувствительность. В системах одновременного (параллельного) тока лежит принцип накопления энергии. Так как время передачи кадра (T) много больше времени передачи одного элемента (τ), т.е. $T \gg \tau$, то может быть реализовано накопление зарядов (например на конденсаторах) от каждого из элементов.

Фототок по закону Столетова пропорционален световому потоку. Накопим за время t заряд $q = i_{\phi}t$. Получим сигнал $U_c = q/C$ для каждого

элементарного конденсатора с емкостью C . Если $t = T$, то накопленный на конденсаторе за это время заряд $q = i_{\phi}T$. Разрядим его за время τ . Таким образом, $q = i_{\phi}T = i_p\tau$, а, значит, $i_p/i_{\phi} = T/\tau = N$, где N – число элементов разложения. Таким образом, *средний ток разряда во столько раз больше тока заряда, во сколько раз время заряда T больше времени разряда t* . Накапливаемое распределение зарядов называется зарядным рельефом, а соответствующее распределение напряжений – потенциальным рельефом.

О системах мгновенного типа

К системам мгновенного типа, в которых видеосигнал в данный момент времени пропорционален яркости данной точки изображения, относятся так называемая *система «бегущий луч»* и вакуумная трубка – *диссектор*. Хотя в настоящее время данные технические решения практически не используются, рассмотрим кратко их принципы действия для общего представления о возможных и ранее применявшихся методах преобразования «свет – сигнал».

Принцип работы системы «бегущий луч» поясняется на рис. 4.3. На люминофоре просвечивающей электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) формируется растр. Яркое световое пятно через линзу от ЭЛТ проецируется на пленку (объект). Бегущий луч просвечивает в каждый момент времени один элемент изображения и через конденсор поступает на ФЭУ. На фотокатоде ФЭУ освещается кружок, яркость которого пропорциональна световому потоку от бегущего луча, т.е. от каждого элемента.

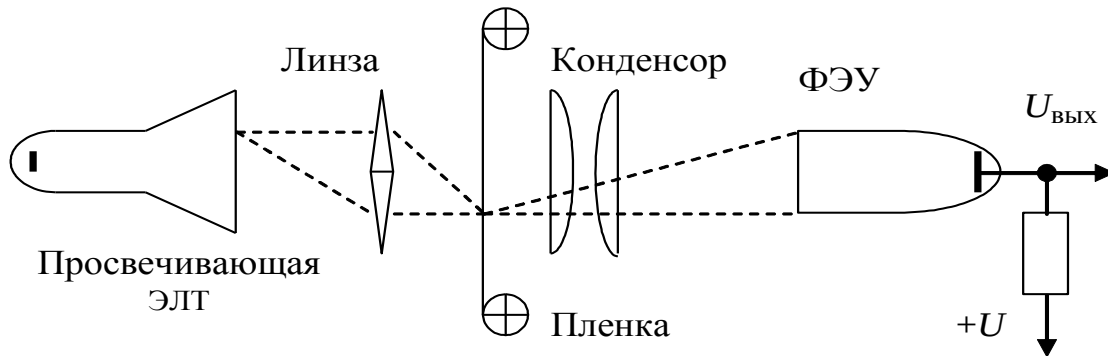


Рис. 4.3. Функциональная схема системы «бегущий луч»

Достоинствами системы «бегущий луч», как и диссектора, являются: линейная световая характеристика, безынерционность, большой динамический диапазон. Повышение чувствительности в системе достигается за счет концентрации светового луча на одном элементе разложения. Основная область применения – передача кинофильмов в телевизионном стандарте.

Принцип работы диссектора поясняется на рис. 4.4. Фокусирующие катушки осуществляют электронный перенос изображения на экран. Отклоняющие катушки осуществляют развертку, т.е. перемещают изображение

относительно отверстия экрана. ФЭУ усиливает электроны от каждого элемента электронного разворачиваемого изображения.

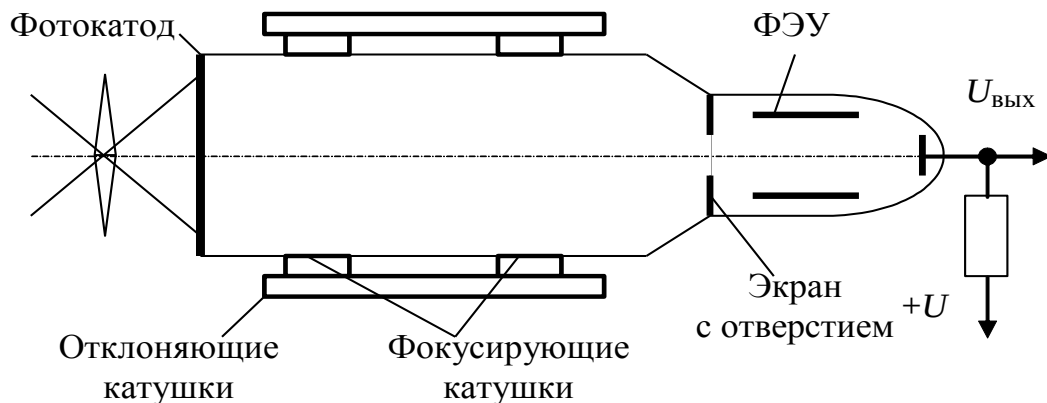


Рис. 4.4. Функциональная схема диссектора

Достоинствами диссектора, как и системы «бегущий луч», являются: линейная световая характеристика, безынерционность, большой динамический диапазон. Недостаток – низкая чувствительность; область применения – телевизионные измерения.

О системах параллельного типа

Параллельный принцип действия, или принцип накопления, лежит в основе большинства передающих трубок, а также ПЗС. Рассмотрим сущность технической реализации принципа накопления на эквивалентной схеме (см. рис. 4.5). В течение длительности кадра (T) ключ K разомкнут. Происходит заряд емкости C . В течение времени опроса элемента (τ) ключ замыкается. Происходит разряд емкости через нагрузку. Роль ключа в электронно-лучевых (электровакуумных) приборах выполняет электронный луч, отклоняющийся по мозаике фотоэлементов (фотомишени) в соответствии с разверткой.

Данный принцип действия был предложен еще в 1928 г. и впервые реализован В.К. Зворыкиным в США и, немного позднее, А.П. Константиновым в России в передающей трубке *иконоскоп*, основанной на внешнем фотоэффекте. Вакуумные передающие трубки прошли огромный путь развития в направлении повышения качества, чувствительности, снижения габаритов и т.д. В частности, были созданы достаточно миниатюрные и качественные видиконы размерами до $(1/4)''$ в диаметре и длиной до 100 мм, основанные на использовании внутреннего фотоэффекта и успешно использовавшиеся до начала 90-х гг. XX в.

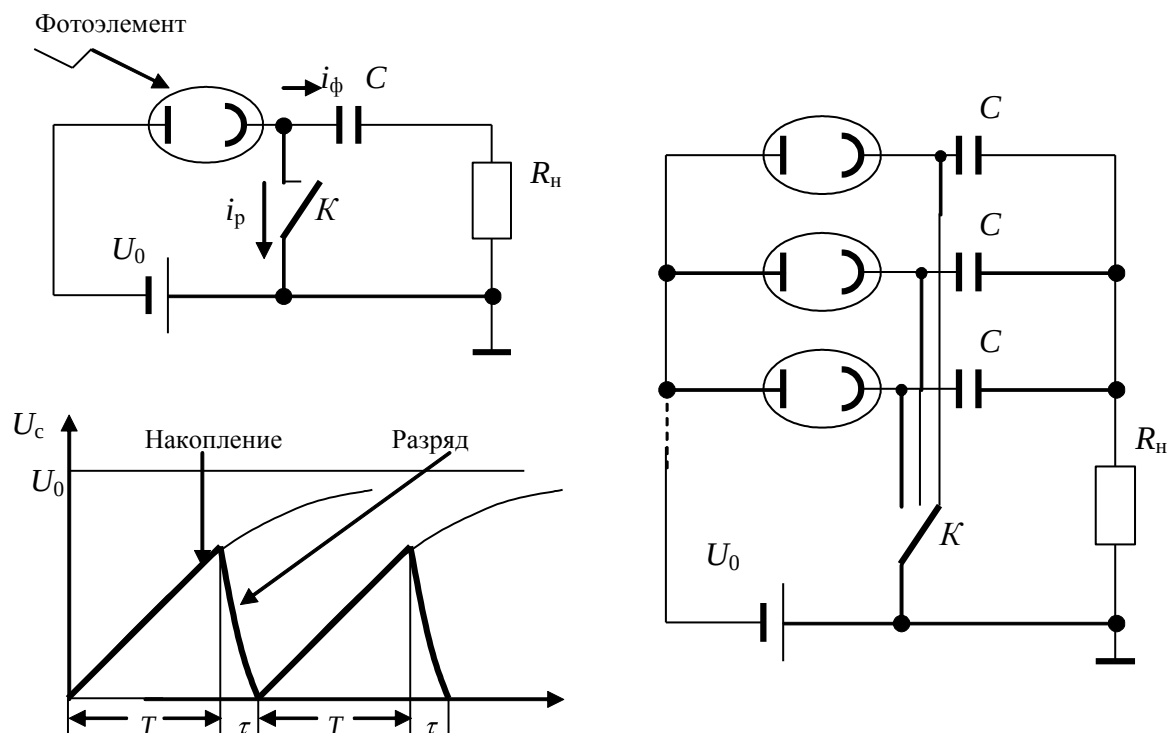


Рис. 4.5. К технической реализации принципа накопления

Видикон

Рассмотрим упрощенную схему (рис. 4.6), поясняющую работу видикона.

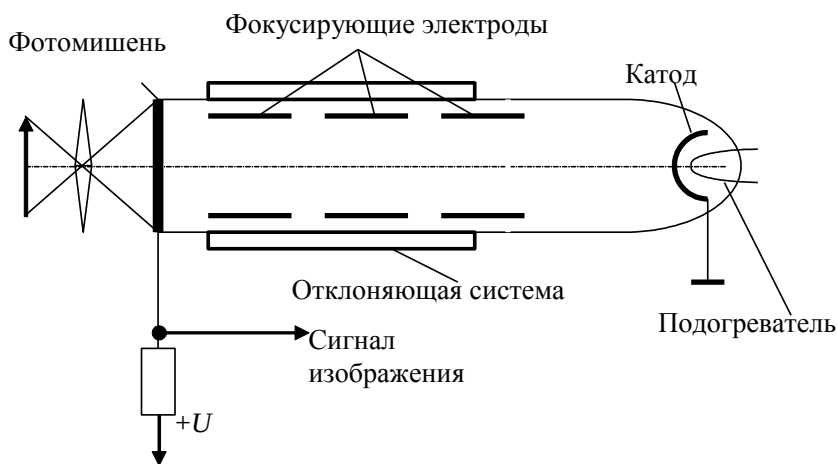


Рис. 4.6. Функциональная схема видикона

Фотомишень представляет собой прозрачный токопроводящий слой (сигнальная пластина) с кольцевым выводом и слой фотосопротивления (обычно – трехсернистая сурьма Sb_2S_3 – стебнит). Под действием света сопротивление стебнита понижается – получается потенциальный рельеф (рельеф сопротивлений).

Потенциальный рельеф, образованный на фотомишени, считывается электронным лучом, испускаемым катодом трубки в результате термоэлектронной эмиссии. Электронный луч выполняет коммутационную функцию. Размер (сечение) электронного луча определяет разрешающую способность трубки.

Процесс считывания разрушает потенциальный рельеф, который постоянно возобновляется при поступлении на мишень новых фотонов от передаваемой сцены. Сигнал изображения пропорционален величине потенциального рельефа в каждом его элементе и является непрерывным аналоговым сигналом.

Элементы рельефа считываются последовательно за счет отклонения луча слева направо и сверху вниз отклоняющей системой, формирующей магнитное поле, изменяющееся по закону развертки (пилообразного напряжения, подаваемого на строчные и кадровые отклоняющие катушки). Перемещением луча от катода к мишени и его фокусировкой управляют специальные электроды, на которые подаются соответствующие напряжения.

Процесс иллюстрируется эквивалентной схемой (рис. 4.7), где C – элементарная емкость участка мишени, R – фотосопротивление элемента участка мишени. Упрощенно схема выглядит следующим образом:

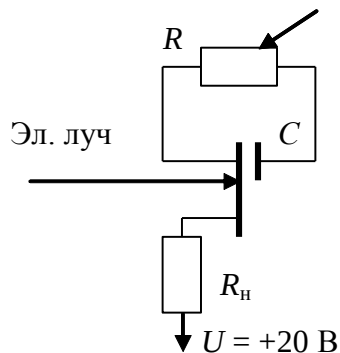


Рис. 4.7. Эквивалентная схема участка мишени видеокон

При коммутации электронным лучом потенциал обкладки элементарной емкости достигает потенциала катода. Емкость разряжается через фотосопротивление R , которое обратно пропорционально освещенности участка. Протекающий через R ток вызывает на нем падение напряжения, которое приводит к изменению напряжения на нагрузке, подключенной к сигнальной пластине. Имеет место инерционность внутреннего фотоэффекта, присущая фотосопротивлениям. К ней добавляется коммутационная инерционность, вызванная постоянной времени RC , поскольку элементарная емкость не успевает полностью разрядиться за время коммутации.

4.4. Твердотельные преобразователи «свет – сигнал»

Развитие твердотельных технологий привело практически к полному вытеснению вакуумных преобразователей «свет – сигнал». Современное телевидение с полным правом можно назвать твердотельным телевидением, что характеризует тот качественный скачок в электронном телевидении, который произошел в конце XX в. Главное преимущество твердотельных преобразователей «свет – сигнал» перед вакуумными трубками – это высокая *надежность* (более чем на порядок), *малые габариты* (при том же размере фотомишени толщина твердотельного преобразователя – несколько миллиметров), практическое *отсутствие геометрических искажений* («жесткий» растр), *линейная световая характеристика*, широкий динамический диапазон, *малая инерционность*, экономичность. При этом отсутствует электронный луч, исключена проблема совмещения растров в цветных камерах [5; 7; 14].

Принцип работы матричного твердотельного преобразователя без накопления иллюстрируется эквивалентной схемой на рис. 4.8.

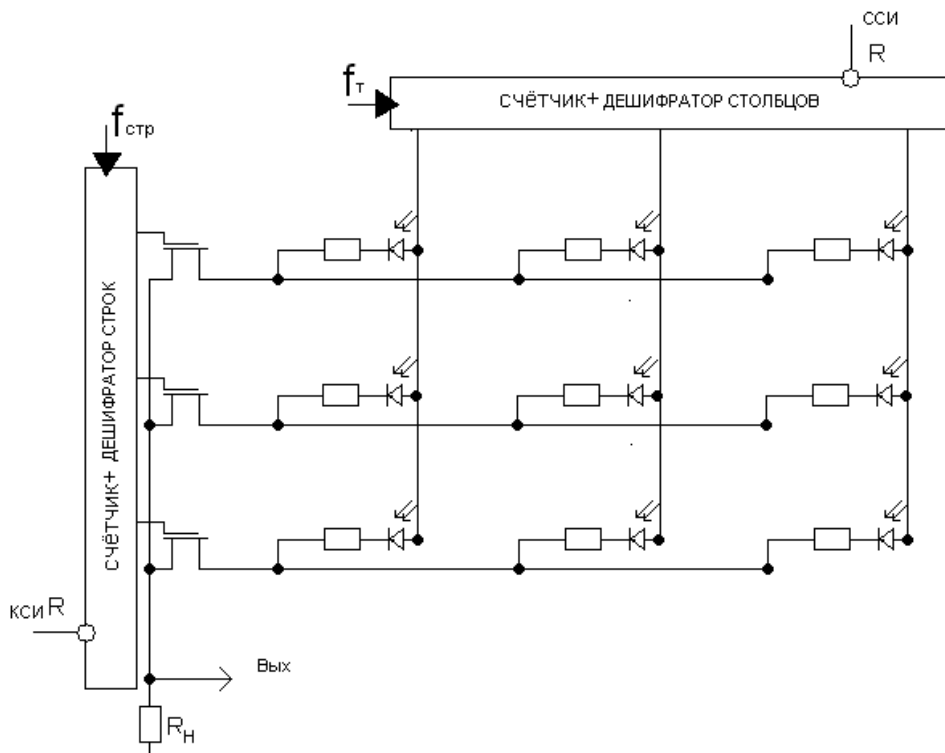


Рис. 4.8. Эквивалентная схема матричного твердотельного преобразователя без накопления

Подключение к элементу осуществляется за счет выбора строки и столбца. При подаче на столбец положительного импульса открывается диод, а при подаче положительного импульса на строку – ключевой каскад на полевом транзисторе (ПТ). В результате от выбранного элемента матрицы через R_n начинает протекать фототок, и образуется видеосигнал $U_{вых}$.

Принцип работы матричного твердотельного преобразователя с накоплением иллюстрируется эквивалентной схемой на рис. 4.9.

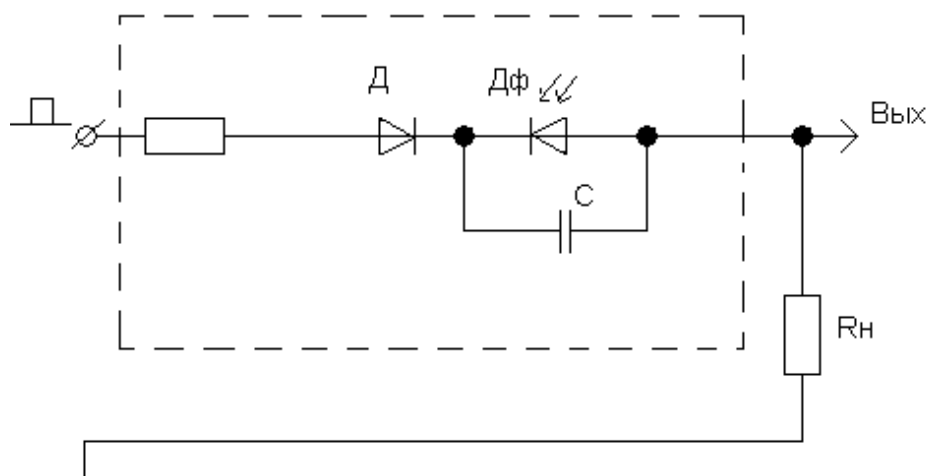


Рис. 4.9. Эквивалентная схема ячейки с накоплением, подключенная к нагрузке

При первоначальной подаче коммутирующего импульса диод D открывается и емкость p – n перехода C полностью заряжается. Во время цикла накопления коммутирующий импульс отсутствует, и емкость медленно разряжается через фотодиод D_f .

Скорость разряда пропорциональна световому потоку. При подаче очередного коммутирующего импульса емкость дозарядается до полного значения. Ток дозаряда создает на нагрузке R_n выходное напряжение видеосигнала, прямо пропорциональное световому потоку.

Приборы с зарядовой связью

Появление приборов с зарядовой связью (ПЗС) характеризует первый этап «твердотельной революции» в телевидении. ПЗС изобрели В. Бойл и Г. Смит в 1970 г., создавая элементы памяти на МОП-структурах. Каждая ячейка ПЗС (рис. 4.10) – это своего рода накопительный конденсатор. Работа ПЗС основана на накоплении и хранении зарядов в потенциальных ямах и последующем переносе этих зарядов в выходное устройство с образованием видеосигнала.

Потенциальная яма (обедненная основными носителями область в подложке МОП-структуры) создается подачей положительного потенциала для подложки p -типа (с дырочной проводимостью) и, соответственно, отрицательного потенциала для подложки n -типа (с электронной проводимостью).

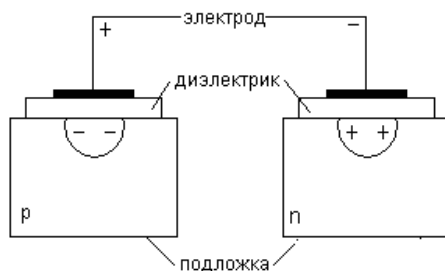


Рис. 4.10. Ячейки ПЗС

Под воздействием светового потока потенциальные ямы заполняются неосновными носителями. Заряд в широких пределах пропорционален световому потоку. Время хранения заряда в потенциальной яме определяется временем удержания потенциала на электроде. При этом из-за термогенерации образуется незначительный фоновый заряд.

Процесс переноса наиболее эффективно осуществляется при использовании трехфазной схемы ПЗС (рис. 4.11). В этом случае каждый элемент образован тремя независимыми ячейками.

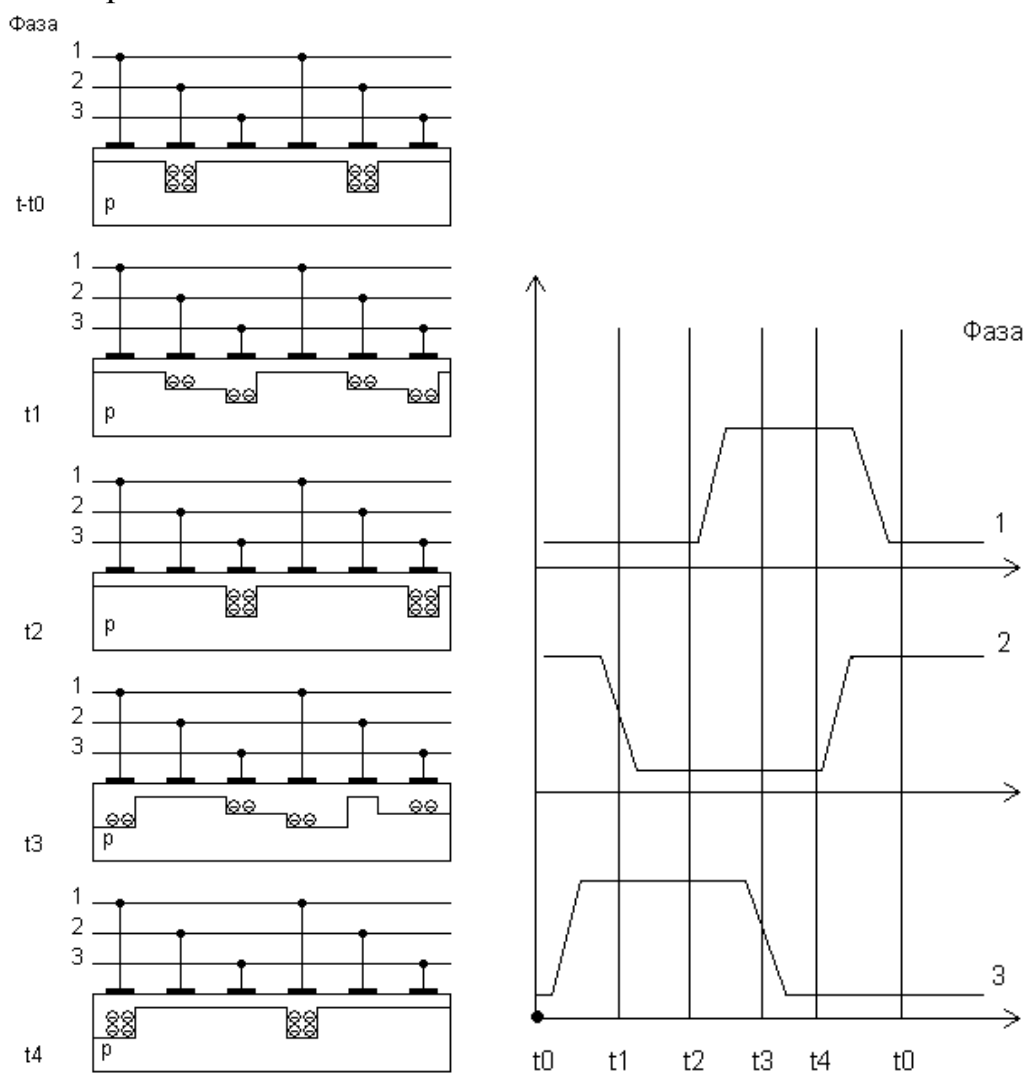


Рис. 4.11. Процесс переноса зарядов в трехфазной схеме ПЗС

Для линейных ПЗС осуществляется перемещение зарядовых пакетов в одном направлении. Матричные ПЗС можно представить в виде ряда линеек (строк). Для предотвращения растекания зарядов по направлению перемещения в ПЗС-матрице предусмотрены специальные изолированные области – стоп-каналы.

Для вывода зарядов в матричных ПЗС осуществляют их параллельный перенос в защищенный от света выходной регистр (линейку ПЗС). В выходном регистре осуществляется последовательный перенос зарядов и их вывод на оконечный усилитель на МОП-транзисторе.

Все ПЗС-матрицы имеют фоточувствительную секцию накопления и выходной регистр. Для переноса зарядов ПЗС содержит дополнительные секции. В зависимости от организации процесса переноса различают ПЗС с *кадровым*, *строчным* и *строчно-кадровым* переносом.

ПЗС с *кадровым переносом* содержит дополнительно секцию памяти, защищенную от света и расположенную вместе с секцией накопления и выходным регистром. Зарядовые пакеты в течение кадра синхронизируются и строка за строкой выводятся из секции накопления в секцию памяти (рис. 4.12).

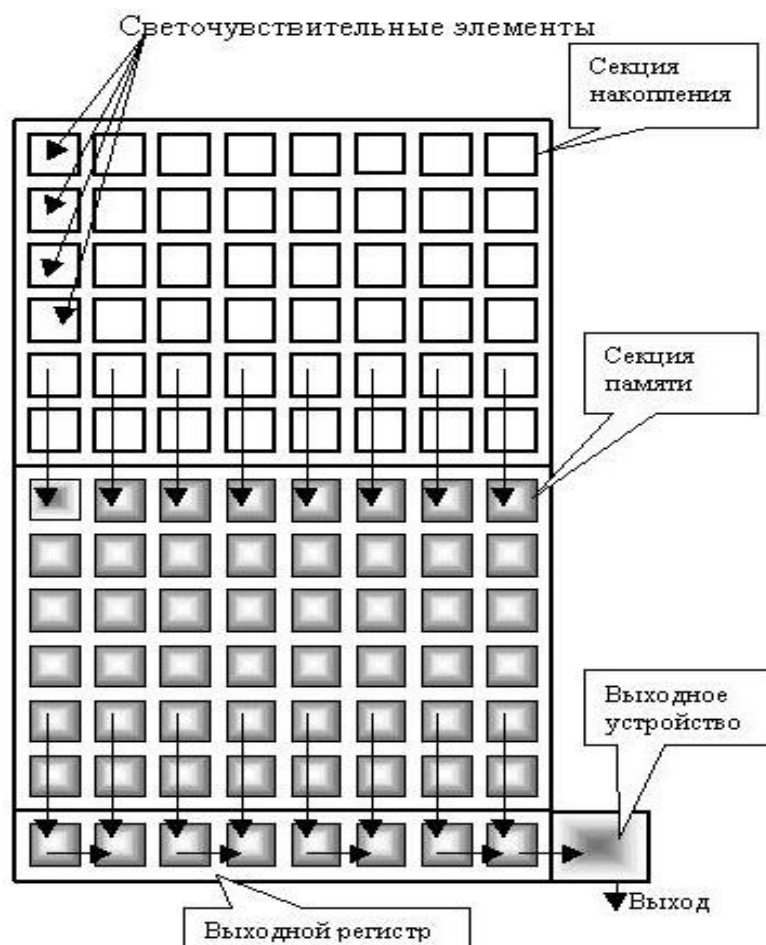


Рис. 4.12. Организация матрицы ПЗС по принципу «кадровый перенос»

Во время экспонирования кадра в фоточувствительной секции накопления осуществляется чередование зарядовых пакетов, а из секции памяти зарядовые пакеты предыдущего кадра строка за строкой выводятся в выходной регистр и поэлементно перемещаются к конечному усилителю.

Две секции позволяют легко получать в приборе ПЗС сигнал межкадровой разности, поскольку за счет дополнительной секции памяти образование выходного сигнала задерживается на один кадр. Для этого необходимо дополнительно снабдить секцию накопления параллельным выходным регистром.

Недостаток ПЗС с кадровым переносом – вертикальный смаз, обусловленный «протаскиванием» зарядовых пакетов через все строки фоточувствительной секции накопления во время переноса.

В ПЗС со *строчным переносом* вертикальные столбцы секций накопления и памяти чередуются друг с другом (рис. 4.13).

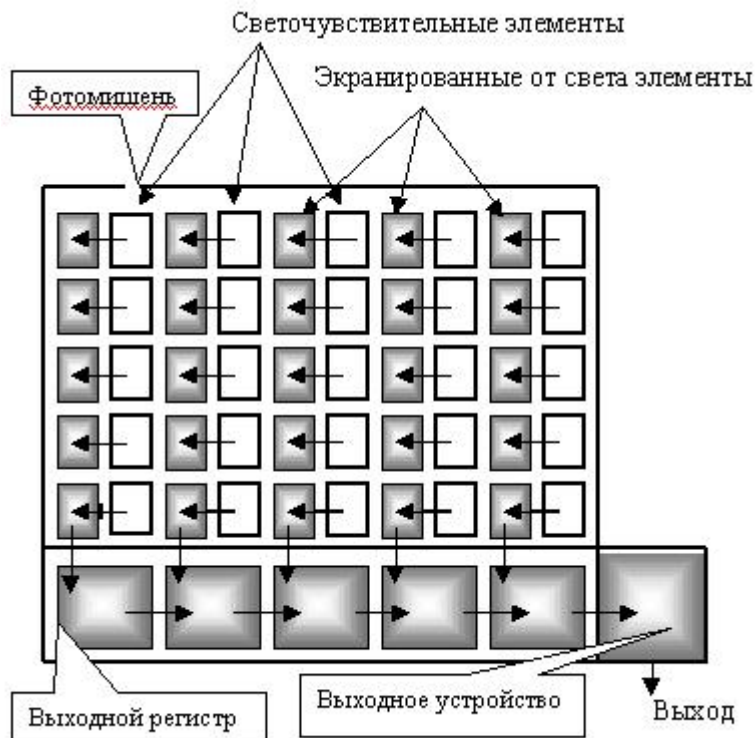


Рис. 4.13. Организация матрицы ПЗС по принципу «строчный перенос»

Такая организация позволяет более эффективно переносить зарядовые пакеты из секции накопления в соседние столбцы светозащищенной секции памяти, а затем осуществлять перенос строк внутри секции памяти в выходной регистр. Как и в предыдущем случае, процесс переноса в секцию памяти производится во время кадровой синхронизации, а процесс вывода из секции памяти в выходной регистр – одновременно с экспонированием следующего кадра в секции накопления.

ПЗС-матрица со *строчно-кадровым* переносом имеет дополнительную секцию памяти, которая дает возможность для межкадровой обработки изображения в ПЗС (рис. 4.14).

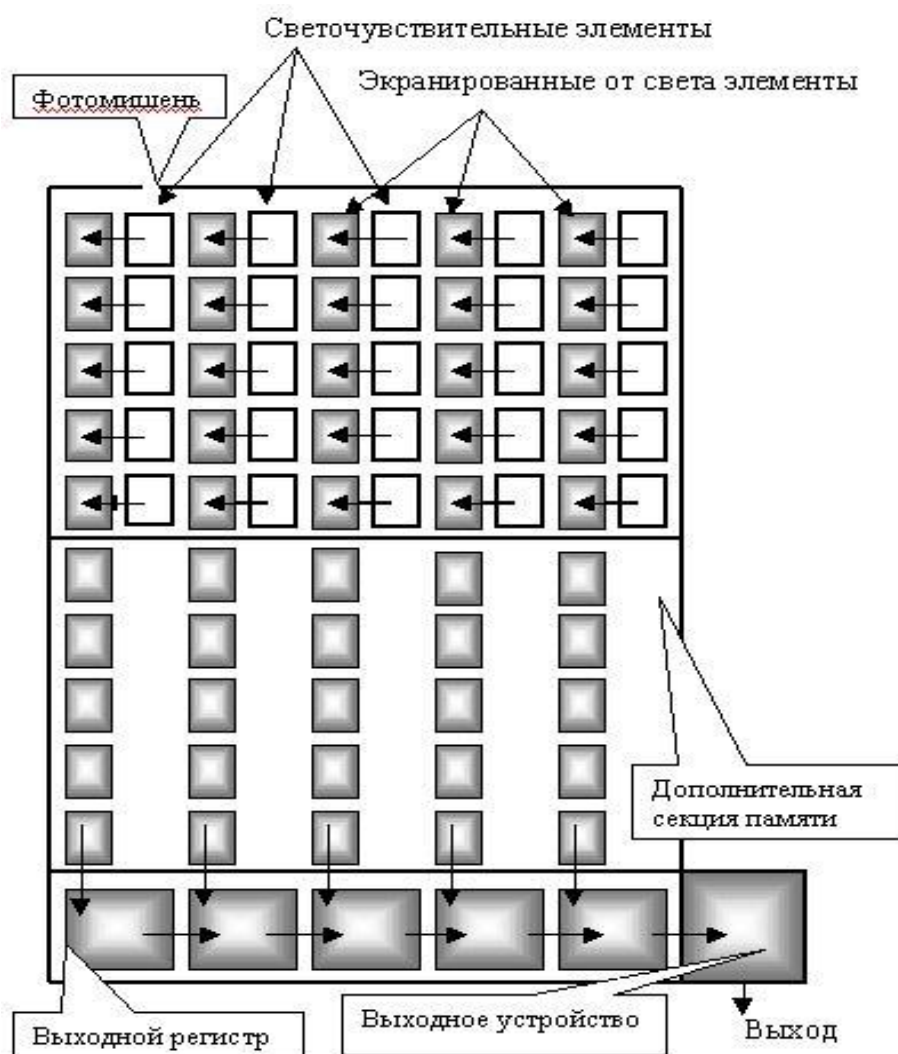


Рис. 4.14. Организация матрицы ПЗС по принципу «строчно-кадровый перенос»

Например, наличие дополнительного выходного регистра позволяет получить на выходе сигнал межкадровой разности, поскольку секция памяти осуществляет задержку выходного сигнала на время кадра.

Общая проблема ПЗС – требование высокоэффективного переноса. В этой связи большую эффективность можно достичь в приборах с зарядовой инжекцией (ПЗИ), технология которых значительно более сложна по сравнению с технологией ПЗС.

Приборы с зарядовой инжекцией

В матрице с инжекцией заряда (Charge Injection Device, CID) в пределах каждого элемента изображения размещены два МОП-конденсатора, разделенные областью p -типа и объединенные соединительными шинами в строки и столбцы (рис. 4.15).

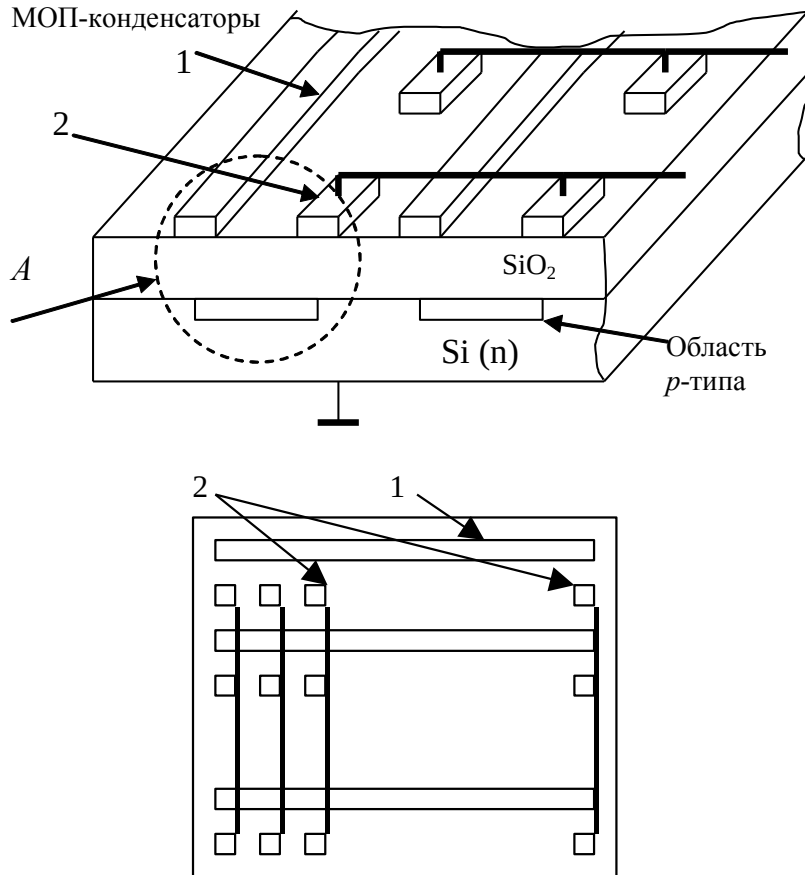


Рис. 4.15. Структура матрицы ПЗИ:

1 – строки; 2 – столбцы; A – сечение фрагмента матрицы

Сущность работы матрицы заключается в том, что для сканирования изображения сначала осуществляется одновременный перенос зарядовых пакетов от выбранной строки из МОП-конденсатора 1 (см. сечение фрагмента матрицы ПЗИ – A) к соседним столбцам в МОП-конденсаторы 2, а затем их последовательный опрос и считывание сигнала изображения, пропорционального накопленным зарядам. После опроса всех столбцов текущей строки производится выбор следующей строки, и процесс сканирования повторяется.

Рассмотрим его более подробно. В режиме накопления оба конденсатора находятся под «отрицательным» потенциалом относительно подложки, и под обоими электродами накапливается фотогенерированный заряд неосновных «положительных» носителей – дырок (рис. 4.16, a).

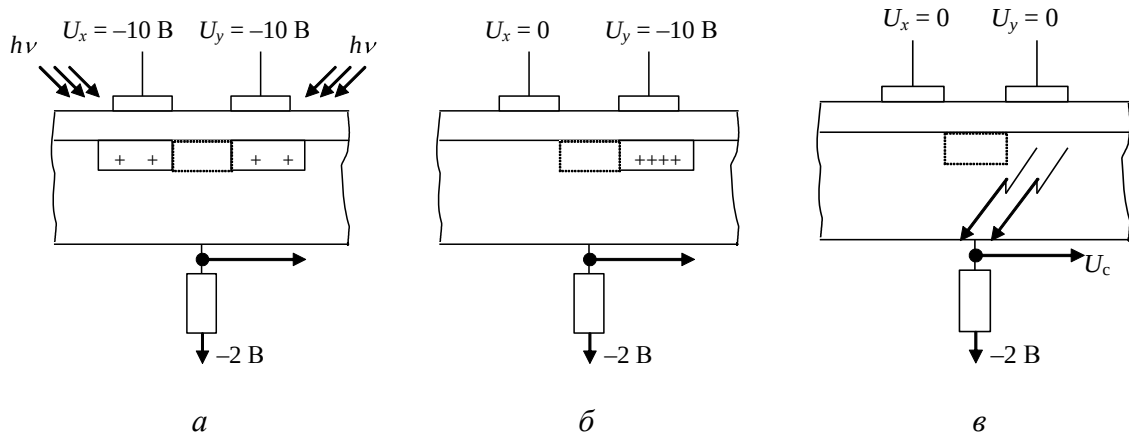


Рис. 4.16. Принцип работы матрицы с инжекцией заряда

При выборе строки на соответствующем электроде устанавливают потенциал $U_x = 0$, что вызывает перетекание зарядов из-под всех электродов этой строки под соседние электроды рядом расположенных столбцов (рис. 4.16, б). Для сброса элементов этой строки производится последовательный сброс на нуль напряжения на столбцовых шинах (рис. 4.16, в), сопровождаемый инжекцией в подложку заряда, накопленного в опрашиваемом элементе. Такая инжекция образует напряжение сигнала на нагрузочном резисторе — U_c . Иными словами, выбор строки в матрице сопровождается перетеканием зарядов элементов строки под столбцовые шины, последовательный сброс которых инжектирует в подложку заряды, создающие ток сигнала.

В конструкции матрицы ПЗИ приняты все меры для упрощения и ускорения процессов последовательного сканирования изображения. В частности, реализуется автоинкрементный метод адресации, когда к текущему адресу строки и столбца в соответствующие моменты времени последовательно прибавляется по единице. Адрес строки меняется при поступлении ССИ, а адрес столбца — при поступлении импульсов дискретизации сигнала изображения в строке.

Достоинством матрицы ПЗИ является принципиальная возможность реализации координатной адресации к ее ячейкам. Однако из-за высокого флуктуационного и геометрического шума, а также из-за низкой чувствительности ПЗИ не смогли конкурировать с ПЗС.

Шумы ПЗС-матрицы

Выделяют флуктуационные шумы и детерминированные помехи [14]. *Детерминированные помехи* связаны, во-первых, с неоднородностями чувствительности элементов ПЗС-матрицы и неоднородностями темнового тока (генерация зарядов при отсутствии засветки матрицы), которые часто называют геометрическим шумом (точнее — фиксированным шумом: Fixed

Patter Noise), и, во-вторых, с коммутационными помехами из-за наводок от импульсных напряжений на электродах матрицы.

Уровень коммутационной помехи может быть достаточно велик и может занимать весь динамический диапазон сигнала.

С геометрическим шумом борются компенсационными методами, запоминая значения темнового тока и фона соответственно при закрытом от света фотоприемнике и при контрольной равномерной засветке. На основании этих значений рассчитывают коэффициенты компенсации для каждого элемента матрицы. Затем значения темнового тока вычитают из информационного сигнала и умножают на коэффициенты компенсации.

Флуктуационный шум является совокупностью шумов: фотонного, шума темнового тока, фонового заряда, переноса, установки потенциала узла детектирования в выходном устройстве (КТС-шум), выходного транзистора.

Фотонный шум не устраним принципиально, поскольку обусловлен самой природой света, испускаемого порциями – квантами, число которых на единицу поверхности в единицу времени является случайной величиной [18].

Темновой ток, генерируемый в элементах матрицы даже при отсутствии света вследствие теплового движения зарядов, также случаен. Этот фактор уменьшают за счет охлаждения матрицы.

Шум переноса возникает из-за случайного характера захвата и освобождения носителей заряда в потенциальных ямах (ловушках). Он зависит в основном от числа переносов, т.е. фактически от количества элементов матрицы, температуры, площади электрода. Процесс переноса характеризуют неэффективностью, которая в настоящее время за счет совершенствования технологии достигла практического минимума.

КТС-шум и коммутационную помеху устраняют при помощи так называемой схемы двойной коррелированной выборки (ДКВ).

Таким образом, с учетом достигнутых технологических и схемотехнических приемов основным источником шума в ПЗС-матрице является шум выходного устройства (транзистора). Этот фактор шума является основным и для КМОП-фотоприемников.

Схема двойной коррелированной выборки

Схема ДКВ является стандартным методом аналоговой обработки сигнала выходного устройства твердотельного преобразователя «свет – сигнал».

Необходимость такой обработки возникает при использовании выходного устройства с так называемой плавающей диффузионной областью (см. рис. 4.17). В таком устройстве предусмотрен сброс информационного заряда перед считыванием новой информации.

После сброса уровень сигнала оказывается далеко не идеально «привязанным» к уровню черного, имеются флуктуации уровня, которые в ли-

температуре называют шумами установки потенциала узла детектирования или КТС-шумом.

Термин «КТС-шум» происходит из зависимости этого шума не только от величины остаточного заряда, но и от собственной емкости выходного устройства (C), абсолютной температуры (T) и пропорциональности постоянной Больцмана (K). КТС-шум ведет к изменению средней яркости соседних элементов изображения (мерцанию).

Кроме этого, импульс сброса остаточного заряда приводит к дополнительной помехе, наблюдаемой на изображении в виде темных столбцов, поскольку он ограничивает время считывания полезной информации с выходного устройства в пределах элемента.

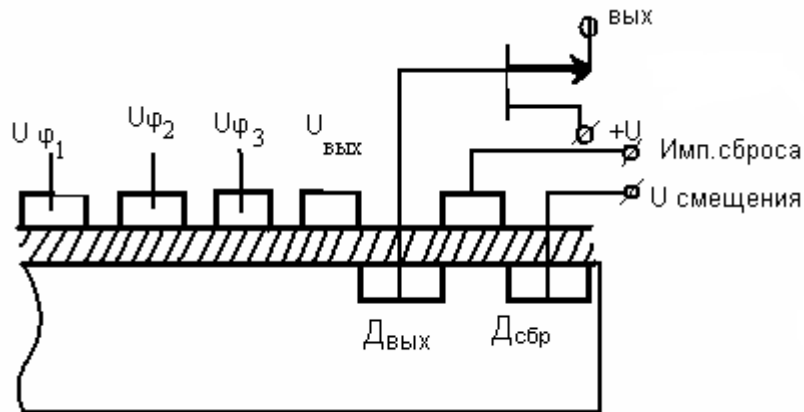


Рис. 4.17. Структура выходного устройства с плавающей диффузионной областью:

U_{φ_1} , U_{φ_2} , U_{φ_3} – напряжение на фазах φ_1 , φ_2 , φ_3 ; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение;

$D_{\text{вых}}$ – выходной диод; $D_{\text{сбр}}$ – диод сброса

Схема ДКВ (см. рис. 4.18) практически полностью устраняет указанные недостатки. Фактически схема ДКВ представляет собой схему управляемой фиксации и схему выборки – хранения, включенные последовательно.

Рассмотрим реализацию схемы ДКВ. ОУ1–ОУ3 – буферные элементы на операционных усилителях. Сигнал с выходного устройства поступает на схему фиксации. В момент действия импульса фиксации Ф1 ключ К1 замыкается, и потенциал точки А «привязывается» к уровню «черного», например, равному 0. Импульс фиксации действует «внутри» импульса сброса, тем самым устраняются флуктуации установки потенциала (КТС-шум).

После фиксации сигнал поступает на схему выборки – хранения. В моменты, соответствующие информационной составляющей сигнала, формируют сигнал выборки Ф2. При этом ключ К2 замыкается, и конденсатор С2 заряжается или разряжается до максимального уровня сигнала в данном элементе разложения.

После прекращения действия сигнала Ф2 ключ К2 размыкается, и схема приходит в режим хранения. Большое входное сопротивление вы-

ходного буфера ОУ3 препятствует разряду емкости C_2 . Ключи K_1 и K_2 выполняются в виде аналоговых ключей на полевых транзисторах.

Схема ДКВ используется практически во всех камерах на ПЗС, а также в тех КМОП-сенсорах, где это необходимо, например, при использовании в них рассмотренного выше выходного устройства. Наличие схемы ДКВ и достигнутая технологически в настоящее время величина неэффективности переноса позволяют считать основным источником шума ПЗС-камеры шум транзистора выходного устройства.

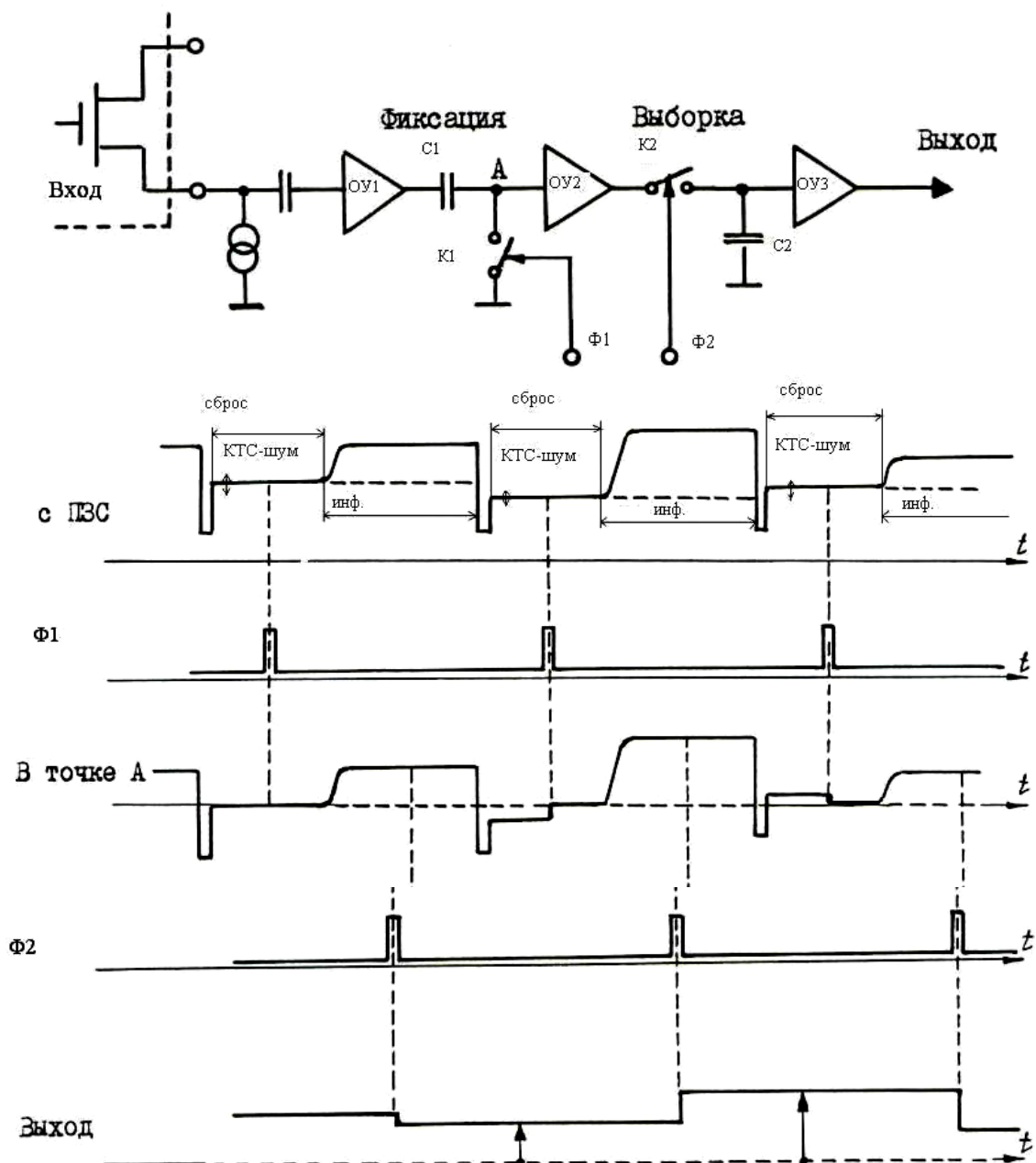


Рис. 4.18. Схема ДКВ и временные диаграммы ее работы

КМОП-фотоприемники и видеосистемы на кристалле

Реализация развертки в ПЗС путем «самосканирования», т.е. «протаскивания» заряда каждого элемента по столбцу и строке, не позволяет организовать координатную адресацию к каждому элементу и приводит к специфическим искажениям, связанным с неэффективностью переноса зарядов.

Развитие твердотельных преобразователей «свет – сигнал» привело в 90-х гг. к созданию КМОП-фотоприемников, основанных на технологии производства СБИС. В них принципиальным отличием от ПЗС явилась возможность реализации координатной адресации к каждому элементу и снабжения каждого элемента не только отдельным усилителем, но и отдельным АЦП (аналого-цифровым преобразователем).

Все это дает возможность сочетать функции фотоприема и обработки изображений. Например, применение так называемой Z-развертки (зигзагообразное считывание) позволяет реализовывать различные алгоритмы внутрикадровой обработки сигнала от соседних элементов изображения в темпе поступления информации.

Развитие КМОП-технологии в настоящее время сделало эти фотоприемники конкурентно способными по сравнению с ПЗС. В ближайшем будущем ожидается полное вытеснение ПЗС технологией КМОП.

КМОП – более дешевые фотоприемники, превосходящие ПЗС по функциональным возможностям и имеющие больший динамический диапазон. В настоящее время преодолеваются сложности, связанные с повышением чувствительности и отношением сигнал/шум (в частности, связанные со структурной помехой из-за неоднородности сигналов и чувствительности элементов матрицы).

Интеграция в кристалле фоточувствительных элементов, устройств обработки сигнала, дополнительных устройств, микропроцессоров и программируемой логики привела к появлению так называемых видеосистем на кристалле, что характеризуется в настоящее время как второй этап твердотельной революции. Ниже (на рис. 4.19–4.29) показаны разновидности реализации элементов КМОП-матрицы [5; 14].

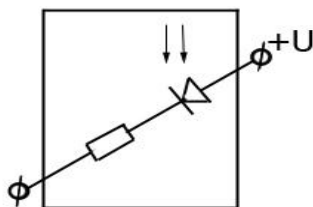


Рис. 4.19. Фоточувствительный элемент (ФЭ) – основа пикселя КМОП

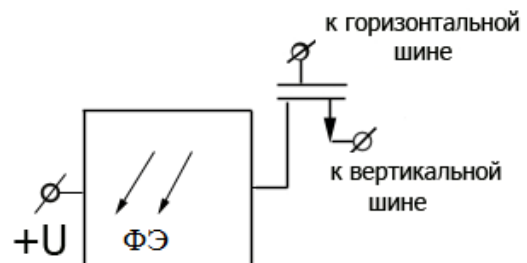


Рис. 4.20. Пассивный пиксель

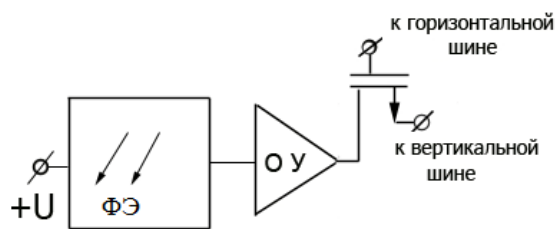


Рис. 4.21. Активный пиксель:
ОУ – операционный усилитель

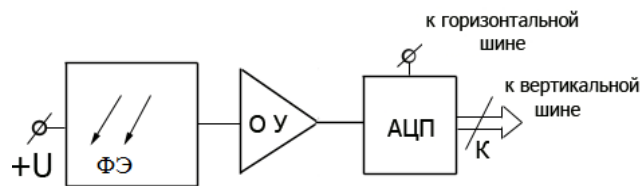


Рис. 4.22. Цифровой пиксель:
АЦП – аналого-цифровой преобразователь

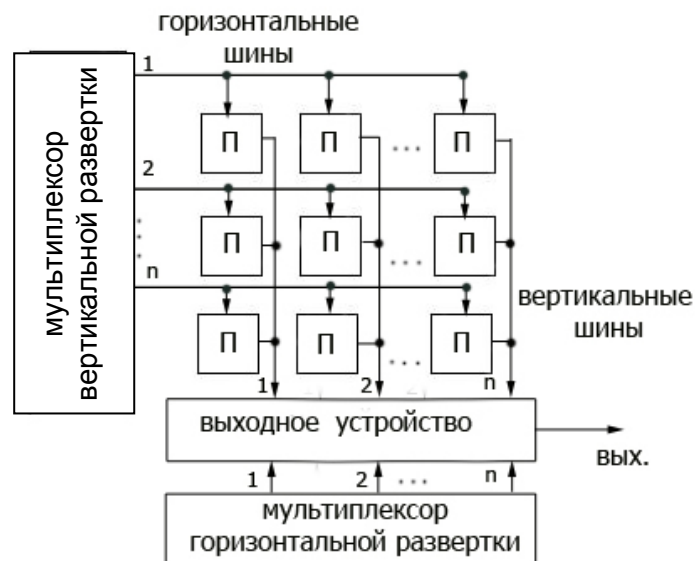


Рис. 4.23. КМОП-матрица: П – пиксель

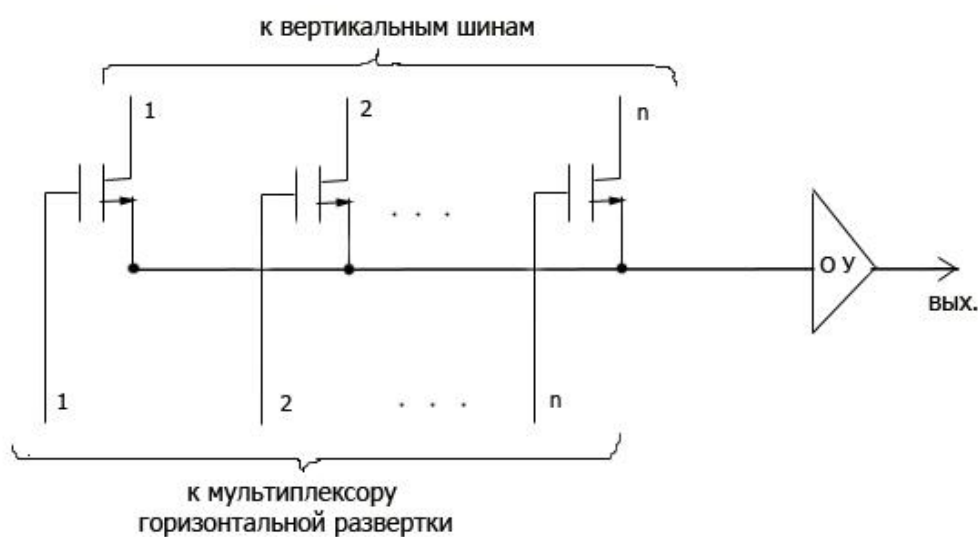


Рис. 4.24. Простое выходное устройство КМОП-матрицы

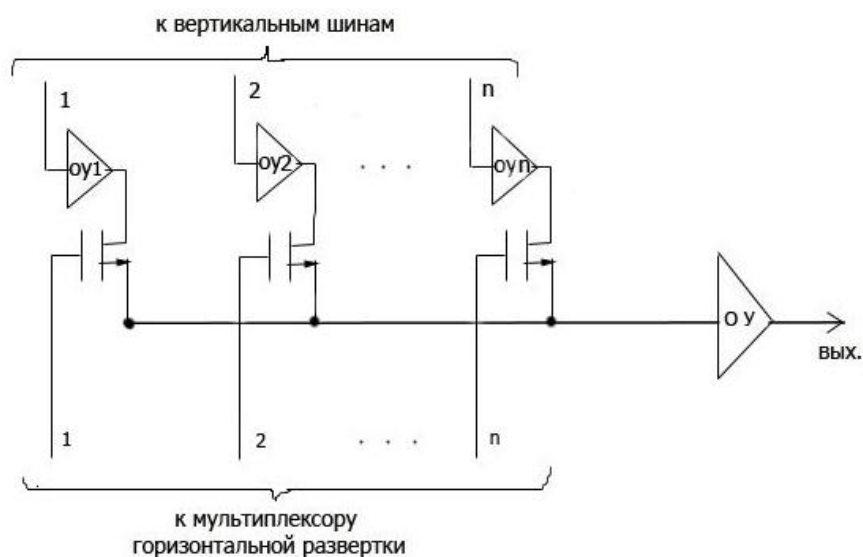


Рис. 4.25. Выходное устройство КМОП-матрицы с активными столбцами

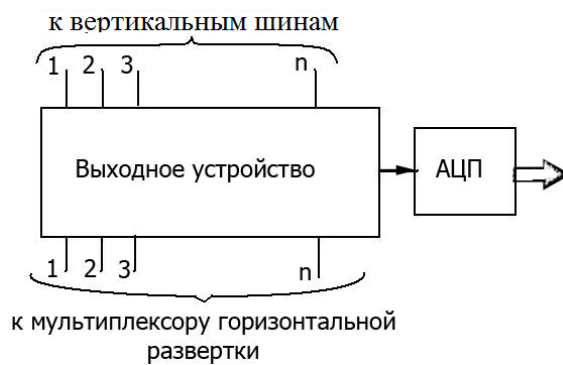


Рис. 4.26. Выходное устройство КМОП-матрицы с АЦП

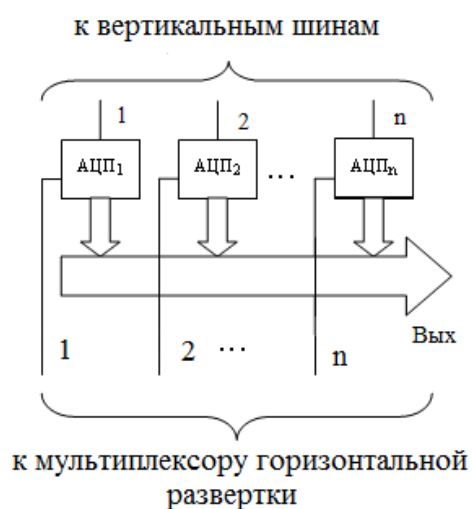


Рис. 4.27. Выходное устройство с АЦП на столбец

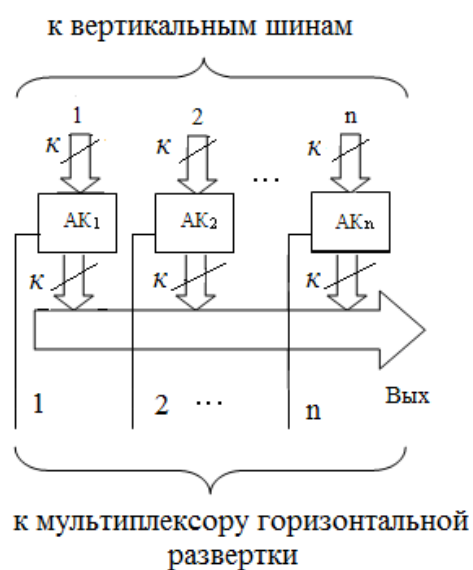


Рис. 4.28. Выходное устройство с аналоговыми коммутаторами (АК) для выбора цифровых пикселей

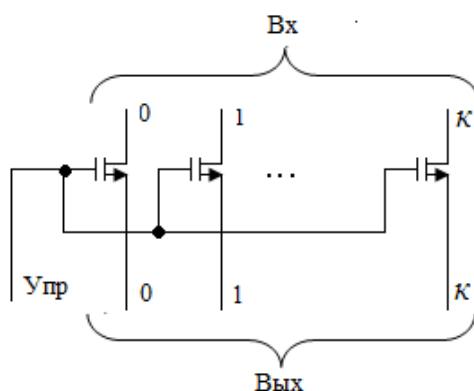


Рис. 4.29. Аналоговый коммутатор на k каналов

КМОП-сенсоры могут дополняться видеопроцессорами, кодирующими устройствами, внутренними контроллерами, памятью и т.п. Интегрирование дополнительных функций в одном кристалле ведет к появлению нового класса устройств: камер (Camera on Chip) и видеосистем на кристалле (System on Chip).

На рис. 4.30 приведен вариант типовой структуры КМОП-сенсора с функциями камеры на кристалле.

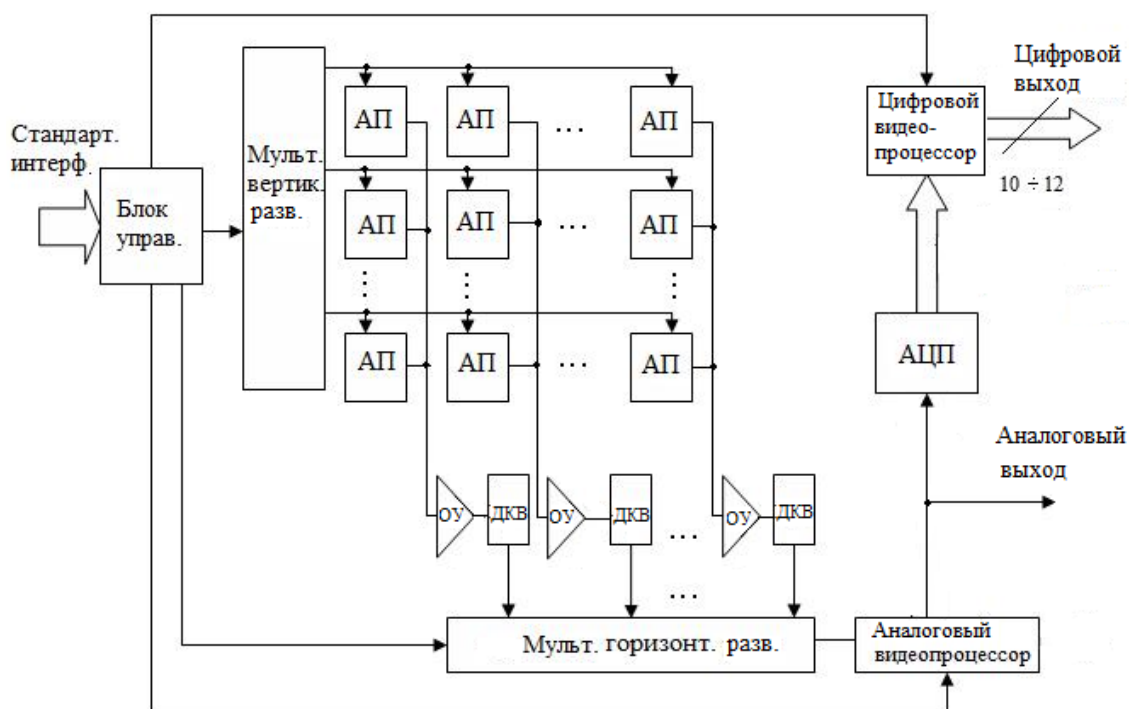


Рис. 4.30. Вариант типовой структуры КМОП-сенсора с функциями камеры на кристалле с активными пикселями (АП) и активными столбцами, содержащими схемы ДКВ

Видеосистема на кристалле имеет дополнительные элементы аналоговой и цифровой обработки и интерфейсы связи, например, для управления масштабированием, экспозицией, стандартными операциями обработки изображений, сжатием JPEG и MPEG, для преобразования форматов изображения и связи с внешними устройствами.

Об особенностях оценки разрешающей способности матричных фотоприемников

При сканировании электронным лучом в вакуумных преобразователях «свет – сигнал» разрешающая способность определяется только апертурой (размером сечения) электронного луча. На рис. 4.31 показана модуляция тока электронного луча при сканировании изображения оптической миры, соответствующей предельному разрешению. Будем считать, что для рассматриваемого преобразования «свет – сигнал» модуляция равна 100% и, следовательно, контраст получаемого изображения миры равен 1.

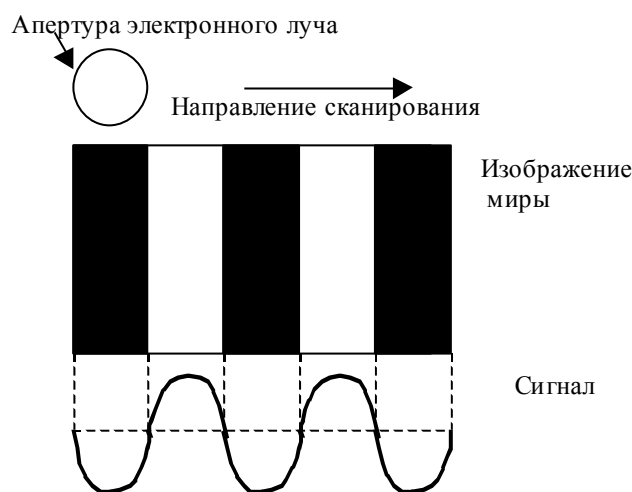


Рис. 4.31. Модуляция тока электронного луча при сканировании

Фотоприемная матрица представляет собой регулярную структуру [15; 16], и при проецировании на нее изображения миры возможны два крайних случая, представленные на рис. 4.32.

Как видно из рисунка, в первом случае (рис. 4.32, *а*) разрешение регулярной структуры будет полностью соответствовать разрешению, получаемому при сканировании электронным лучом. Во втором случае (рис. 4.32, *б*) (при фазовом сдвиге на 90°) все элементы матрицы дадут одно и то же значение сигнала, соответствующее приблизительно 0,5 от уровня белого, поскольку половина изображения полосы попадает на один элемент, а вторая половина – на соседний элемент матрицы, и контраст изображения окажется равным 0.

Очевидно, что промежуточные положения элементарных полосок в пределах фазового сдвига от 0 до 90° дадут модуляцию сигнала в пределах от 0 до 100% и обеспечат, соответственно, контраст от 0 до 1 , что в среднем составит $0,5$ (рис. 4.33).

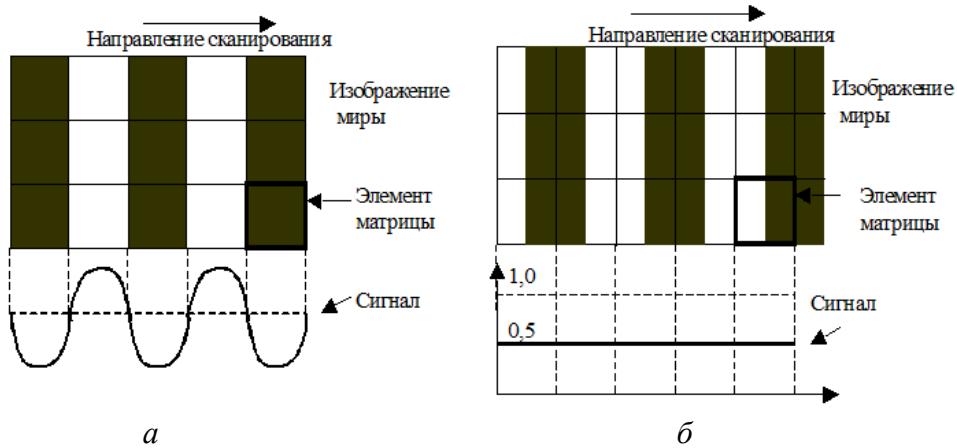


Рис. 4.32. Модуляция сигнала в элементах матрицы:
 а – точное совмещение элементов матрицы и изображения миры;
 б – попадание изображения на два соседних элемента матрицы

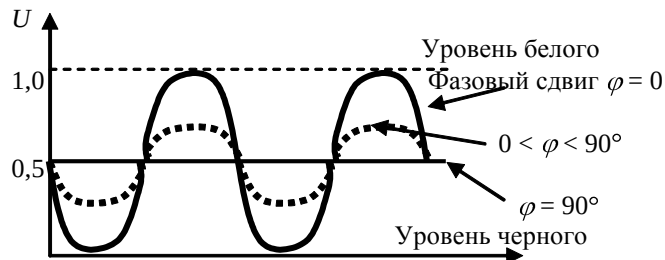


Рис. 4.33. Модуляция сигнала в диапазоне возможных фазовых сдвигов

Таким образом, в матричных фотоприемниках имеется динамическая неустойчивость частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) на предельных пространственных частотах. В результате этого порог стабильного разрешения для регулярных структур находится в области более низких пространственных частот по сравнению с системами со сканирующим лучом.

Нетрудно заметить, что для регулярной структуры устойчивое разрешение со 100-процентной модуляцией достигается при размере элемента разложения, который в два раза меньше ширины элементарных полосок. Иными словами, устойчиво разрешаемая пространственная частота $f_{уст} = f_{пред}/2$, где $f_{пред}$ – предельная пространственная частота, определяемая размером элемента разложения (рис. 4.34).

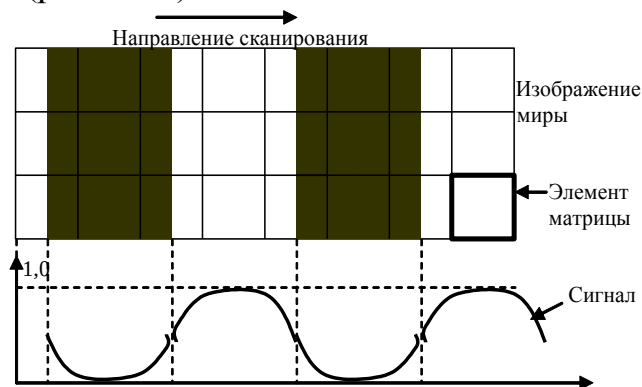


Рис. 4.34. Соотношение между размером элемента разложения и минимальной шириной миры при устойчивом динамическом разрешении

О регулировке времени экспозиции в твердотельных фотоприемниках

Современные матричные фотоприемники имеют возможность регулировки времени экспозиции в пределах кадра – электронный затвор. Действие электронного затвора поясняется на рис. 4.35.



Рис. 4.35. Принцип регулировки времени экспозиции τ при помощи электронного затвора

Уменьшение времени экспозиции (накопления) в пределах кадра позволяет визуализировать быстропеременные процессы, сопоставимые со временем действия электронного затвора, однако при этом уменьшается чувствительность системы, поскольку света на фотомшень попадает значительно меньше.

О повышении чувствительности твердотельных фотоприемников

Современная технология твердотельных фотоприемников предполагает использование микролинз, располагаемых непосредственно над фоточувствительными элементами [5; 15; 17]. Микролинзовый массив позволяет дополнительно увеличить освещенность фоточувствительных участков матрицы и соответственно поднять ее чувствительность. Оптимизация микролинзового массива в настоящее время достигла максимума возможностей по сбору светового потока и реализована в технологии Hyper-Had, в которой размер микролинз предельно увеличен.

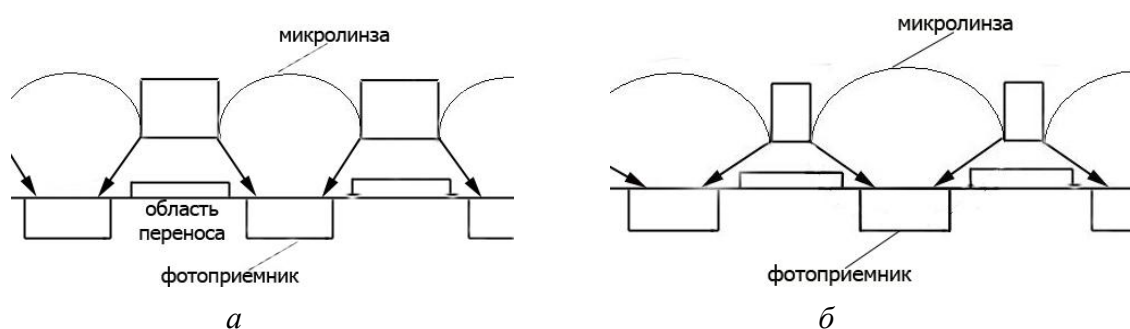


Рис. 4.36. Структура микролинзового массива:
а – стандартная; б – Hyper-Had

4.5. Пороговый контраст и отношение сигнал/шум

Световой поток шумит. Если среднее число фотонов (математическое ожидание) – n_0 , то $n_1, n_2 \dots n_n$ распределены вокруг n_0 с дисперсией

$$D = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (n_i - n_0)^2 \text{ и, соответственно, среднеквадратическим отклонением}$$

$\sigma = \sqrt{D_n}$. Сигналу соответствует среднее число фотонов n_0 , а шуму – среднеквадратическое отклонение от этого числа – σ . На рис. 4.37 показана

плотность вероятности распределения величины шума $f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\psi^2}{2}\right)$,

где $\psi = m \cdot \sigma$, а $m = 0, 1, 2 \dots$

Вероятность P – появления шумовых флуктуаций $U_{\text{ш}}$, превышающих среднее значение фона на целое число σ , приведена в табл. 4.1. Величину $\psi_{\text{пор}}$ принято называть пороговым отношением сигнал/шум. Контрастная чувствительность фотоприемника характеризуется величиной порогового контраста объекта, регистрацию которого способна осуществить система при априорно заданном пороговом отношении сигнал/шум [17–20].

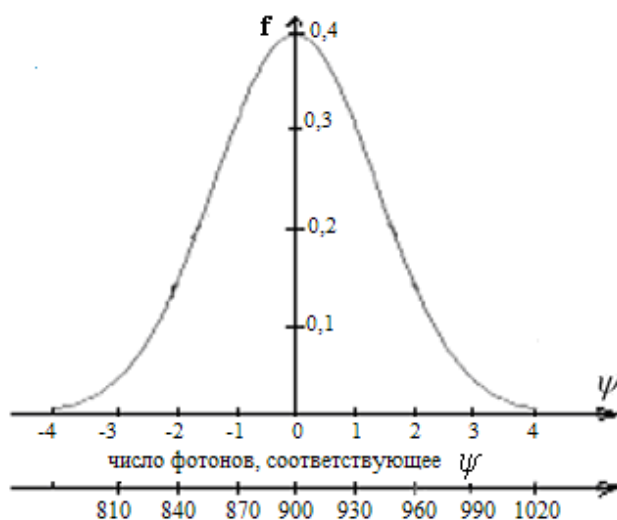


Рис. 4.37. Распределение величины шума вокруг его среднего значения

Таблица 4.1

Значения $P(U_{\text{ш}} \geq \psi_{\text{пор}})$ для $m = 1-6$

$\psi_{\text{пор}} = m \cdot \sigma$	P
σ	0,15
2σ	0,023
3σ	$1,3 \cdot 10^{-3}$
4σ	$3 \cdot 10^{-5}$
5σ	$3 \cdot 10^{-7}$
6σ	$2 \cdot 10^{-9}$

Величина $\psi_{\text{пор}}$ непосредственно связана с пороговым контрастом, поскольку контраст $k = \frac{\Delta B}{B}$ определяется как относительный интервал яркости, отличающий объект от фона. Типичные значения для $\psi_{\text{пор}} = 2-10$.

Известно простое выражение для общей оценки порогового контраста твердотельного фотоприемника $k_{\text{пор}} = \frac{\psi_{\text{пор}}}{\sqrt{N_3}}$, где N_3 – накопительная емкость элемента фотоприемника, т.е. предельное число фотоэлектронов, которое может накапливать фотоприемник (вместимость потенциальной ямы), сохраняя линейность световой характеристики (линейность преобразования «свет – сигнал») [5; 17; 18]. Число N_3 зависит от размера элемента фотоприемника, конструкции (технологии) ПЗС и т.д. Для ПЗС можно принять $N_3 \approx 10^5$.

Если выразить N_0 – число фотонов, а следовательно, и фотоэлектронов при 100-процентном квантовом выходе, приходящееся на единицу площади матрицы (например, на 1 см^2), то $k_{\text{пор}} = \frac{\psi_{\text{пор}}}{\sqrt{N_0 \cdot d^2}} = \frac{\psi_{\text{пор}}}{d \cdot \sqrt{N_0}}$, где d – размер элемента фотоприемника. Таким образом, чем больше размер элемента d , тем выше контрастная чувствительность.

Для вычисления порогового контраста (контрастной чувствительности) реальной телекамеры в зависимости от освещенности объекта, характеристик объектива и фотоприемника рекомендуется формула [5; 17]

$$k_{\text{пор}}^2 = \frac{2 \cdot \psi_{\text{пор}}^2}{E \cdot (k_o + k_\phi) \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \tau \cdot N \cdot \eta \cdot d^2 \cdot T_n},$$

где $\psi_{\text{пор}}$ – пороговое отношение сигнал/шум;

E – освещенность объекта, лк;

k_o – коэффициент отражения объекта;

k_ϕ – коэффициент отражения фона;

$\frac{D}{f}$ – относительное отверстие объектива;

τ – коэффициент пропускания объектива;

N – потенциально допустимое ПЗС число фотонов на площади 1 см^2 за время 1 с при освещенности 1 лк;

η – квантовый выход матрицы ПЗС;

d^2 – площадь элемента, см^2 ;

T_n – время накопления матрицы, с.

Практически достигаемые значения $k_{\text{пор}}$ для некоторых размеров элементов фотоприемника [5] приведены в табл. 4.2. Размер $1,5 \times 1,5$ мкм является практически предельным как технологически (разрешение УФ-фотолитографии), так и из-за дифракций на входном зрачке объектива, что ограничивает размер матрицы в пределах до 1×1 мм при стандартном разрешении 800×600 элементов.

Таблица 4.2

Пороговый контраст и размер элемента фотоприемника

$k_{\text{пор}}, \%$	$d, \text{мкм}$
0,5	14×14
2	$3,3 \times 3,3$
5	$1,5 \times 1,5$

4.6. Цветные матричные преобразователи «свет – сигнал»

В современных цветных ПЗС-матрицах используется так называемая технология супер-CCD, по которой структура и расположение цветных фильтров выполнены таким образом, что зеленых элементов оказывается в два раза больше, чем красных или синих [7]. При этом цветной пиксель (выделен жирным шрифтом) состоит из четырех субпикселей: двух зеленых, одного красного и одного синего. Такая стандартная для современных цветных ПЗС-матриц структура фильтров называется структурой Байера

К	З	К	З	К	З
З	С	З	С	З	С
К	З	К	З	К	З
З	С	З	С	З	С

Рис. 4.38. Структура Байера

(по фамилии инженера фирмы Кодак, получившего патент на ее изобретение) (рис. 4.38). Она явилась простой и дешевой альтернативой трехматричным видеокамерам. В этих видеокамерах изображение расщепляется призмой на три, каждое из которых, в свою очередь, попадает на одну из трех черно-белых ПЗС-матриц, перед каждой из матриц установлен свой фильтр основного цвета (R, G, B).

Кодирующие светофильтры могут быть выполнены на:

- 1) основных цветах R, G, B ;
- 2) дополнительных цветах $Ye = G + R$ (желтый), G (зеленый), $Cy = G + B$ (голубой).

На основных цветах обеспечивается лучшая цветопередача, на дополнительных – лучшая чувствительность, так как прозрачность светофильтров выше.

Структура Байера в многосигнальных ФЭП выполняется или на основных цветах R, G, B, G , или на дополнительных цветах Cy, Mg, Ye, G , где Mg – маджента (оранжевый).

В модификации структуры Байера один из зеленых пикселей заменен на светло-голубой (R, G, B, E , где E – emerald – изумрудный), что улучшает качество цветопередачи сине-зеленых и красных оттенков.

Структура требует цветовой интерполяции, чтобы получить значения R, G, B для каждого элемента ФЭП. Это приводит к неизбежным искажениям цвета в мелких деталях. Например, мелкая белая точка на черном фоне может случайно попасть на синий элемент и будет представлена синим цветом.

Такие искажения называются алиасингом. Они устраняются методами коррекции, в которых используются итерационные (многопроходные) алгоритмы – антиалиасинг.

Таким образом, достоинства структуры Байера – простота и дешевизна. Недостатком является резкое падение разрешающей способности, так как одна цветная точка формируется из четырех субпикселей. Кроме этого, при выделении яркостного сигнала появляются ложные цветные окантовки (*алиасинг*), что приводит к потере точности цветопередачи.

Для устранения недостатков применяют дополнительную обработку видеосигнала (*антиалиасинг*) с помощью различных алгоритмов цветовой интерполяции, получая значение недостающих цветов, интерполируя имеющиеся значения, а затем осуществляя НЧ-фильтрацию для подавления артефактов цветовой интерполяции, проявляющихся в виде цветового муара (мелкоструктурной цветовой сетки) или окантовок изображения.

Интерполяция основана на таком свойстве зрения, как низкая чувствительность к мелким цветным деталям (рис. 4.39). Причем зрение менее чувствительно к диагональным линиям, чем к вертикальным и горизонтальным (в природных и искусственных объектах также преобладают вертикальные и горизонтальные линии – деревья,

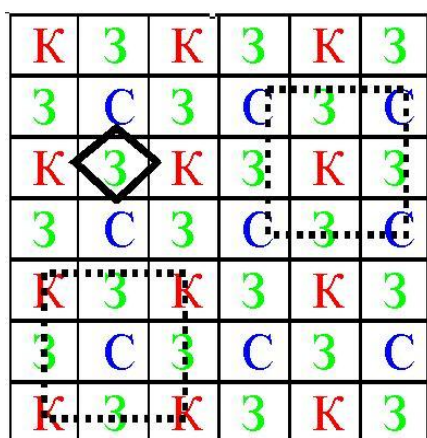


Рис. 4.39. Изменение пикселей при интерполяции

трава, здания, текст). Сущность интерполяции заключается в том, что размер зеленых пикселей искусственно увеличивают в 1,5 раза, ориентируя их диагонали по горизонтали и вертикали. В результате части увеличенных зеленых пикселей распространяются на соседние красные и синие пиксели. Красные и синие пиксели ориентации не меняют, но их размер увеличивают в 2 раза. В результате части увеличенных красных пикселей искусственно распространяются на соседние синие и зеленые пиксели, а части увеличенных синих, соответственно, – на соседние красные и зеленые. Такой прием позволяет раскрасить каждый отдельный пиксель с известной степенью достоверно-

сти.

сти. Однако в результате интерполяции разрешение в зеленом канале ухудшается в 1,5 раза, а в синем и красном – в 2 раза. Существует ряд улучшений структуры Байера, в частности, производят ее разворот на 45° , в результате чего диагональные линии становятся горизонтальными и вертикальными. Поскольку диагональное интерполированное разрешение выше, чем по горизонтали и вертикали, то такой прием несколько компенсирует потерю разрешения от интерполяции.

Другой вариант улучшения структуры Байера заключается в создании гексагональной структуры по типу пчелиных сот (рис. 4.40). В результате получается дополнительно эффект повышения чувствительности и отношения сигнал/шум. Кроме этого, достигаются некоторые технологические удобства, связанные с пленочными технологиями. В гексагональной структуре горизонтальный размер зеленого пикселя при интерполяции не изменяется, и, следовательно, разрешение по горизонтали в зеленом, в отличие от классической структуры Байера, не ухудшается.

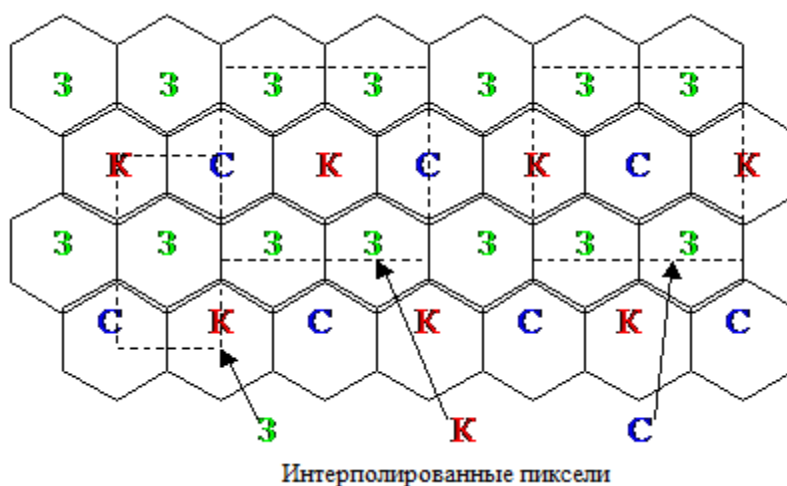


Рис. 4.40. Гексагональная структура и вид интерполированных пикселей

4.7. Принципы тепловидения

Пировидиконы

Начало создания тепловизионных систем в середине 60-х гг. XX в. было связано с появлением фотопреобразователей с диапазоном спектральной чувствительности 8–12 мкм. В них использовано свойство некоторых сегнетоэлектриков изменять поляризацию молекул при нагреве. В результате этого эффекта под действием теплового излучения на мишени формируется температурный рельеф, который, в свою очередь, наводит электростатические заряды на поверхности [19; 20]. В электровакуумном фотопреобразователе (пировидиконе) образованный потенциальный рельеф

считывается электронным лучом, как в обычном видеоконе. При этом обеспечивается разрешение перепадов температуры до $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Материал пиромишени чувствителен лишь к изменению температуры, поэтому тепловое изображение, проецируемое на мишень, должно быть переменным. С этой целью устанавливают механический прерыватель лучистого потока. Материал пиромишени обладает значительным остаточным зарядом после считывания потенциального рельефа (сканирования). Из-за высокоомности материала мишень необходимо принудительно разряжать в специальном цикле ее подготовки перед очередным накоплением.

Прерывание лучистого потока приводит к периодическому охлаждению и нагреванию мишени. В результате видеосигнал становится биполярным относительно опорного уровня, что приводит к мерцанию изображения. Мерцание устраняют специальной обработкой видеосигнала, приводя его к стандартному униполярному сигналу, изменяющемуся от уровня черного до уровня белого.

Число строк разложения для пировидеоконов достигает 300, энергетическая чувствительность – от 3 до 6 мкА/Вт, температурная чувствительность – от $1,0$ до $5,0\text{ нА}/^{\circ}\text{C}$.

Твердотельные фотоприемники ИК-диапазона

Матрицы ИК-диапазона используют те же принципы развертки изображения, что и матрицы видимого диапазона: зарядовую связь в ПЗС или координатную адресацию в КМОП-фотоприемниках. Основное отличие использования матриц ИК-диапазона – необходимость охлаждения фотоприемника из-за значительного теплового шума [19; 20].

Кроме криогенно охлаждаемых ПЗС-матриц с барьерами Шоттки, используют неохлаждаемые матрицы на основе микроболометров, принцип действия которых основан на изменении сопротивления материала при поглощении ИК-излучения. Микроболометры в матрицах соединены с КМОП-устройствами считывания видеоинформации.

Чувствительность ИК-системы характеризуют чаще всего пороговой разностью температур, которая соответствует пороговому отношению сигнал/шум, т.е. величиной температурного перепада, при котором возможно обнаружение сигнала на фоне шума с заданной вероятностью. Как и для видимого диапазона, пороговое отношение сигнал/шум лежит в диапазоне $2\text{--}10\text{ мкм}$. Стандартная чувствительность, достигнутая в матричных ИК-приемниках, – $15\text{--}100\text{ мК}$. Микроболометры уступают по чувствительности криогенно охлаждаемым фотоприемникам.

Стандартный диапазон спектральной чувствительности – $8\text{--}12\text{ мкм}$. Максимально достигнутая дальняя граница – 14 мкм . Стандартная разрешающая способность – 256×256 элементов. Максимально достигнутое разрешение – 640×480 элементов. Из-за сложности технологии ИК-матрицы характеризуются значительной неравномерностью чувствительности по полю, наличием дефектных элементов.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные закономерности фотоэффекта.
2. Каковы основные принципы построения преобразователей «свет – сигнал»?
3. В чем заключаются преимущества твердотельных фотоприемников?
4. В чем заключается принцип работы ПЗС?
5. В чем заключается специфика и перспективы применения КМОП-фотоприемников?
6. Назовите основные методы повышения чувствительности фотоприемника.
7. В чем заключается специфика оценки разрешающей способности в матричных фотоприемниках?
8. В чем заключается принцип работы электронного затвора?
9. В чем заключается принцип работы схемы ДКВ?
10. Чем определяется пороговый контраст получаемого изображения?
11. Приведите примеры фотоприемников ИК-диапазона.
12. В чем заключается специфика одноматричных цветных фотоприемников?

Глава 5 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ «СИГНАЛ – СВЕТ»

5.1. Катодолюминесценция и люминофоры

Существует ряд способов преобразования электрических сигналов в свет. Один из них заключается в применении люминофоров – специальных веществ, светящихся под действием электронной бомбардировки. Это явление называется катодолюминесценцией. Основная часть энергии электронов уходит в тепло, лишь незначительная часть (несколько процентов) – на возбуждение атомов кристаллов [1; 2].

Для изготовления экранов электронно-лучевых трубок (ЭЛТ) используют люминофоры с наиболее сильной катодолюминесценцией (силикаты, оксиды и сульфиды цинка, кадмия и некоторых других металлов). Излучение повышается при добавлении активаторов (медь, серебро, марганец). Спектр люминофоров является сплошным из-за множества уровней энергии. Комбинацией люминофоров создают как белое, так и цветное свечение.

Накачка (возбуждение) люминофора происходит практически мгновенно. Яркость свечения падает сначала быстро, затем медленно (рис. 5.1). Люминофоры характеризуются так называемым временем послесвечения. Для кинескопов это время должно быть меньше времени кадра, иначе за движущимся предметом будет тянуться светлый след.

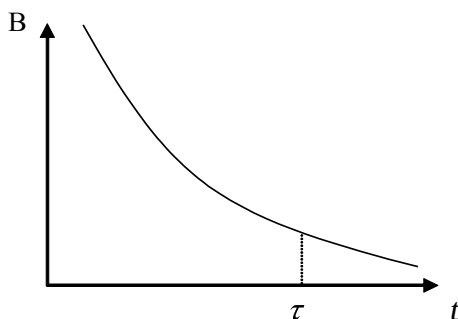


Рис. 5.1. Изменение яркости свечения люминофора после возбуждения:
 τ – время послесвечения

5.2. Принцип работы кинескопа

Об электронной оптике

В ЭЛТ (кинескопах) используются электронные лучи. Их необходимо фокусировать, т. е. создавать как можно более тонкий пучок. Существует аналогия между световым и электронным лучами. Можно считать, что при пересечении они так же, как и световые, не влияют друг на друга, поскольку плотность электронов достаточно мала. Разница в том, что в отличие от фотонов электронами можно управлять с помощью электронных и магнитных полей [1; 2].

Так, например, для параллельного переноса электронного изображения необходимо магнитное поле с параллельными силовыми линиями (рис. 5.2). Этот принцип лежит в основе простейшего электронно-оптического преобразователя (ЭОП) (рис. 5.3).

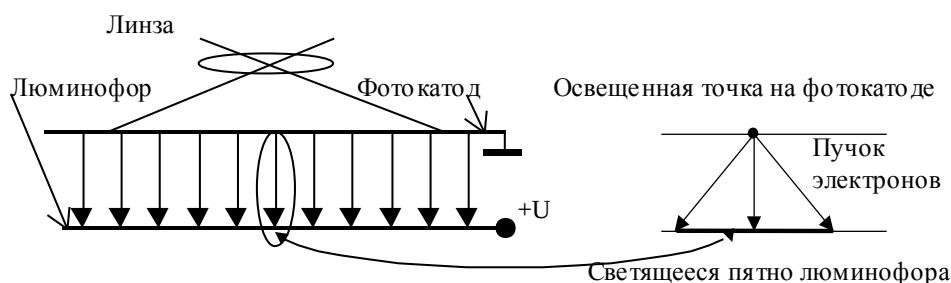


Рис. 5.2. Простейший способ электронного переноса изображения

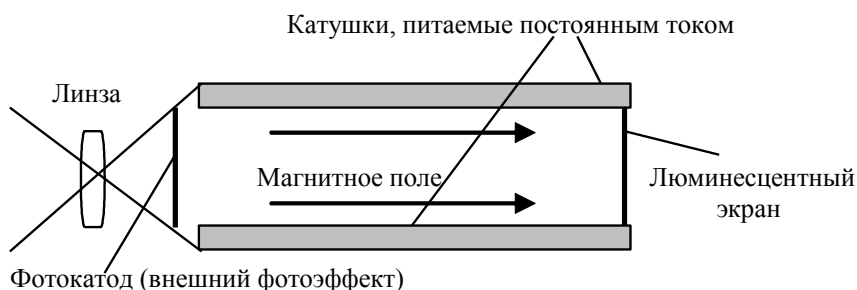


Рис. 5.3. Простейший ЭОП

Аналогично оптическим линзам можно создать электронные линзы (рис. 5.4), которые образованы эквипотенциальными поверхностями, создаваемыми силовыми линиями электрического или магнитного поля.

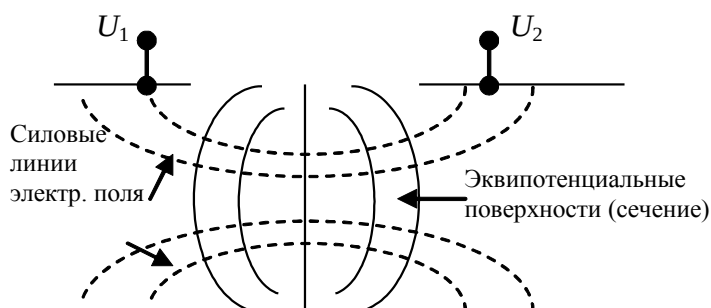


Рис. 5.4. Электронная линза

Об управлении электронным лучом в кинескопах

В любом кинескопе используются электронные прожекторы (или электронные пушки), создающие узкий пучок электронов, фокусируемый на экране. Отключение луча осуществляется электрическим или магнитным полем. Используются так называемые отклоняющие системы (ОС), формирующие структуру магнитного поля, обеспечивающего в современных

кинескопах значительный размер изображения по диагонали – 72 см и более на плоском экране со спрямленными углами.

Кинескопы, кроме электронных прожекторов, содержат модуляторы – управляющие электроды, позволяющие изменять ток луча, а следовательно, и яркость свечения экрана, а также аноды, напряжение на которых заставляет электроны двигаться к люминесцирующему экрану. Напряжение, подаваемое на первый анод, достигает значительных величин (более 10 кВ).

Цветные кинескопы содержат три электронных прожектора, управляемые тремя модуляторами, на которые подаются соответствующие сигналы R , G и B , и имеют более сложную конструкцию, обусловленную необходимостью обеспечения попадания каждого из лучей на люминофор своего цвета.

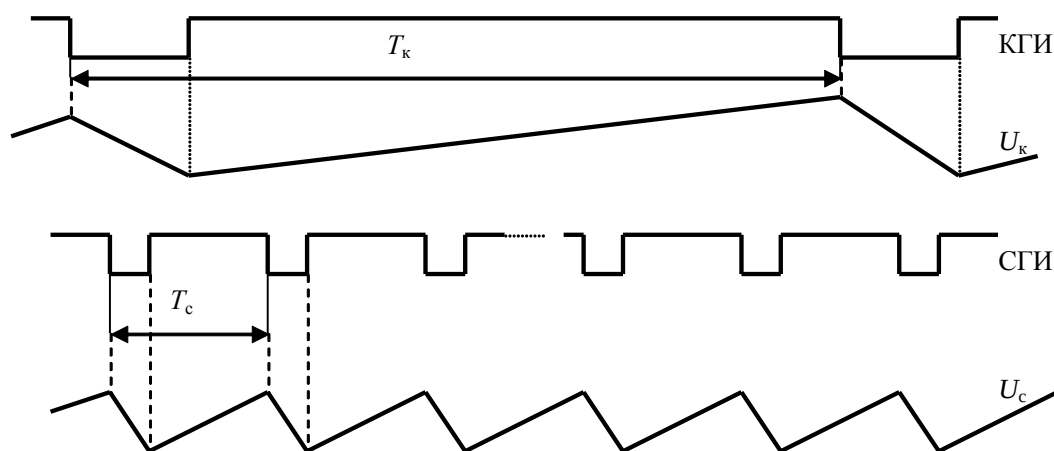


Рис. 5.5. К принципу формирования развертки в отклоняющей системе ЭЛТ:

КГИ, СГИ – кадровые и строчные синхроимпульсы;

U_k и U_c – пилообразные напряжения для работы кадровых и строчных катушек отклоняющей системы кинескопа

Экран современных цветных кинескопов выполнен в виде чередующихся цветных люминофорных полосок (штрихов). Кинескопы имеют так называемые маски для обеспечения попадания электронных лучей на свои триады (три рядом расположенных штриха R , G , B), дополнительные электростатические устройства для сведения лучей (чтобы каждый луч попадал на свой штрих) и ряд других технических и технологических ухищрений. Существует множество конструкций трехлучевых цветных кинескопов, из которых в настоящее время наиболее популярна модель, называемая *тринитрон*.

Однако могут быть построены и однолучевые цветные кинескопы, в которых последовательное возбуждение люминофоров осуществляется за счет дополнительной модуляции электронного луча.

В настоящее время все большее распространение получают плоские жидкокристаллические и плазменные экраны, в которых также реализуется принцип аддитивного сложения цветов. Кратко остановимся на особенностях их конструкций.

5.3. Принцип работы жидкокристаллических экранов

Жидкими кристаллами называют вещества, обладающие как свойствами жидкости, так и свойствами твердого тела. В жидкокристаллических (ЖК) экранах (в английской аббревиатуре – LCD – Liquid Crystal Device) используется свойство жидких кристаллов изменять свою ориентацию в пространстве под действием электрического напряжения. В свою очередь, упорядоченная молекулярная структура позволяет изменять поляризацию света, проходящего через нее. Ячейки жидких кристаллов образуют прямоугольную ЖК-матрицу (панель). Сама ЖК-панель не является источником света. Она пропускает свет, излучаемый неоновой лампой [7].

Каждый элемент ЖК-панели с так называемой активной матрицей (в английской аббревиатуре – TFT LCD) имеет свой управляющий транзистор, выполненный по тонкопленочной технологии (Thin Film Transistor). На входы тонкопленочных транзисторов последовательно, в соответствии с законом развертки, подается сигнал изображения, а выходные напряжения транзисторов позволяют менять угол поляризации кристаллов ячеек ЖК-матрицы.

После первого управляемого поляризационного фильтра ставится второй поляризационный фильтр с углом поляризации, перпендикулярным углу поляризации первого фильтра в условиях отсутствия управляющего сигнала. Таким образом, при отсутствии управляющего сигнала свет от лампы не проходит через систему поляризационных фильтров, а при наличии управляющего напряжения происходит изменение угла поляризации в пределах 90° и, соответственно, изменение интенсивности проходящего света. При совпадении углов поляризации свет беспрепятственно проходит через поляризационные фильтры. Данный общий принцип работы TFT LCD-экранов иллюстрируется на рис. 5.6.

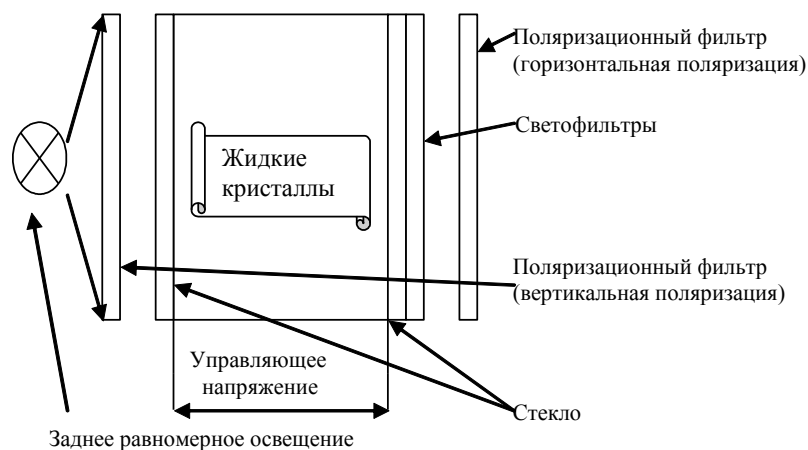


Рис. 5.6. Упрощенная конструкция ЖК-экрана

Цветной TFT-пиксель состоит из трех субпикселей, содержащих соответственно красный, зеленый и синий светофильтры. Субпиксели интегрированы в стеклянную основу и расположены близко к друг другу. Так, например, TFT LCD-экран 18,1" с разрешением 1280×1024 точек содержит в три ра-

за больше субпиксельных элементов, а именно 3840×1024 , каждый из которых имеет свой управляющий тонкопленочный транзистор, при шаге примерно $0,011''$ (или $0,28 \text{ мм}$).

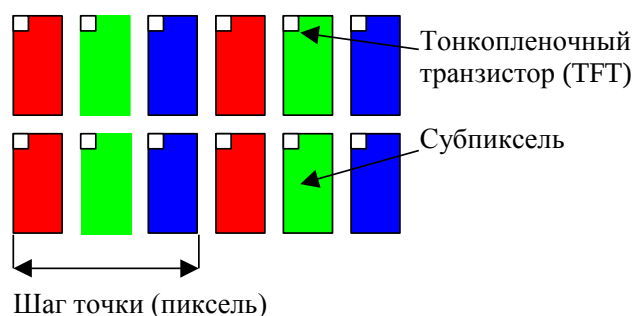


Рис. 5.7. Строение пикселя TFT

Поляризация, лежащая в основе работы ЖК-экранов, имеет главный недостаток – сокращение угла обзора экрана. В настоящее время имеется несколько технологий, позволяющих значительно уменьшить этот недостаток и обеспечить угол обзора со стандартных 90° до $140\text{--}170^\circ$. Увеличение угла обзора, как правило, связано с увеличением времени отклика пикселя (инерционность), уменьшением контрастности изображения, увеличением стоимости экрана. С технической точки зрения угол обзора до 160° (практически как у ЭЛТ) при времени отклика 20 мс (соответствует частоте 50 Гц) является приемлемым решением, обеспечивающим достаточное качество воспроизведения видеосюжетов.

5.4. Принцип работы плазменных экранов

Работа плазменного экрана (панели) заключается в управлении холодным разрядом разреженного газа (ксенона или неона), находящегося в ионизированном состоянии (холодная плазма). Цветной пиксель, формирующий отдельную точку изображения, как и в предыдущем случае, состоит из трех субпикселей, ответственных за три основных цвета. Каждый субпиксель представляет собой отдельную микрокамеру, на стенках которой находится люминофор соответствующего цвета свечения [7].

Субпиксели находятся в узлах прямоугольной сетки, образованной прозрачными металлическими электродами (рис. 5.8). При сканировании электрическим напряжением строк и столбцов прямоугольной сетки в газоразрядных ячейках возникает свечение, интенсивность которого пропорциональна величине управляющего напряжения (величине сигнала изображения). Максимум излучения газового разряда находится в ультрафиолетовой области спектра. В свою очередь, люминесцентное покрытие в зоне разряда под воздействием ультрафиолетового излучения начинает светиться в видимом диапазоне спектра, что и воспринимает наблюдатель. Ультрафиолетовая составляющая, вредная для глаз, поглощается защитным наружным стеклом.

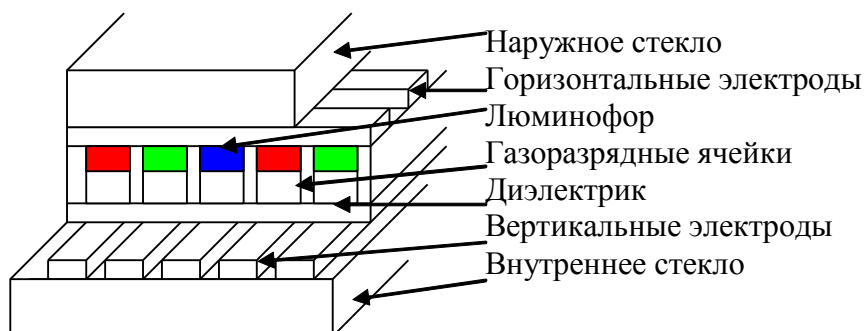


Рис. 5.8. Упрощенная конструкция плазменной панели

Таким образом, принцип действия плазменной панели основан на электролюминесценции газа, интенсивность свечения которого пропорциональна управляющему сигналу (сигналу изображения) и последующей фотолюминесценции цветных люминофоров, возбуждаемой газоразрядным свечением.

5.5. Автоэмиссионные панели

В автоэмиссионных панелях (Field Emission Display, FED) (см. рис. 5.9) используется явление электролюминесценции [7; 20]. Возбуждение люминофоров осуществляется электронами, генерируемыми автоэлектронными эмиттерами игольчатого типа. Панель имеет несколько слоев, располагаемых на подложке. Первый слой – катоды с игольчатыми эмиттерами, второй слой – управляющие электроды. Между полосковыми катодами и управляющими электродами имеется воздушный зазор. Третий слой – полоски люминофоров (RGB). Вся конструкция закрыта защитным стеклом. Толщина панели составляет 10 мм.

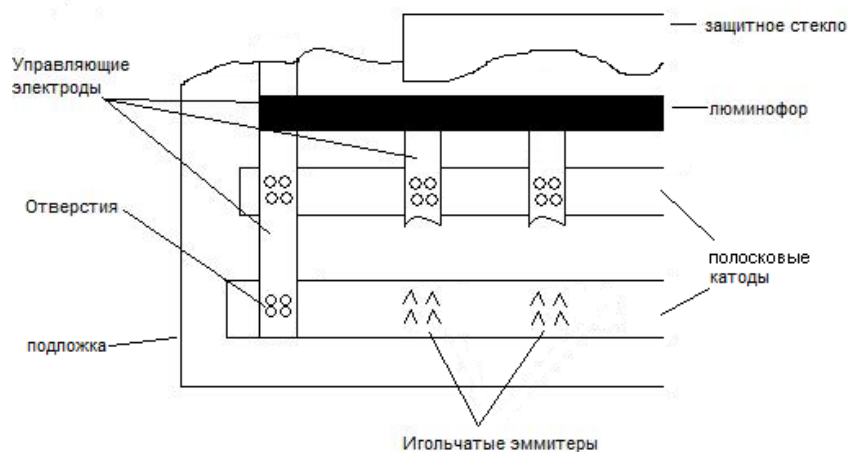


Рис. 5.9. Конструкция автоэмиссионной панели

Каждому эмиттеру соответствует отверстие в управляющем электроде. При подаче напряжений на соответствующий катод и управляющий электрод в точке их пересечения возникает разность потенциалов, которая

приводит к увеличению плотности тока на остриях эмиттеров. Адресация и, соответственно, активизация эмиттеров осуществляется последовательно по закону развертки. Электроны с эмиттеров через отверстие в управляющем электроде попадают на люминофор, нанесенный на полоски.

Достоинства автоэмиссионных панелей следующие: высокая яркость, малая инерционность, большой угол обзора.

5.6. Светодиодные экраны и видеопроекторы

Для создания больших экранов в настоящее время используют матричные панели на светодиодах LED (Light Emitting Diode), а также видеопроекторы [7]. Существуют различные варианты видеопроекторов, основанные на использовании кинескопов с большой яркостью изображения и светосильной оптики. Кинескоп в данном случае является источником света. Существуют видеопроекторы с использованием ЖК-модуляторов. В них источник света – мощная лампа. Свет от лампы через конденсор модулируется ЖК-матрицей, управляемой видеосигналом, и через объектив проецируется на экран. Имеются видеопроекторы, основанные на использовании лазеров. Они включают в себя когерентные источники света, модуляторы и устройства развертки лазерного пучка (дефлекторы). Практически видеопроекторы относятся в большей степени к области цифрового кинематографа.

5.7. Применение ЭВМ для просмотра и записи изображений

Современный этап развития телевизионной техники характеризуется широким использованием средств вычислительной техники и компьютерных технологий для получения, обработки, хранения изображений [23]. В этой связи часто проводят аналогию между системой «телекамера – компьютер» и системой «глаз – мозг», говоря о том, что если глаз – вынесенная на периферию часть головного мозга, то телекамера – вынесенная на периферию часть компьютера.

Тем не менее исторически телевизионные стандарты, идущие от систем телевидения, несколько разошлись с компьютерными стандартами, в которых изначально была предусмотрена повышенная частота кадров с целью уменьшения нагрузки на зрение.

Существующие стандарты цветного телевидения также создают определенные проблемы для компьютерной графики. Существуют компромиссы между количеством передаваемой информации и скоростью ее передачи и, следовательно, между пропускной способностью канала связи и разрешающей способностью системы.

Для ввода изображений в ЭВМ необходимо, во-первых, осуществить аналого-цифровое преобразование («оцифровку») видеосигнала, поступаю-

щего с телевизионной камеры. Оцифровка видеосигнала осуществляется в соответствии с теоремой отсчетов путем дискретизации по времени через интервалы $t = 1/2f_{\max}$, где $f_{\max}$ – максимальная частота спектра сигнала при одновременной дискретизации (квантовании) по амплитуде. Обычно динамический диапазон изменения видеосигнала разбивается на 2^n градаций яркости. С учетом полной незаметности для глаза яркостных перепадов, возникающих в результате квантования сигнала с плавным изменением яркости, выбирается $n = 8$, т.е. используется 8-разрядное двоичное кодирование амплитуды видеосигнала, соответствующее 256 градациям яркости (рис. 5.10).

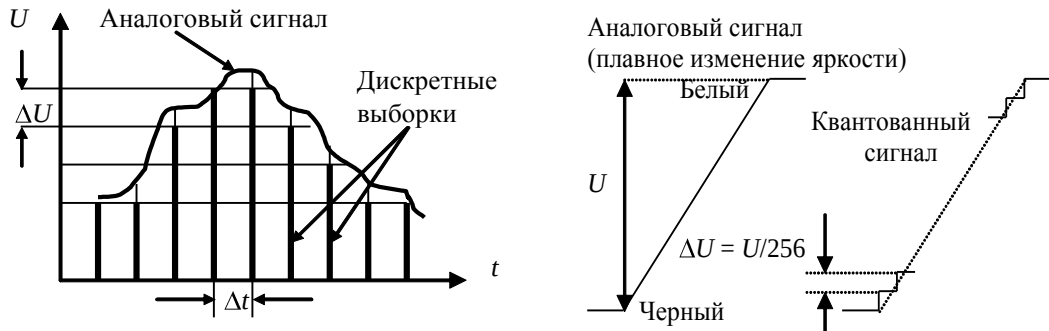


Рис. 5.10. К оцифровке видеосигнала

Соответственно для изображения в полноценном цвете необходимо обеспечить передачу не менее 24 бит на пиксель, т.е. по 8 бит на каждый из основных цветов R , G и B . Для получения разрешающей способности, соответствующей телевизионному стандарту, ЭВМ должна поддерживать формат изображения не менее 800×600 элементов. Рассмотрим аппаратную часть ЭВМ, участвующую в процессе отображения видеoinформации по упрощенной структурной схеме (рис. 5.11).

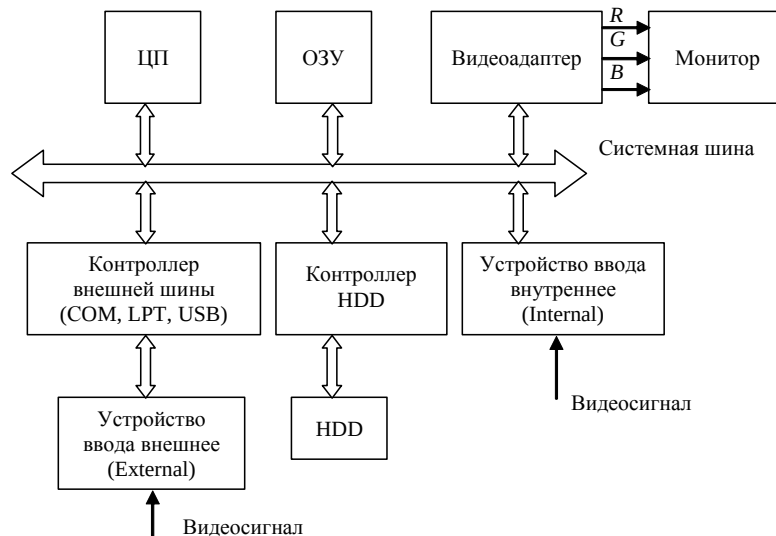


Рис. 5.11. Элементы ЭВМ, участвующие в процессе ввода, хранения и вывода изображения на дисплей:

ЦП – центральный процессор; HDD – жесткий диск;
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство

Работа блоков осуществляется под управлением программы, выполняемой центральным процессором (ЦП). В силу иерархической структуры ЭВМ программа более высокого уровня в процессе ее выполнения обращается к программам, управляющим работой устройств, – драйверам. В свою очередь, драйверы могут обращаться к программам еще более низкого уровня, в том числе жестко «прошитым» в ПЗУ соответствующих контроллеров, чем обеспечивается высокая скорость выполнения наборов стандартных операций.

Процесс ввода изображений может быть упрощенно представлен следующим образом. При использовании внешнего устройства ввода изображений ЦП управляет контроллером внешней шины, который принимает данные от внешнего устройства видеозаписи и размещает их в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) с последующей передачей в видеобуфер видеоадаптера для отображения на мониторе. Видеобуфер представляет собой быстродействующее ОЗУ, предназначенное специально для размещения графической информации (изображений) и ее аппаратного считывания с последующим преобразованием в аналоговые *R-,G-,B*-сигналы, которые подаются на соответствующие управляющие электроды монитора. При необходимости записи изображения в файл ЦП перемещает данные из ОЗУ на жесткий диск (HDD), управляя соответствующим контроллером.

При открытии файла изображения процесс идет в обратном направлении. Центральный процессор через системную шину обращается к жесткому диску, считывает с него цифровые данные, размещает их в ОЗУ, а затем и передает в видеобуфер видеоадаптера.

Если используется внутреннее устройство ввода, то ЦП под управлением программы обращается по определенному протоколу обмена к устройству ввода, которое является специализированным контроллером (контроллер мультимедиа), подключаемым непосредственно к системной шине ЭВМ. Для такого контроллера возможны два режима работы: режим программного и режим аппаратного просмотра изображения. В режиме программного просмотра (Preview) процесс вывода изображения на монитор аналогичен рассмотренному выше. В режиме аппаратного просмотра (Overlay) при соответствующих аппаратных ресурсах видеоадаптера возможна передача данных через системную шину напрямую из контроллера мультимедиа в видеоадаптер. В этом случае обеспечивается максимальная скорость передачи изображения и его отображения на экране монитора. В отличие от режима Preview, при котором достаточно сильно заметна дискретность кадров изображения, в режиме Overlay на экране монитора обеспечивается воспроизведение так называемого «живого» видео в темпе поступления видеосигнала.

Внешние шины ЭВМ имеют различное быстродействие. Самое низкое быстродействие имеет последовательный порт (COM-порт), он практически не используется для ввода изображения. COM-порты в основном используются

для управления внешними устройствами, например, технологическим оборудованием, поскольку обладают высокой помехозащищенностью.

Параллельный порт (LPT-порт), по сравнению с последовательным, имеет более высокое быстродействие и позволяет вводить кадр изображения в формате 320×240 элементов за время примерно 0,5 с. В настоящее время такие устройства ввода практически не используются.

Универсальная шина USB (USB 2.0) обеспечивает высокую скорость передачи данных и позволяет вводить полноформатное телевизионное изображение со скоростью не менее 8–10 кадров/сек. Внешняя шина удобна для подключения к компьютеру. Однако внутренняя шина (PCI) имеет преимущества по быстродействию обмена и является в достаточной степени помехозащищенной. Из этих соображений внешние устройства ввода следует применять только для переносных компьютеров (ноутбуков). Однако и для ноутбуков возможно применение специальных устройств ввода, устанавливаемых в гнезда PCMCIA, за счет чего также повышается помехоустойчивость системы в целом.

Полноценное воспроизведение полутонов и оттенков цветности обеспечивают программные настройки экрана, имеющиеся в операционной системе Windows и соответствующие 24 или 32 битам RGB на элемент изображения (True Color). Это означает наличие 8-разрядного кодирования каждого из трех сигналов цветности, что соответствует 256 уровням квантования по амплитуде. При 32 битах дополнительно 8 разрядов кодирует сигнал яркости Y. Для обеспечения разрешающей способности телевизионного стандарта в настройках необходимо задавать область экрана, равную не менее 800×600 элементов, соответственно видеоадаптер ЭВМ должен поддерживать данные режимы работы и обеспечивать требуемую производительность.

Понятно, что увеличение количества элементов (формата изображения) и количества информации на элемент изображения требует повышения ресурсов ЭВМ. Поэтому при ограниченных возможностях видеоадаптера (быстродействие, объем памяти и т.п.) возможно ограничение функций, например: система поддерживает 24 бита RGB при формате 800×600 элементов, но не может этого выполнить при увеличенном формате – 1024×768 , устанавливая при этом автоматически цветовую палитру 16 бит RGB (High Color), чего недостаточно для полноценного воспроизведения на экране всех полутонов.

В дополнительных свойствах экрана задается частота его обновления, которая обычно может изменяться от 60 до 100 Гц и оптимизироваться под возможности системы. Естественно, чем выше частота обновления экрана, тем картинка мерцает меньше и благоприятнее для глаз, однако это требует повышенных ресурсов ЭВМ. В общем случае целесообразно устанавливать режим обновления экрана, определяемый видеоадаптером автоматически.

В дополнительных свойствах экрана имеется возможность задать величину аппаратного ускорения видеоадаптера, т.е. максимизировать использо-

вание его аппаратных ресурсов при воспроизведении полутоновой графики. При возможности рекомендуется использовать полное аппаратное ускорение. Некоторые видеоадаптеры имеют дополнительные свойства, которые позволяют осуществлять программное управление балансом белого путем изменения соотношения сигналов основных цветов R , G и B .

Существуют различные графические форматы для записи и хранения изображений. Самый простой из них, в котором в несжатом виде хранится информация о двоичных отсчетах элементов изображения, – это .bmp файлы, где изображение хранится, как говорят, «точка в точку», а именно по 8 бит на полутоновое или по 24 бита на цветное изображение. Существуют различные алгоритмы сжатия, которые в той или иной мере искажают полутон, цвета, границы и другие детали изображения. К наиболее часто используемым сжатым графическим файлам относятся так называемые файлы формата .jpeg (jpg). Объем такого файла по крайней мере на порядок, а то и в 30–50 раз, меньше соответствующего ему файла .bmp.

Контрольные вопросы

1. Какие физические явления лежат в основе работы кинескопа?
2. В чем заключается принцип работы кинескопа?
3. Какие физические явления лежат в основе работы жидкокристаллического экрана?
4. В чем заключается принцип работы жидкокристаллического экрана?
5. Какие физические явления лежат в основе работы плазменной панели?
6. В чем заключается принцип работы плазменной панели?
7. Какие физические явления лежат в основе работы автоэмиссионной панели?
8. В чем заключается принцип работы автоэмиссионной панели?
9. На чем основана работа видеопроекторов?
10. Какие особенности имеет процесс отображения видеоинформации на дисплее ЭВМ?

Глава 6

ОБ ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

6.1. Условная классификация методов обработки изображений

Под обработкой изображения будем понимать некоторые операции с видеосигналом с целью изменения исходного изображения [22–27]. Сознательно избежим слова «улучшение», хотя, конечно, цель изменений – сделать лучше, чем было. Действительно, понятие «улучшение» несколько субъективно. Можно привести массу примеров, когда что-то улучшается, но что-то за счет этого ухудшается. Например, после низкочастотной фильтрации уменьшаются шумы, что хорошо, но одновременно понижается разрешение, что плохо.

С точки зрения абстрактной количественной оценки в изображении в результате его обработки не происходит никаких изменений, если количество бит на пиксель не меняется. Для канала связи все равно, что передавать: изображение с шумом или без шума, более качественное, с нашей субъективной точки зрения, или менее качественное, с большей смысловой (семантической) информацией или меньшей.

Обработка изображения, связанная с субъективным улучшением изображения, вовсе не обязана приводить к изменению количественных характеристик информации по К. Шеннону. Количественная оценка информации, по К. Шеннону, изменится только в том случае, если мы осуществим кодирование – сокращение избыточности в изображении.

С другой стороны, если происходит изменение исходного изображения, то, значит, происходит потеря исходной информации. Однако, если получаемое в результате обработки изображение нам кажется лучше, качественней, значит мы что-то приобретаем и можем говорить о повышении информативности изображения, о повышении в нем количества полезной (целевой) информации или о повышении качества видеoinформации. Однако в настоящее время проблема оценки качества информации еще не решена.

Методы обработки изображений можно условно разделить на *аналоговые* и *цифровые*. Аналоговые методы предполагают обработку непрерывно изменяющихся во времени напряжений, а цифровые – обработку дискретных двоичных отсчетов видеосигнала.

В свою очередь, каждый из них можно разделить на *внутрикадровые* и *межкадровые* методы обработки. Внутрикадровые методы предполагают анализ значений видеосигнала от смежных элементов в одном кадре изображения. Межкадровые методы предполагают анализ значений видеосигнала от соответствующих элементов последовательности кадров изображений.

Рассмотрим сущность основных применяемых методов обработки изображений.

6.2. Методы внутрикадровой обработки

Методы внутрикадровой обработки можно, в свою очередь, условно разделить на методы, связанные с изменением амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), и методы, связанные с преобразованием яркости.

Изменение АЧХ

Наиболее часто используется низкочастотная (НЧ) фильтрация и высокочастотная (ВЧ) коррекция.

НЧ-фильтрация заключается в подавлении высокочастотных составляющих спектра видеосигнала. В результате подавляются как шумы, так и мелкие детали в изображении, а следовательно, уменьшается разрешающая способность системы. НЧ-фильтрация сглаживает перепады яркости в изображении (интегрирование), что эквивалентно оптической расфокусировке изображения (рис. 6.1).

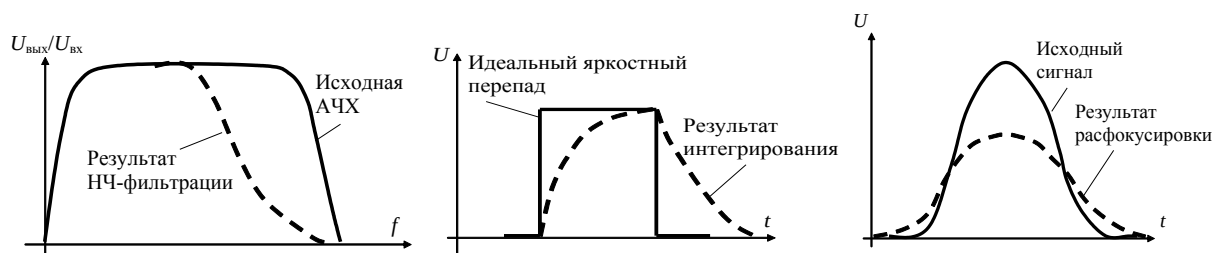


Рис. 6.1. Иллюстрация действия НЧ-фильтра

ВЧ-коррекция является одним из видов апертурной коррекции. Подчеркиваются мелкие детали в изображениях контура, картинка кажется более четкой. Однако возможно возникновение ложных контуров в результате усиления мелкоструктурного шума (рис. 6.2).

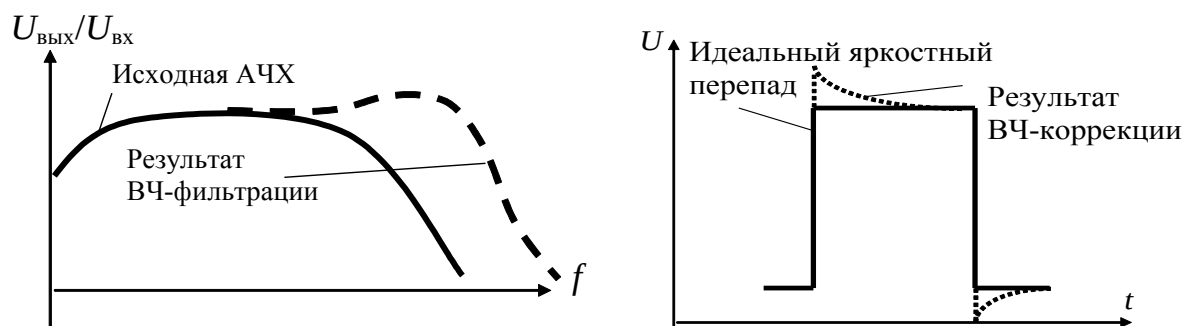


Рис. 6.2. Иллюстрация действия ВЧ-коррекции

Преобразование яркости

К методам преобразования яркости относится широко используемая *гамма-коррекция* (γ -коррекция) сигнала изображения. Так, например, компенсация нелинейности световых характеристик передающих трубок, в которых используется эффект накопления, может быть осуществлена автоматически в кинескопах. В результате общая характеристика линеаризируется (рис. 6.3).

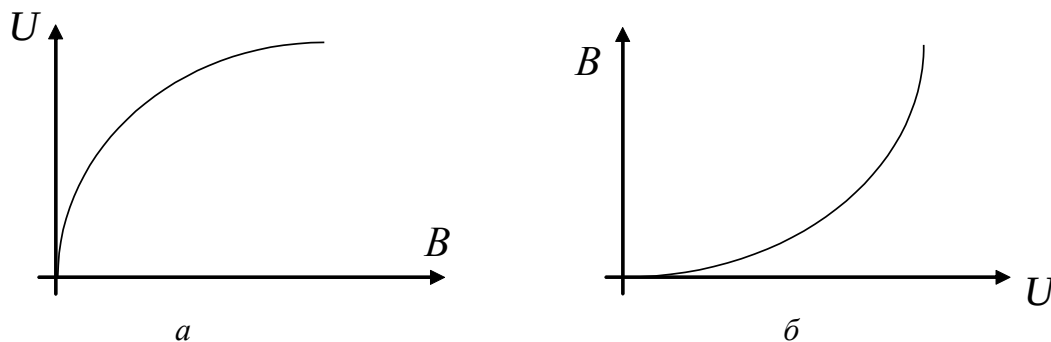


Рис. 6.3. Световые характеристики:
а – передающей трубки; б – кинескопа

ПЗС-матрицы имеют линейную световую характеристику. В результате при подаче сигнала от ПЗС-матрицы на кинескоп нелинейность результирующей характеристики будет определяться нелинейностью характеристики кинескопа.

Вместе с тем часто бывает, что интересующие нас детали изображения имеют некоторый определенный диапазон яркостей, например, если они в основном темные. В этом случае полезно усилить малый сигнал, соответствующий темным участкам (т.е. полезно сделать их светлее), в большей степени, чем большой. Это также может быть сделано с помощью γ -коррекции, при которой выходной сигнал формируется в соответствии с выражением $U_{\text{вых}} = KU_{\text{вх}}^\gamma$. Число γ называется коэффициентом контрастности. При $\gamma = 1$ характеристика линейная. Все усиливается пропорционально $U_{\text{вх}}$ с коэффициентом пропорциональности K . При $\gamma \neq 1$ характеристика нелинейная. Светлые детали усиливаются больше, чем темные, если $\gamma > 1$. Если $\gamma < 1$, то, наоборот, темные детали усиливаются больше, чем светлые. Таким образом, для детального восприятия нелинейность оказывается полезной.

По закону Вебера – Фехнера ощущение приращения яркости пропорционально ее логарифму: $\lg U_{\text{вых}} = \lg(KU_{\text{вх}}^\gamma) = \lg K + \gamma \lg U_{\text{вх}}$. Пусть $K = 1$, следовательно, $\lg K = 0$ и тогда $\lg U_{\text{вых}} = \gamma \lg U_{\text{вх}}$. Это означает, что нелинейность γ -характеристики сохраняет равномерную шкалу яркостей для визуального восприятия. При этом ступени такой яркостной шкалы имеют равную контрастность.

Обычно используется значение $\gamma = 1,5\text{--}2$ в зависимости от сюжета. Для получения γ -характеристики обычно используют кусочно-линейный метод аппроксимации, задавая коэффициент усиления с помощью делителей напряжения на резисторах (рис. 6.4).

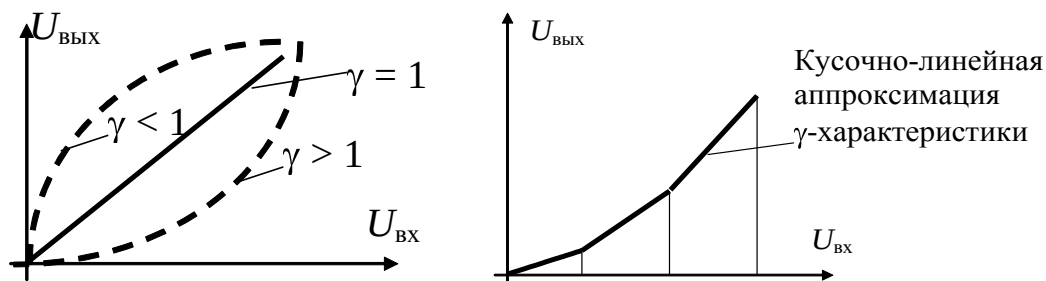


Рис. 6.4. Иллюстрация принципа γ -коррекции

Другими методами преобразования яркостей являются *амплитудная селекция* и *яркостная коррекция*.

Амплитудная селекция эффективна в тех случаях, когда полезная (целевая) информация в изображении заключается выше определенного уровня яркости. Иными словами, нас не интересуют детали темного фона. Так, например, при исследовании изображений продуктов ПЦР в гелях интерес представляют люминесцирующие на темном фоне фрагменты, а сам фон интереса не представляет. Суть амплитудной селекции поясняется на рис. 6.5. Все, что находится выше некоторого порогового уровня U_0 , проходит на выход селектора, а все, что находится ниже, – нет.

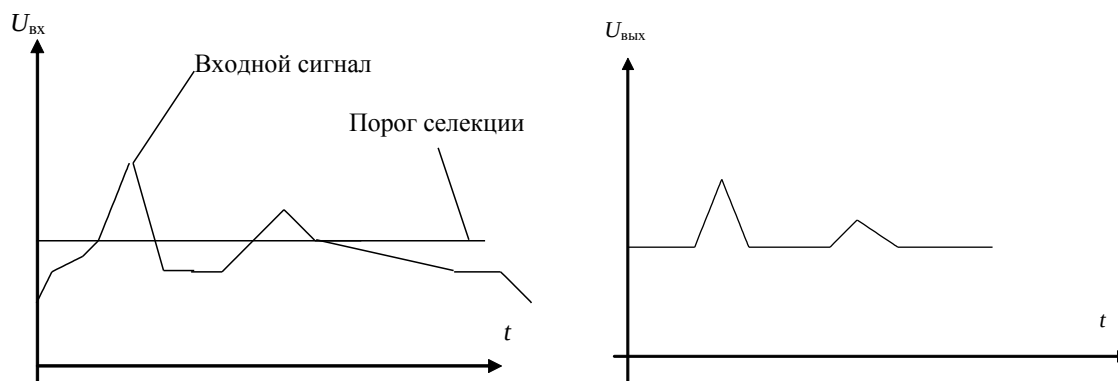


Рис. 6.5. Иллюстрация принципа амплитудной селекции

Яркостная коррекция позволяет повысить контраст изображения. Суть яркостной коррекции заключается в том, что некоторый выбранный участок динамического диапазона сигнала пропорционально «растягивается» на весь диапазон (или на некоторую его часть). В этом случае темное становится еще темнее, вплоть до черного, а светлое – еще светлее, вплоть до белого. Все промежуточные значения яркостей пропорционально размещаются в новых границах (рис. 6.6).

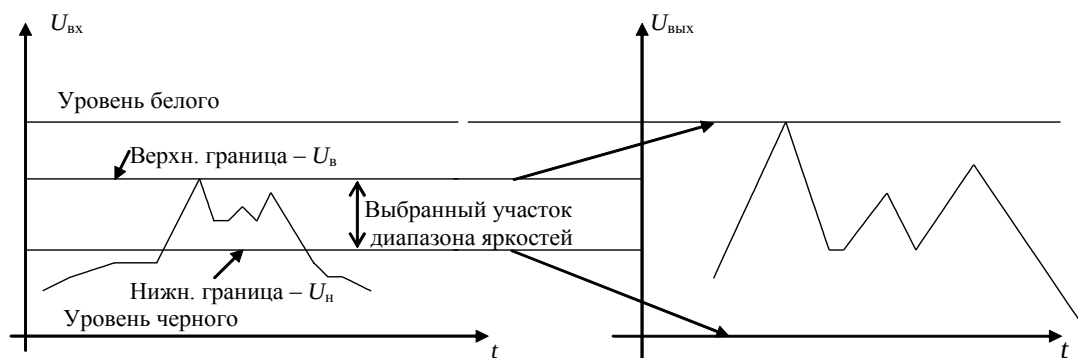


Рис. 6.6. Иллюстрация принципа яркостной коррекции

В аналоговом виде это реализуется за счет задания двух постоянных напряжений U_v и U_n , определяющих верхнюю и нижнюю границы преобразуемого участка. С помощью схем фиксации U_n «привязывается» к уровню «черного», а затем сигнал усиливается до уровня «белого».

Эффект яркостной коррекции ограничивается шумами в сигнале, поскольку в результате усиления вместе с контрастностью объекта растут и шумы. Поэтому яркостная коррекция наиболее эффективна при высоком отношении сигнал/шум. Вместе с этим следует иметь в виду интегрирующие свойства зрения человека, которые позволяют выявлять характерные детали даже в сильно зашумленном изображении. При статическом характере сюжета аналоговая коррекция яркости весьма полезна перед последующим цифровым накоплением изображения, эффективно подавляющим шумы. Цифровое накопление и эффективность его сочетания с предварительной аналоговой яркостной коррекцией будет показана ниже.

К аналоговой обработке следует отнести *изменение полярности* видеосигнала (*инверсия*). Изменение полярности изображения оказывается полезным, поскольку глаз человека на сером фоне лучше воспринимает темные объекты, чем белые. В некоторых случаях, например при визуализации люминесцирующих объектов (светлые объекты на темном фоне), инверсию изображения применяют с целью экономии чернил в картриджах принтеров при документировании.

На практике при визуализации часто оказывается полезным плавное взаимное замещение позитивного изображения негативным, и наоборот. При этом на границе перехода через позитив – негатив, т.е. при взаимном вычитании сигналов положительной и отрицательной полярности, может наблюдаться так называемый псевдорельеф изображения (рельефная оконтуренность), возникающий вследствие их неполного вычитания. Псевдорельеф может нести полезную информацию о структуре объектов на изображении.

Необходимо иметь в виду, что при использовании полного телевизионного сигнала (ПТС) его простая инверсия для получения негатива или позитива невозможна, так как она приведет к изменению полярности синхроимпульсов и нарушению синхронизации приемного устройства. Поэтому отдельно инвертируют выделенный из ПТС сигнал яркости и замещают в него сигналы синхронизации.

Цифровая внутрикадровая пространственная обработка изображений

В основе цифровой внутрикадровой пространственной обработки изображений лежит фильтрация элементов изображения, попадающих в скользящее в направлении сканирования окно с размерами $p = m \times n$ элементов, причем $p = 2k + 1$, где $k = 1, 2 \dots N$. Таким образом, размер окна равен нечетному числу элементов. При $m = n$ фильтрация двумерная, а окно является квадратным: 3×3 , 5×5 , 7×7 и т.д. элементов. Если $m = 1$ (или $n = 1$), то фильтрация одномерная, т.е. осуществляется только вдоль строки (по горизонтали) или вдоль кадра (по вертикали). Размер окна определяет степень обработки (эффект). Чем больше размер окна, тем больше различий между исходным и обработанным изображением. При фильтрации осуществляют операции над элементами, попавшими в окно, и заменяют центральный элемент вычисленным значением. После замены скользящее окно перемещается на один элемент в направлении развертки.

Фильтрация будет *рекурсивной*, если в каждом последующем шаге обработки будут учитываться результаты обработки при предыдущем положении скользящего окна. Таким образом, можно считать фильтрацию рекурсивной, если вычисляемые новые значения последовательно заменяют отсчеты исходного изображения, используемого для обработки. Если такой замены не производится, то фильтрация – *нерекурсивная*. Операция с отсчетами в скользящем окне является так называемой *дискретной сверткой* изображения (массива отсчетов) с *маской* (скользящим окном) [22].

В данном разделе обсуждаются стандартные методы цифровой фильтрации и возможности их аппаратной реализации, обеспечивающей обработку в реальном времени. Несмотря на то что методы цифровой фильтрации обычно используются при обработке изображений с помощью ЭВМ, их аппаратная реализация также представляет практический интерес, например, для построения видеосистем на кристалле на базе КМОП-фотоприемников, имеющих встроенные АЦП.

Сглаживание

Сглаживание, или низкочастотная (НЧ) фильтрация, эквивалентно расфокусировке изображения, поскольку приводит к сглаживанию яркостных перепадов. Обеспечивается при использовании маски с положительными коэффициентами. При этом маска должна иметь нормирующий множитель, приводящий сумму коэффициентов маски к единице. Например, для $m = n = 3$ возможны маски

$$H = 1/9 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \quad H = 1/10 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \quad H = 1/10 \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}.$$

Для аппаратной реализации цифрового НЧ-фильтра, работающего в реальном времени, более удобны маски, сумма элементов которых равна 2^n вида, где $n = 2, 3, 4 \dots$, например, маски вида

$$H = 1/8 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \quad H = 1/8 \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}.$$

Такая нормировка к единичному коэффициенту передачи, исключая смещение средней яркости обработанного изображения, сводится к сдвигу кода вправо на n разрядов.

Наиболее проста для реализации одномерная горизонтальная маска $H = 1/4 [1 \ 2 \ 1]$, для которой операция умножения на 2 выполняется за счет сдвига кода на один разряд, операция деления на 4 – «отбрасыванием» двух младших разрядов, а формирование скользящего окна – задержками кода на один такт.

Аналогичным образом может быть выполнена вертикальная маска при формировании скользящего окна задержками на строку изображения. Двумерную фильтрацию при этом возможно осуществить последовательной обработкой изображения горизонтальной и вертикальной маской.

Пороговая фильтрация

Уменьшения шумов в изображении можно достигнуть с использованием эвристических методов пространственной обработки. Шумы на изображении обычно проявляются как разрозненные элементы, не обладающие пространственной корреляцией. Поскольку искаженные элементы часто весьма заметно отличаются от соседних, то для подавления шума можно использовать сравнительно простой пороговый метод, согласно которому производится последовательное измерение яркости всех элементов изображения. Если яркость центрального элемента превышает яркость остальных элементов скользящего окна, то яркость центрального элемента заменяется средней яркостью элементов окна. Иначе говоря, $x_i = x_{cp}$, если $|x_{cp} - x_i| > \varepsilon$, где x_i – яркость центрального элемента, x_{cp} – средняя яркость элементов скользящего окна, ε – пороговое значение яркости. Таким образом, пороговый фильтр можно считать разновидностью сглаживающего фильтра.

Подчеркивание границ

При интерактивном анализе изображений может быть полезен метод подчеркивания границ, поскольку изображения с подчеркнутыми границами часто оказываются субъективно более качественными. Одним из способов получения такого изображения является высокочастотная (ВЧ) фильтрация

путем дискретной свертки массива F исходного изображения с маской H , имеющей отрицательные элементы. Необходимым условием для обеспечения постоянства средней яркости является равенство суммы элементов маски единице. Разновидности масок для ВЧ-фильтрации следующие:

$$H = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}; \quad H = \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}; \quad H = \begin{vmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 5 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{vmatrix}.$$

Для одномерного случая эффективным оператором ВЧ-фильтрации является оператор Лапласа $\nabla = \begin{vmatrix} -1 & 2 & -1 \end{vmatrix}$.

Другой метод подчеркивания границ, так называемое нерезкое маскирование, заключается в вычитании исходного $F(i, j)$ и нерезкого (расфокусированного) $F_n(i, j)$ изображений с различными весовыми коэффициентами. Результирующее изображение соответствует выражению $F_p = CF(i, j) - (1 - C)F_n(i, j)$, где $0 < C < 1$ (обычно $3/5 < C < 5/6$).

Нерезкое изображение $F_n(i, j)$ может быть получено при НЧ-фильтрации, поэтому нерезкое маскирование достигается путем дополнительных операций над входными и выходными отсчетами НЧ-фильтра. Для наиболее простой реализации метода удобнее всего использовать $C = 3/4$ и $F_n(i, j) = F(i, j) \cdot H$, где H – сглаживающая маска с положительными элементами.

Подчеркивание границ может быть достигнуто также методом статистического дифференцирования. В этом случае в качестве оценки яркости данного элемента изображения $F_{\text{вх}}(i, j)$ принимается результат деления величины яркости элемента $F(i, j)$ на оценку среднеквадратического отклонения $\sigma(i, j)$, вычисленного в некоторой окрестности $F_{\text{вых}} \llbracket j \rrbracket = \frac{F \llbracket j \rrbracket}{\sigma \llbracket j \rrbracket}$, где

$$\sigma \llbracket j \rrbracket = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |F \llbracket j \rrbracket - \bar{F} \llbracket j \rrbracket|, \text{ а } \bar{F} \llbracket j \rrbracket - \text{среднее значение яркости исходного}$$

изображения, вычисленное по окрестности $N(i, j)$. Среднее значение может быть приблизительно определено путем сглаживания оператором НЧ-фильтрации. Изображение $F_{\text{вых}}(i, j)$ отличается от исходного тем, что его яркость выше на границах, элементы которых отличаются от соседних, и ниже на всех остальных участках.

Медианная фильтрация

Подавление шумов может быть осуществлено медианной фильтрацией, заключающейся в замене центрального элемента скользящего окна, охватывающего нечетное количество элементов изображения, медианой всех элементов изображения в окне.

По определению медианой последовательности $A_1, A_2 \dots A_4$ для числа ее элементов $n = 2k - 1$, где $k = 0, 1, 2, \dots$, является элемент, для которого суще-

ствуется $(n - 1)/2$ элементов, меньших или равных ему по величине, и $(n - 1)/2$ элементов, больших или равных ему по величине. Алгоритм нахождения медианы последовательности длиной в n элементов заключается в упорядочении (ранжировке) этой последовательности в порядке возрастания значений ее элементов и выборе $(n + 1)/2$ ее элемента.

Полезным свойством медианного фильтра является подавление шума при сохранении ступенчатых или пилообразных сигналов. Медианный фильтр эффективно подавляет импульсные помехи, размер которых меньше половины окна анализирующей апертуры. Вместе с тем в некоторых случаях он вызывает нежелательное подавление сигнала при его длительности менее половины окна.

Рассмотрим алгоритм нахождения медианы на примере аппаратной реализации одномерного медианного фильтра с анализирующей апертурой 3×1 элемента.

По определению для отсчетов яркости A, B, C в анализирующей апертуре 3×1 элемента медианой $\text{med}(A, B, C)$ будет являться:

$\text{med}(A, B, C) = A$, если $B \geq A, B > C, A \geq C$ или $A \geq B, B < C, C \geq A$;

$\text{med}(A, B, C) = B$, если $B \geq A, C > A, C \geq B$ или $A \geq B, B \geq C, A > C$;

$\text{med}(A, B, C) = C$, если $A > B, C \geq B, A \geq C$ или $A < B, B \geq C, C \geq A$.

Возможные результаты сравнения a, b и c чисел A, B, C :

$a = 1$, если $A \geq B$, $a = 0$ (или $\bar{a}$), если $A < B$;

$b = 1$, если $B \geq C$, $b = 0$ (или $\bar{b}$), если $B < C$;

$c = 1$, если $A \geq C$, $c = 0$ (или $\bar{c}$), если $A < C$.

Таким образом, результаты сравнения могут быть закодированы двухразрядным двоичным числом F_1F_2 и представлены в виде таблицы истинности (см. табл. 6.1).

Таблица 6.1

Таблица истинности для получения результатов сравнения

Результаты сравнения	Результат вычисления	Код
$a \ b \ c$	$\text{med}(A, B, C)$	$F_1 F_2$
0 0 0	B	0 1
0 0 1	—	0 0
0 1 0	C	1 1
0 1 1	A	1 0
1 0 0	A	1 0
1 0 1	C	1 1
1 1 0	—	0 0
1 1 1	B	0 1

Из табл. 6.1 и определения медианы следуют следующие логические выражения:

$$\text{med}(A, B, C) = A, \text{ если } \bar{a}bc + a\bar{b}\bar{c};$$

$$\text{med}(A, B, C) = B, \text{ если } ab + \bar{a}\bar{b};$$

$$\text{med}(A, B, C) = C, \text{ если } a\bar{b}c + \bar{a}b\bar{c}.$$

Тогда, записав выражение для $F_1 = F_2 = 1$ и выполнив минимизацию, получим следующие логические уравнения для сортирующей цепи медианного фильтра 3×1 :

$$F_1 = \bar{a}b\bar{c} + \bar{a}bc + a\bar{b}\bar{c} + a\bar{b}c = \bar{a}b(\bar{c} + c) + a\bar{b}(\bar{c} + c) = \bar{a}b + a\bar{b};$$

$$F_2 = \bar{a}\bar{b}\bar{c} + \bar{a}b\bar{c} + a\bar{b}c + abc = \bar{a}\bar{c}(\bar{b} + b) + ac(\bar{b} + b) = \bar{a}\bar{c} + ac.$$

Ниже, на рис. 6.7, представлена структурная схема одномерного медианного фильтра с анализирующей апертурой 3×1 элемента. Блок формирования апертуры содержит 2 элемента задержки на длительность t .

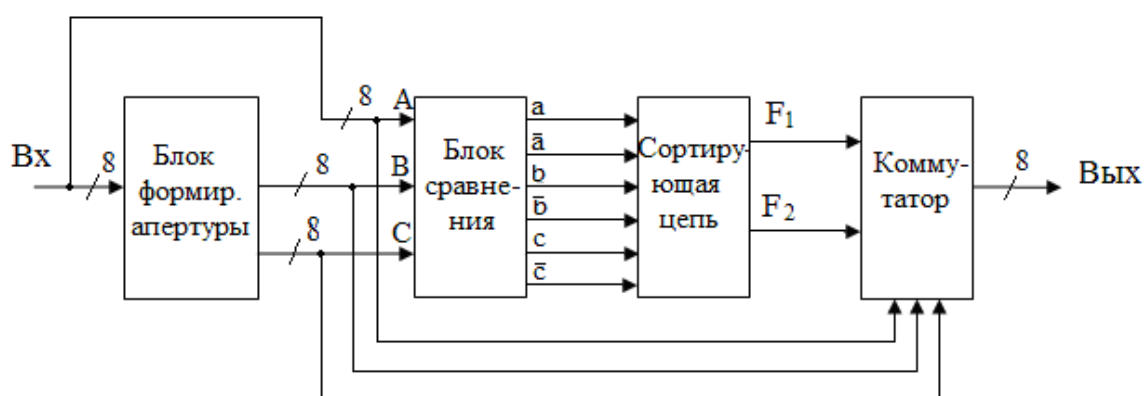


Рис. 6.7. Структурная схема одномерного медианного фильтра

Блок сравнения содержит три схемы сравнения (компаратора), формирующие результаты сравнения чисел A, B, C в виде $a, \bar{a}, b, \bar{b}, c, \bar{c}$ (рис. 6.8).

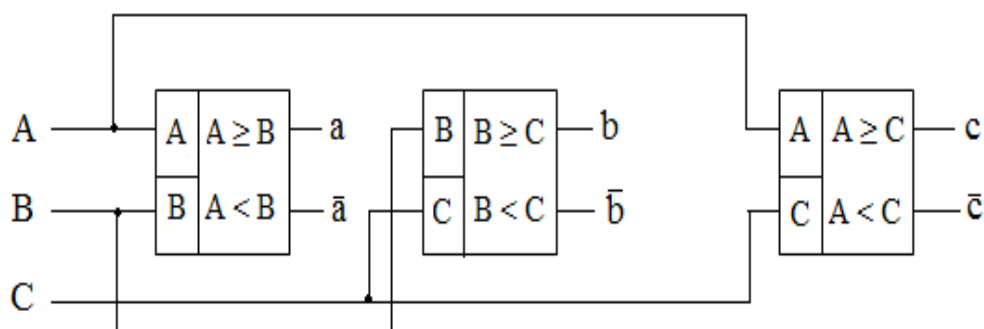


Рис. 6.8. Схема блока сравнения

Схема сортирующей цепи (рис. 6.9) в соответствии с логическим уравнением содержит 4 элемента И и 2 элемента ИЛИ. Анализирующее окно может быть горизонтальным или вертикальным в зависимости от величины задержки t в блоке формирования апертуры. Для горизонтального

окна $t = \tau_3$, для вертикального – $t = T_c$, где τ_3 – длительность элемента, T_c – длительность строк. Возможно каскадное (последовательное) включение рассмотренных фильтров с $t = \tau_3$ и $t = T_c$.

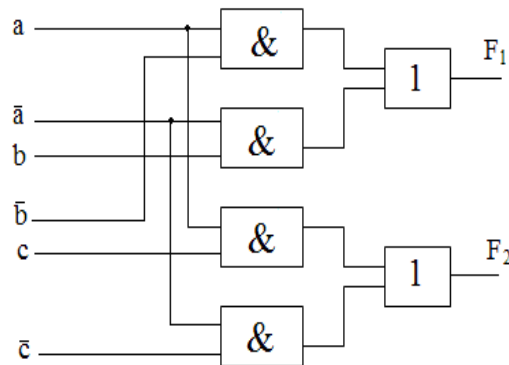


Рис. 6.9. Схема сортирующей цепи

Аппаратная реализация медианного фильтра с большим размером окна весьма громоздка, так как уже для 5 элементов требуется выполнить 10 попарных сравнений, а для 7 – 21 попарное сравнение. Причем число перестановок для поиска медиан в первом случае – 120, а во втором – 5340 (в общем случае число попарных сравнений определяется как число сочетаний $N = Cn^k = n!/k!(n-k)!$). Каждому из 2^N N -разрядных двоичных чисел ставится в соответствие один из n исходных отсчетов и кодируется n -разрядным двоичным числом. Таким образом, синтез сортирующей цепи сводился к задаче преобразования N -разрядного кода в n -разрядный. Задача преобразования решается стандартным путем составления логических выражений и их минимизации в соответствии с правилами булевой алгебры.

Возможен вариант рекурсивной медианной фильтрации, при которой для вычисления используются некоторые значения медиан, полученных при предыдущих положениях скользящего окна. Количество предыдущих значений медиан не должно превышать половины размеров анализирующего окна. В противном случае происходит полное подавление сигнала. Целесообразно использовать $K = (n - 2)/2$ предыдущих значений медиан в соответствии с примером одномерного рекурсивного медианного фильтра 3×1 на нижеприведенном рисунке.

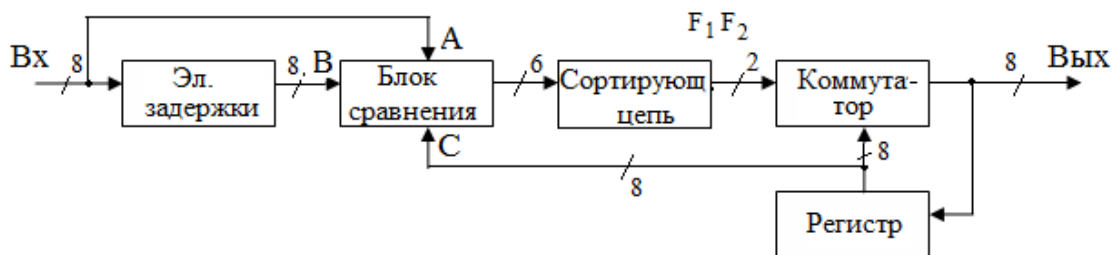


Рис. 6.10. Структурная схема одномерного рекурсивного медианного фильтра

6.3. Методы межкадровой обработки

Межкадровые методы предполагают анализ значений видеосигнала от соответствующих элементов последовательности кадров изображений.

Подавление шумов методом накопления

Свет, представляющий собой поток фотонов, проходя через объектив, попадает на фоточувствительную поверхность матрицы ПЗС и преобразуется в фотоэлектроны, которые собираются в ее накопительных ячейках-пикселях.

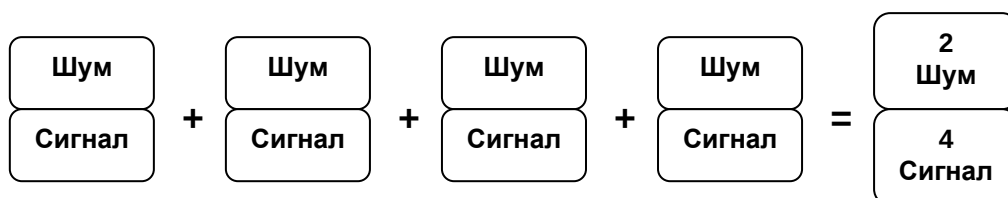
При слабой освещенности поток фотонов уменьшается. Число фотоэлектронов, накапливаемых в пикселе изображения за кадр, уменьшается с сотен тысяч при высокой освещенности до десятков и даже единиц при слабой освещенности. В результате шум становится главным препятствием для получения качественного изображения [15; 17].

Существуют *аналоговые* и *цифровые* методы подавления шумов, основанные на принципе накопления энергии сигнала, который базируется на коренном отличии сигнала от шума. Сигнал всегда однополярный (в телевидении – положительный) и имеет ограниченную полосу частот. Шум всегда дифференциальный с нулевым математическим ожиданием и со значительно более высокой полосой частот.

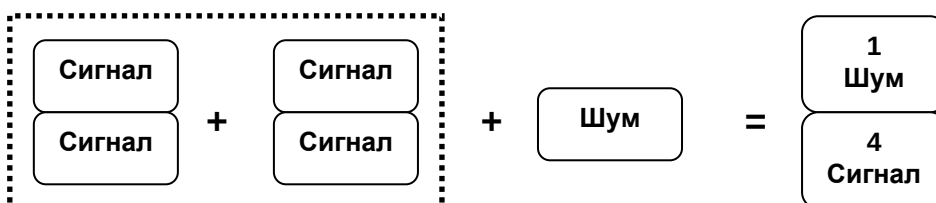
В результате простое сложение (накопление) порций «сигнал + шум» будет приводить к линейному росту уровня сигнала и только к замедленному (по закону квадратного корня) росту среднеквадратического отклонения размаха шума: так, например, каждые 100 сложений улучшают отношение сигнал/шум в 10 раз.

Определенным преимуществом обладает способ повышения чувствительности, называемый «накопление до воздействия шума». Его суть заключается в том, что дополнительное суммирование (накопление) сигнала производится в самой матрице ПЗС до того, как сигнал попал в выходное устройство и к нему присоединился шум считывания. В результате шум считывания добавляется в выходном устройстве ПЗС один раз на каждую сумму сигналов (см. рис. 6.11).

Таким образом, четырехкратное сложение приводит к десятикратному росту отношения сигнал/шум, а не к двукратному, как в обычных методах. Этот режим возможен благодаря тому, что при малых сигналах шум считывания значительно превосходит фотонный шум и последний практически не оказывает влияния на результат накопления.



Накопление сигнала с шумом (стандартный метод)



Накопление сигнала до воздействия шума
(в телекамерах ЭВС)

Рис. 6.11. Принципы накопления сигнала

Для статических изображений, к которым относятся, например, изображения люминесцирующих объектов, наиболее эффективна межкадровая обработка, заключающаяся в нахождении среднего арифметического из последовательности n кадров (шумоподавление или накопление).

Покажем, что усреднение последовательности n кадров приводит к подавлению шумов в $\sqrt{n}$ раз.

Пусть математическое ожидание (среднее значение) случайной величины x : $M(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, дисперсия $D(x) = M[(x_i - M(x))^2]$, среднеквадратическое отклонение $\sigma_x = \sqrt{D(x)}$.

Известны следующие правила вычисления математического ожидания и дисперсии случайных величин [28; 29]:

$$M(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = M(x_1) + M(x_2) + \dots + M(x_n);$$

$$D(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = D(x_1) + D(x_2) + \dots + D(x_n);$$

$$M(ax) = aM(x);$$

$$D(ax) = a^2 D(x);$$

$$D(a) = 0;$$

$$D(a + x) = D(x);$$

$$M(a) = a;$$

$$M(a + x) = a + M(x).$$

Пусть $U_{\text{ш}}$ – случайная величина шума. Эффективное значение напряжения шума соответствует среднеквадратическому отклонению случайной величины $U_{\text{ш}}$: $U_{\text{эф}} = \sigma_{\text{ш}} = \sqrt{D(U_{\text{ш}})}$. При усреднении $U_{\text{ш}}$ за n кадров получаем случайную величину:

$$U'_{\text{ш}} = \frac{1}{n} (U_{\text{ш}1} + U_{\text{ш}2} + \dots + U_{\text{ш}n}).$$

При повторении цикла усреднения m раз получим математическое ожидание $M(U_{\text{ш}}') = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m U_{\text{ш}}'$ и дисперсию

$$D(U_{\text{ш}}') = D\left[\frac{1}{n} (U_{\text{ш}1} + U_{\text{ш}2} + \dots + U_{\text{ш}n})\right] = \frac{1}{n^2} [D(U_{\text{ш}1}) + D(U_{\text{ш}2}) + \dots + D(U_{\text{ш}n})].$$

Так как $D(U_{\text{ш}1}) = D(U_{\text{ш}2}) = \dots = D(U_{\text{ш}i}) = \dots = D(U_{\text{ш}n}) = D(U_{\text{ш}})$, то $D(U_{\text{ш}1}) + D(U_{\text{ш}2}) + \dots + D(U_{\text{ш}n}) = nD(U_{\text{ш}})$, а значит $D(U_{\text{ш}}') = \frac{D(U_{\text{ш}})}{n}$ и $\sigma_{\text{ш}}' = \frac{\sigma_{\text{ш}}}{\sqrt{n}}$.

Таким образом, при усреднении кадров изображения эффективное значение напряжения шума уменьшается в $\sqrt{n}$ раз, где n – число усредняемых кадров. Соответственно отношение сигнал/шум в $\sqrt{n}$ раз увеличивается.

Классическая структурная схема шумоподавителя [22] приведена на рис. 6.12.

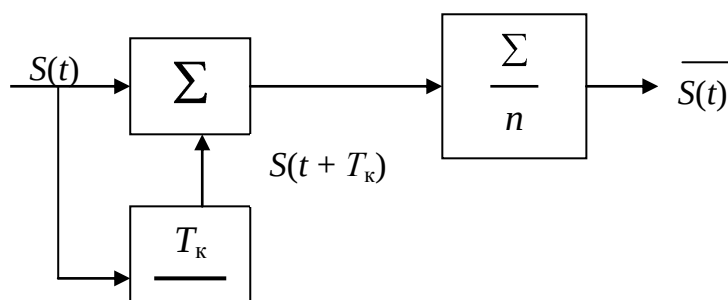


Рис. 6.12. Структурная схема шумоподавителя:

$S(t)$ – входной сигнал; $S(t + T_k)$ – сигнал, задержанный на время кадра T_k ;

$S(t)$ – усредненный сигнал; n – количество усредняемых кадров

При наличии ЭВМ в составе телевизионной системы цифровой шумоподаватель реализуется программным путем. Практика показывает целесообразность сочетания в ТСС (телевизионной спектральной системе) методов аналоговой яркостной коррекции с последующим цифровым накоплением. Эффективность такого сочетания показана на рис. 6.13 для тест-объекта, имитирующего люминесценцию продуктов полимеразной цепной реакции (ПЦР) [45–48] в количестве 10 нг, окрашенных бромидом этидия, что соответствует порогу обнаружения при наблюдении невооруженным глазом (верхний ряд), а также применительно к изображению инфракрасной люминесценции штемпельной краски в паспорте (нижний ряд).

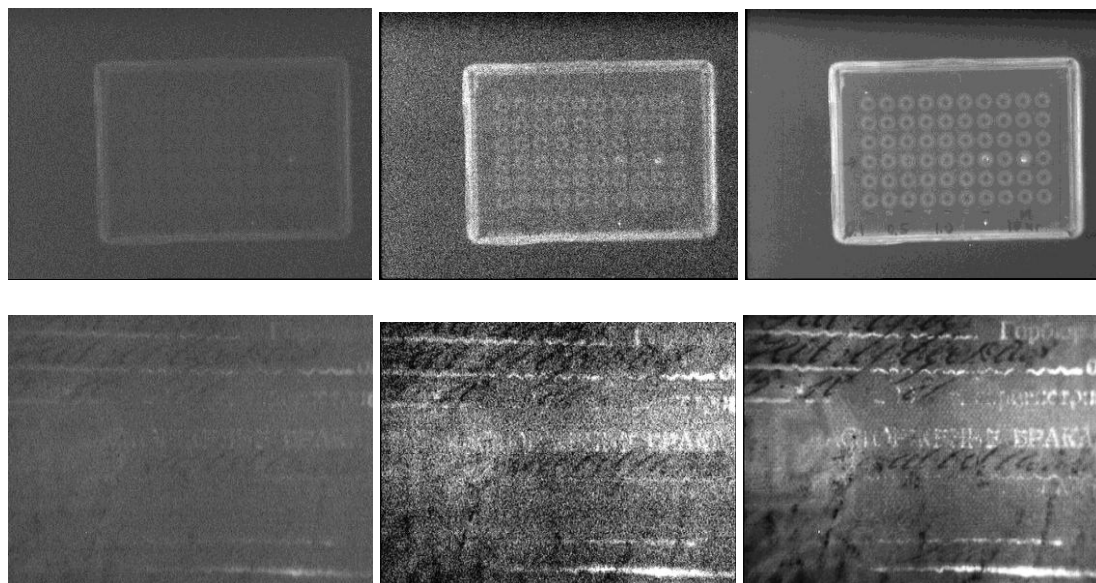


Рис. 6.13. Примеры изображений люминесценции ПЦР-продуктов (верхний ряд) и штемпельной краски (нижний ряд).

Слева направо: исходное изображение; после аналоговой яркостной коррекции; после цифрового накопления

Рассмотрим выигрыш, получаемый в результате обработки сигнала изображения люминесцирующего объекта, заключающейся в последовательной аналоговой яркостной коррекции (привязка уровня фона к уровню черного и усиление) и цифровом шумоподавлении (накоплении), по сравнению с накоплением и последующей цифровой яркостной коррекцией.

Пусть динамический диапазон изменения сигнала составляет от 0 до $U_{\text{макс}}$, уровень фона соответствует $U_{\text{ф}}$, уровень полезного сигнала люминесцирующего объекта относительно фона составляет $U_{\text{с}}$, а уровень шума – $U_{\text{ш}}$. Тогда максимальный коэффициент усиления сигнала при предварительной аналоговой обработке составит: $K = U_{\text{макс}}/U_{\text{с}}$.

Пусть ΔU – шаг квантования сигнала по амплитуде при последующей цифровой обработке. Тогда количество получаемых градаций яркости в результате всей процедуры обработки изображения составит: $N = U_{\text{с}}/\Delta U$ (при отсутствии предварительной аналоговой обработки) и $N_0 = U_{\text{макс}}/\Delta U$ (при наличии предварительной аналоговой обработки).

Таким образом, выигрыш в числе градаций яркости, получаемых в результате всей процедуры, составит $K = N_0/N$ раз.

Одновременно при предварительной аналоговой обработке в K раз увеличится величина шумов. Однако при накоплении шум уменьшается в $\sqrt{n}$ раз, где n – число накапливаемых кадров изображений. Таким образом, для случая без предварительной аналоговой обработки $U_{\text{ш}}' = U_{\text{ш}}/\sqrt{n}$ и $U_{\text{ш}}'' = KU_{\text{ш}}/\sqrt{n}$ для случая с предварительной аналоговой обработкой.

Следовательно, увеличение числа передаваемых градаций яркости в K раз при рассматриваемой процедуре обработки одновременно связано с ростом шума в такое же число раз. Чтобы компенсировать эту потерю, необходимо увеличить число накапливаемых кадров n при цифровом шумоподавлении в K^2 раз. Для статических изображений люминесцирующих объектов увеличение времени накопления не является критической величиной.

Определение межкадровой разности

К межкадровой обработке относится метод определения межкадровой разности (МКР), заключающийся в поэлементном вычитании предшествовавшего телевизионного кадра из текущего [22]. Так, например, решение задачи обнаружения изменения в телевизионном сюжете на малоподвижном фоне приводит к структурной схеме, представленной на рис. 6.14.

Алгоритм работы блока оценки фона описывается выражением $F(x, y, t_k) = F(x, y, t_{k-1}) + \alpha[U(x, y, t_k) - F(x, y, t_{k-1})]$, где $U(x, y, t_k)$ – сигнал изображения k -го кадра, $F(x, y, t_k)$ – оценка фона в k -м кадре, $F(x, y, t_{k-1})$ – оценка фона в предыдущем кадре, α – коэффициент рекурсии ($0 < \alpha < 1$). На выбор величины α оказывают влияние мощность шума, степень подвижности фона, количество уровней квантования (при цифровой обработке). Очевидно, что при $\alpha = 0$ происходит простое межкадровое вычитание, при $\alpha = 1$ – дополнение оценки фона до значений текущего сигнала.

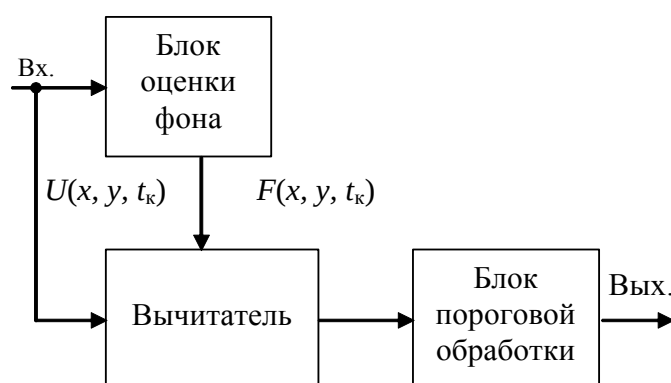


Рис. 6.14. Структурная схема обнаружителя изменений в ТВ-сюжете

Для случая неподвижного фона можно воспользоваться его оценкой $F(x, y, t_m)$ в эталонном кадре, т.е. при $k = m = \text{const}$. Возможен вариант с обновлением эталона при превышении сигналом МКР некоторого порогового значения.

В этом случае в рассмотренной выше схеме появляется обратная связь от блока пороговой обработки к блоку оценки фона. Новая оценка фона $F(x, y, t_k)$ (эталон) формируется при появлении сигнала с блока пороговой обработки. Пороговое значение может вычисляться по амплитудным

значениям или по значению, например, площади бинарного изображения, занимаемой сигналом МКР. В первом варианте величина МКР просто сравнивается с заданным пороговым уровнем, определяющим, например, выходной бинарный сигнал МКР. Во втором варианте блок пороговой обработки оценивает дополнительно параметр выходного бинарного сигнала (например площадь), сравнивает его с заданным значением и в случае превышения формирует сигнал обновления эталона. Структурная схема, реализующая рассмотренный метод, приведена на рис. 6.15.

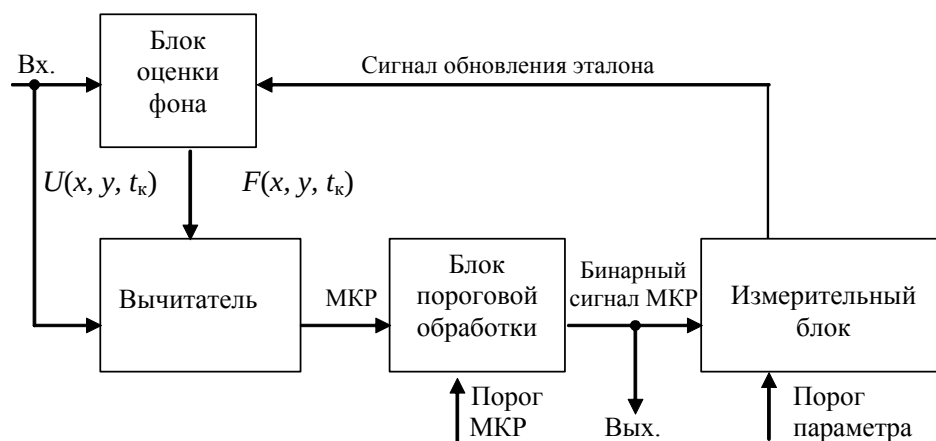


Рис. 6.15. Структурная схема обнаружителя изменений в сюжете при неподвижном фоне

Метод компенсации фоновой засветки, неравномерности сигнала и дефектов элементов матрицы

Неравномерности сигнала и фоновой засветки устраняют компенсационными методами [30; 31]. Кроме этого, методы компенсации позволяют учесть возможные дефекты элементов матриц (короткозамкнутые ячейки, обрывы, ячейки с аномально высоким уровнем темнового тока и т.п.), которые приводят к появлению ложных ярких (или, наоборот, темных) элементов на темном (или, наоборот, светлом) фоне.

Суть компенсационных методов заключается в следующем. При закрытом объективе фотоприемника запоминают значения темнового тока $T(i, j)$ для каждого i, j -элемента матрицы $M \times N$. Затем облучают фотоприемник контрольной равномерной засветкой, запоминая для каждого i, j -элемента полученные значения $\Phi(i, j)$ от равномерного фона. Для каждого элемента определяют коэффициент передачи $N(i, j)$, при котором выходной сигнал равен эталонному $N(i, j) = \Phi(i, j)/U_0$, где $U_0 = \max[\Phi(i, j) - T(i, j)]$.

При информативной засветке синхронно со сканированием производят компенсацию в соответствии с выражением $U(i, j) = [U_n(i, j) - T(i, j)]N(i, j)$, где $U(i, j)$, $U_n(i, j)$ – значения выходного сигнала и сигнала информационной засветки соответственно.

Компенсация дефекта заключается в замене сигнала от дефектной ячейки сигналом предыдущей (недефектной) ячейки или значением яркости, вычисленным по некоторой ее окрестности.

Поиск дефекта и его запоминание проводится путем сравнения значений яркости при контрольной засветке $\Phi(i, j)$ и значений темнового тока $T(i, j)$ с пороговыми значениями Φ_0 и T_0 .

При $T(i, j) > T_0$ выявляют «белые» дефекты, при $\Phi(i, j) < \Phi_0$ – «черные». Для данных элементов значение коэффициента передачи $N(i, j)$ принимается равным нулю.

Таким образом, поиск дефектов производится в соответствии со следующим выражением:

$$N(i, j) = \begin{cases} \Phi(i, j)/U_0 & \text{при } \Phi(i, j) > \Phi_0; T(i, j) < T_0 \\ 0 & \text{при } \Phi(i, j) < \Phi_0; T(i, j) > T_0 \end{cases},$$

где $U_0 = \max[\Phi(i, j) - T(i, j)]$ в диапазоне $\Phi(i, j) > \Phi_0; T(i, j) < T_0$.

При информативной засветке в момент считывания элемента, для которого $N(i, j) = 0$, в качестве $U(i, j)$ берется предыдущее значение $U(i-1, j-1)$.

Более точно компенсация дефектов осуществляется путем анализа массивов коэффициента передачи $N(i, j)$ и текущего сигнала $U(i, j)$ в заданной апертуре H размером $m \times m$ элементов, где $m = 2k + 1$, $k = 1, 2, \dots$, с центральным элементом, равным 0.

Для исходного массива $N(i, j)$ формируется массив маски:

$$X(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{если } N(i, j) = 0 \\ 1, & \text{если } N(i, j) = 1 \end{cases}.$$

Полученную маску удобно использовать для обработки информационного массива $U(i, j)$ по формуле

$$U(i, j) = \begin{cases} U(i, j), & \text{если } X(i, j) = 1 \\ U'(i, j), & \text{если } X(i, j) = 0 \end{cases}.$$

Дефектный (центральный) элемент заменяется средним значением, вычисленным по окрестности, соответствующей анализирующей апертуре H , с учетом коэффициентов маски $X(i, j)$, попавших в апертуру H , т.е.

$$U' \llbracket j \rrbracket = \sum_{i, j=1}^{m-n} U \llbracket j \rrbracket X \llbracket j \rrbracket H,$$

где n – число нулевых элементов маски в апертуре, что позволяет не учитывать дефектные элементы при вычислении среднего значения.

6.4. Цифровое кодирование видеосигнала

Цель цифрового кодирования (сжатия, компрессии) – сокращение *пространственной, временной и спектральной избыточности* видеосигнала, что позволяет, в свою очередь, снизить требования к каналу связи и уменьшить объем памяти, необходимой для записи изображений. Так, например, скорость передачи несжатого цветного сигнала ССТV составляет примерно 25 Мбайт/с, что требует достаточно большой полосы пропускания и достаточно большого объема памяти для записи.

Избыточность устраняется фильтрацией, уменьшающей корреляцию отсчетов видеосигнала. Фильтрация сопровождается необратимыми потерями информации. Допустимая ошибка при этом определяется свойствами зрения человека, т.е. субъективно сжатое изображение не должно отличаться от исходного.

В цифровой ТВ-системе сокращение избыточности происходит в несколько этапов:

- 1) непосредственно в телекамере за счет накопления по площади элемента разложения, по времени кадра и по длине волны светового потока;
- 2) в ходе аналого-цифрового преобразования;
- 3) в ходе сжатия (компрессии) цифрового потока.

Компрессия может быть обратимой (т.е. с нулевой ошибкой восстановления), однако на практике обычно используют необратимую компрессию.

При кодировании обрабатывают не отсчеты исходного изображения, а *отсчеты коэффициентов разложения в ряд* по выбранному базису. Обработка заключается в отсечении членов ряда, адаптивном квантовании оставшихся коэффициентов и их статистическом кодировании.

Степень сжатия при заданной ошибке зависит от выбора базиса. Базис может быть одинаковым для всех изображений или адаптироваться в зависимости от свойств изображения.

Так, например, преобразование Фурье, не зависящее от вида сигнала, дает сумму синусоидальных и косинусоидальных составляющих с кратными частотами. Поскольку энергия спектра Фурье для большинства изображений сосредоточена в низкочастотной области, то обычно отсекают коэффициенты соответствующих высокочастотных компонентов ряда.

Поскольку большинство изображений характеризуется симметрией, то из ряда Фурье можно исключить синусоидальные компоненты и перейти к дискретному косинусному преобразованию, лежащему в основе большинства алгоритмов компрессии, в частности JPEG (Joint Photographic Expert Group), разработанному объединенной группой экспертов по фотографии Международной организации по стандартизации (ISO) применительно к неподвижным изображениям.

Возможно применение алгоритма JPEG и для видеосюжетов при коэффициенте сжатия до 8. При большей степени сжатия становятся заметными артефакты в виде паразитных узоров, происходит потеря деталей и т.п.

Специально для подвижных изображений группой экспертов по вопросам кинотехники был разработан ряд стандартов для сжатия изображения, звука и их комбинации – MPEG (Motion Picture Expert Group):

- 1) MPEG-1 (для передачи изображения со скоростью до 1,5 Мбит/с);
- 2) MPEG-2 (для передачи изображения и звука со скоростью от 1,5 до 50 Мбит/с);
- 3) MPEG-4 (для передачи аудиовизуальных объектов со скоростью от 1,5 до 50 Мбит/с).

Стандарт MPEG основан на кодировании трех типов изображений:

1. Тип I (Intra-coded picture) – изображения, кодируемые путем устранения только пространственной избыточности, т.е. с использованием той информации, которая содержится в самих изображениях.

2. Тип P (Predictive-coded picture) – изображения, кодируемые путем устранения как пространственной, так и временной избыточности с использованием разности между исходным изображением и предсказанием, полученным на основе предшествующего или последующего изображения типа I.

3. Тип B (Bidirectionally-predictive-coded picture) – изображения, кодируемые путем устранения как пространственной, так и временной избыточности с использованием предсказания, полученного на основе предшествующего или последующего изображения типа I или типа P.

Пространственную избыточность в изображениях типа I устраняют на уровне блоков 8×8 элементов, используя дискретное косинусное преобразование, взвешенное квантование и энтропийное кодирование полученных коэффициентов разложения в ряд.

Пространственную и временную избыточность в изображениях типа P и B устраняют, используя межкадровое кодирование. Это позволяет сжать изображение дополнительно примерно в 3 раза по отношению к изображению типа I (для типичных сюжетов сжатие по отношению к изображениям типа I составляет в среднем 35% для изображений типа P и 25% для изображений типа B).

В результате достигается общая ($I \rightarrow P$, или $I \rightarrow B$, или $I \rightarrow P \rightarrow B$) степень сжатия до 100 раз. Так, например, стандарт MPEG-2 позволяет произвести видеозапись длительностью 90 мин с качеством VHS на стандартный CD-ROM емкостью 650 Мбайт.

Недостатки стандартов MPEG:

1. Большая степень сжатия достигается лишь для статических сюжетов. Для динамики реальное сжатие не превышает 15 раз.

2. Алгоритм MPEG не применим для регистрации сигналов от нескольких источников с временным мультиплексированием, так как временная корреляция соседних кадров на выходе мультиплексора отсутствует.

3. Возникают дополнительные ошибки округления из-за использования операций с плавающей запятой при вычислении коэффициентов разложения в ряд.

Кодирование на основе вейвлет-преобразования

Основные отличия вейвлет-преобразования от MPEG и JPEG:

1. Форма базисных функций содержит не одну частоту, а спектр частот и задается на небольшом интервале.

2. Базисные функции масштабируются кратно числу 2.

Поскольку ошибки округления при вычислениях вейвлет-коэффициентов отсутствуют, то соответственно уменьшается ошибка кодирования.

На вейвлет-кодировании основан стандарт JPEG-2000. При этом изображение так же, как и в JPEG, разбивается на прямоугольные блоки, однако дискретное косинусное преобразование заменяется на вейвлет-преобразование.

Преимущества JPEG-2000:

1. Цифровой поток JPEG-2000 позволяет обращаться к отдельным блокам без полного декодирования всего изображения и реализовать переменную четкость по полю (например, для объекта и фона), что, в свою очередь, обеспечивает повышение степени сжатия.

2. Использование кодов с самопроверкой и исправлением ошибок позволяет передавать видеoinформацию на длинные расстояния, а также по беспроводным сетям, характеризующимся низкой помехоустойчивостью.

Аппаратура с применением JPEG-компрессии, например цифровые видеорегистраторы, обеспечивает запись видеосюжетов при характеристиках, приведенных в табл. 6.2 [32].

Таблица 6.2

Градации качества, степень сжатия и достигаемое разрешение в аппаратуре с JPEG-компрессией изображений

Градации качества	Степень сжатия, раз	Разрешение, т.л.	Число полей для емкости HDD 4 Гбайт
SUPERIOR (очень высокое)	8	420	57
HIGH (высокое)	10	410	86
STANDART (обычное)	15	400	130
BASIC (базовое)	20	390	173
LOW (низкое)	25	380	217
LOWER (очень низкое)	30	370	260

Контрольные вопросы

1. Каким образом можно классифицировать методы обработки изображений?

2. Как влияет на изображение низкочастотная фильтрация?

3. Как влияет на изображение высокочастотная фильтрация?

4. В чем заключается коррекция яркости изображения?
5. В чем заключается гамма-коррекция сигнала изображения?
6. На чем основана внутрикадровая пространственная цифровая обработка изображения?
7. В чем заключается медианная фильтрация изображения?
8. В чем заключается метод накопления сигнала изображения?
9. В чем заключается принцип работы цифрового шумоподавителя?
10. В чем заключается метод компенсации фоновой засветки, неравномерности сигнала и дефектов элементов матрицы?
11. Перечислите основные методы кодирования видеосигнала.

Глава 7

МЕТОДЫ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

В основе методов визуализации люминесценции лежит структурная схема, показанная на рис. 7.1.

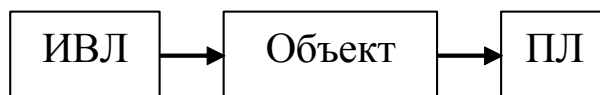


Рис. 7.1. Структурная схема системы визуализации люминесценции:
ИВЛ – источник возбуждения люминесценции; ПЛ – приемник люминесценции

При визуальном обнаружении приемником люминесценции служит непосредственно глаз наблюдателя, при фотографическом – фотопленка, а при телевизионном – фотоприемник. Данная схема с учетом специфики телевидения может быть дополнена устройствами аналоговой и цифровой обработки [34–39].

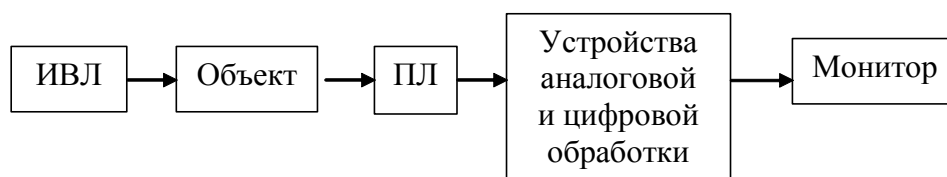


Рис. 7.2. Структурная схема телевизионной системы, визуализирующей люминесценцию

В качестве ИВЛ используется источник света со светофильтром, выделяющим спектр поглощения, а в качестве ПЛ – матричный фотоприемник со светофильтром, выделяющим спектр люминесценции исследуемого вещества. Получаемый видеосигнал используется для дополнительной аналоговой и/или цифровой обработки с целью повышения контрастности и уменьшения уровня шумов.

Под устройством аналоговой обработки подразумевается устройство коррекции видеосигнала, в качестве устройства цифровой обработки выступает ЭВМ со специализированным программным обеспечением, в которую вводится преобразованный в цифровую форму видеосигнал. Получаемое изображение отображается на экране телевизионного или компьютерного монитора.

При визуализации фотолюминесценции необходимо минимизировать паразитные фоновые засветки, возникающие из-за неидеальности спектральных характеристик светофильтров, а также из-за возможной собственной люминесценции фона. Так, например, метод возбуждения ультрафиолетовыми лучами люминесценции меток, размещенных в денежных знаках и цен-

ных бумагах, основан на вторичной люминесценции, поскольку ультрафиолетовые лучи поглощаются целлюлозной основой документа и вызывают ее свечение в сине-голубой области спектра, которое, в свою очередь, возбуждает свечение меток различного цвета.

Аналогичным образом на вторичной люминесценции основан метод детекции с помощью ультрафиолетовых лучей результатов электрофореза в гелях ПЦР-продуктов, окрашенных, например, бромидом этидия или флуоресцеином. При этом ультрафиолетовые лучи поглощаются агарозой или полиакриламидом геля и вызывают их свечение в сине-голубой области спектра, которое, в свою очередь, вызывает свечение бромида этидия с максимумом в оранжево-красной области спектра или флуоресцеина с максимумом в зеленой области спектра [45–48].

Фоновая составляющая дает дополнительный паразитный световой поток, проникающий в фотоприемник и ограничивающий контрастность получаемого изображения. Таким образом, перевод спектра ИВЛ на участок, согласованный непосредственно со спектром поглощения исследуемого вещества, т.е. на метод возбуждения первичной люминесценции, является одним из способов повышения чувствительности системы. Рассмотрим далее принципы построения систем для визуализации фотолюминесценции различных типов с использованием стандартных светофильтров.

Визуализация цветной люминесценции

Принцип визуализации цветной люминесценции показан на рис. 7.3, на котором приведены спектральные характеристики компонентов системы в соответствии с ее моделью. Возбуждение люминесценции осуществляется ИВЛ с УФ источником света на основе ртутной лампы, имеющей линейчатый спектр излучения и снабженной светофильтром типа УФС. С точки зрения оптимального сочетания максимума полезного пропускания УФ-излучения и минимального паразитного «красного хвоста», свойственного данному типу светофильтров, предпочтительно применение стекол типа УФС-2, УФС-5.

Материал стекла трубки также оказывает фильтрующее действие на коротковолновую часть излучения. При этом наименьшее влияние оказывает кварцевое стекло. В зависимости от типа люминофора трубки получают различные характеристики свечения. Покрытие трубки ртутной лампы изнутри люминофором сдвигает коротковолновое газоразрядное свечение ртути в длинноволновую область спектра и преобразует спектр из линейчатого в более сплошной.

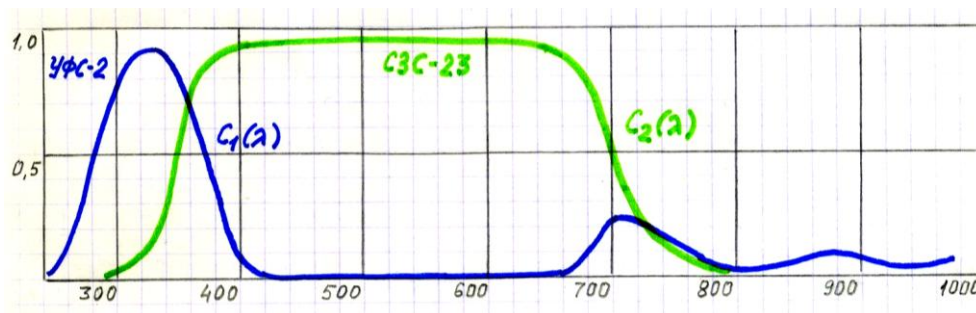


Рис. 7.3. Компоненты системы для визуализации цветной люминесценции:
 $C_1(\lambda)$ – спектральная характеристика светофильтра УФС-2, выделяющего спектр поглощения;
 $C_2(\lambda)$ – спектральная характеристика светофильтра СЗС-23, выделяющего спектр вторичной люминесценции цветных красителей

Спектр люминесценции выделяется светофильтром СЗС-23. В сочетании с $G(\lambda)$ – спектральной характеристикой чувствительности стандартной ПЗС-матрицы – результирующая характеристика ПЛ получается близкой к кривой видности глаза человека.

Визуализация люминесценции в различных участках видимой области спектра под воздействием УФ-лучей

Принцип визуализации люминесценции в выбираемых участках видимой области спектра под воздействием УФ-лучей показан на рис. 7.4.

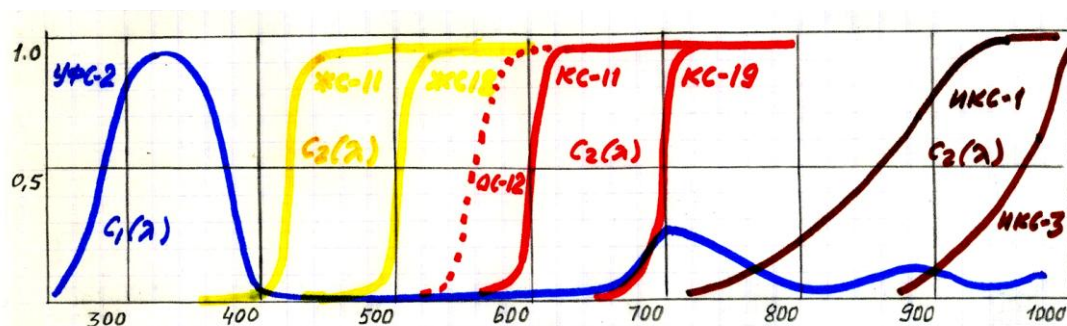


Рис. 7.4. Спектральные характеристики компонентов системы визуализации люминесценции в видимой области спектра под воздействием УФ-излучения

Участки спектра выбираются стандартными отрезающими светофильтрами типа ЖС, ОС, КС, имеющими достаточно крутые границы, отсекающие коротковолновую часть спектра. Для устранения нежелательного влияния паразитной засветки в области «красного хвоста» фильтра типа УФС отрезающие светофильтры могут использоваться в комбинации со светофильтром СЗС-23. На рис. 7.4–7.7 приведены нормированные спектральные характеристики светофильтров. При построении системы следует иметь в виду различие в коэффициентах пропускания различных типов светофильтров.

Визуализация инфракрасной люминесценции

Принцип телевизионной визуализации инфракрасной (ИК) люминесценции показан на рис. 7.5. Источником света с широким спектром (видимый и инфракрасный диапазон) служит галогенная лампа. Участок спектра поглощения в видимой области спектра (сине-зеленая область спектра) выделяется светофильтром $C_1(\lambda)$ типа СЗС-21. Для снижения тепловой нагрузки, создаваемой галогенной лампой, СЗС-21 целесообразно использовать в комбинации со светофильтром СЗС-26, подавляющим ИК-излучение.

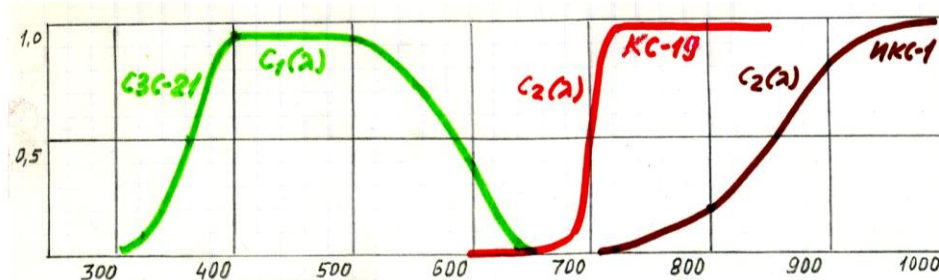


Рис. 7.5. Спектральные характеристики компонентов системы визуализации люминесценции в инфракрасной области спектра под воздействием сине-зеленого света

Участки спектра люминесценции выделяются светофильтрами типа КС-19, ИКС-1, ИКС-2, ИКС-3, имеющими крутые фронты, отсекающие коротковолновую часть спектра. При этом следует иметь в виду уменьшение коэффициента пропускания светофильтров по мере увеличения длины волны, соответствующей границе раздела.

Спектральная чувствительность $W(\lambda)$ для стандартной ПЗС-матрицы ограничивает диапазон в ИК области спектра длиной волны порядка 1000–1100 нм. Для получения сдвига чувствительности в длинноволновую область спектра необходимо использовать специальные ПЗС-матрицы.

При небольшом поле зрения для возбуждения люминесценции весьма эффективно могут быть использованы источники света на светодиодах. Их достоинством является малая потребляемая мощность, высокая интенсивность свечения в узком спектральном диапазоне.

В настоящее время имеется широкий выбор светодиодов с различными длинами волн излучения как в видимой, так и в ближней ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра (от 375 до 970 нм). При использовании светодиодов отпадает необходимость в использовании в ИВЛ светофильтров $C_1(\lambda)$. Задача согласования спектральной мощности излучения $P(\lambda)$ со спектром поглощения исследуемого вещества в этом случае решается путем подбора светодиода с соответствующей длиной волны. Тем не менее светодиоды обладают дополнительными полосами излучения в инфракрасной области спектра и могут создавать паразитные засветки в области спектральной чувствительности фотоприемника.

Варианты спектральных характеристик для визуализации люминесценции в видимой области спектра при воздействии УФ-излучения и люминесценции в ИК области спектра при воздействии видимых лучей с использованием в ИВЛ светодиодов приведены на рис. 7.6, 7.7.

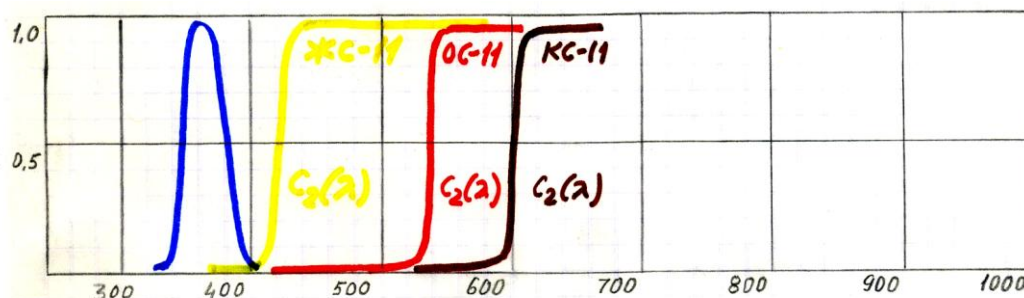


Рис. 7.6. Пример спектральных характеристик для визуализации люминесценции в видимой области спектра при использовании ультрафиолетового светодиода

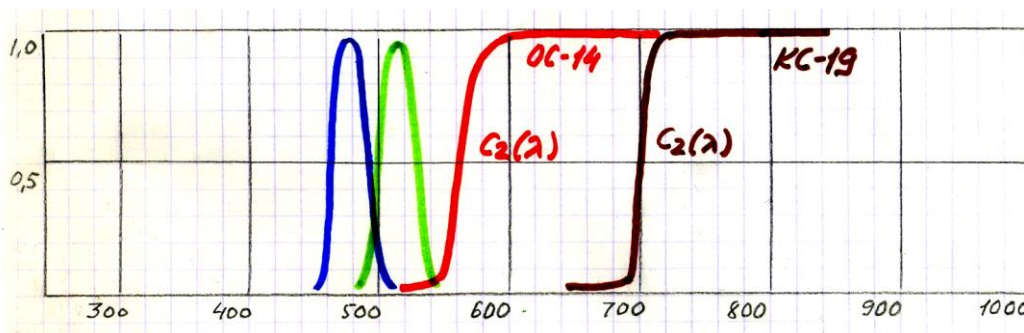


Рис. 7.7. Пример спектральных характеристик для визуализации люминесценции в красной и инфракрасной областях спектра при использовании в качестве ИВЛ светодиодов сине-зеленого диапазона

Телевизионная визуализация при импульсном возбуждении люминесценции

Принцип телевизионной визуализации при импульсном возбуждении люминесценции поясняется временными диаграммами на рис. 7.8. В данном режиме с привязкой к кадровым синхроимпульсам (КСИ) (диаграмма 1) формируется импульс запуска (диаграмма 2), который обеспечивает срабатывание импульсной лампы во время прямого хода кадровой развертки (диаграмма 3) и формирование потенциального рельефа от освещенной сцены в секции накопления матрицы ПЗС. Следующий за вспышкой телевизионный кадр является информационным (диаграмма 4) и должен быть зафиксирован в устройстве памяти (диаграмма 5).

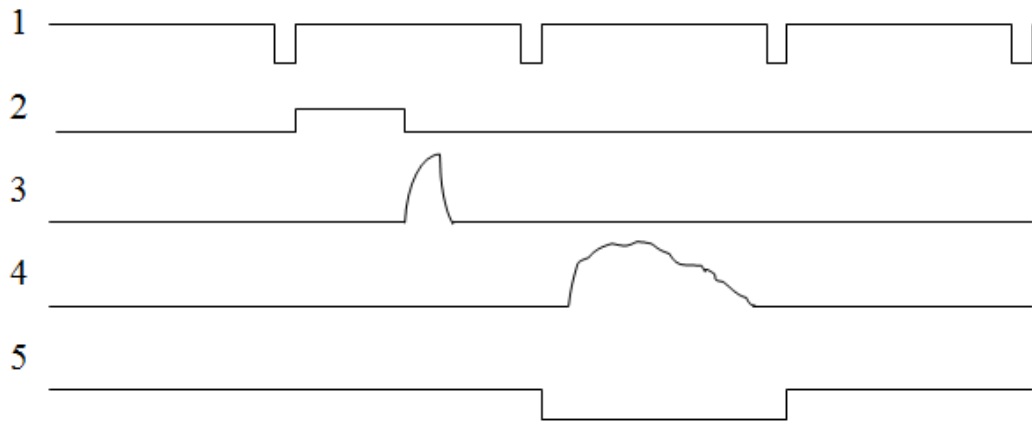


Рис. 7.8. Временные диаграммы процесса получения

информационного телевизионного кадра в импульсном режиме:

- 1 – кадровые синхроимпульсы (КСИ); 2 – импульс запуска; 3 – вспышка;
4 – информационный кадр; 5 – сигнал записи изображения в память

Несмотря на некоторые сложности в достижении синхронизации, описанный выше алгоритм может быть реализован путем управления импульсной лампой через COM-порт ЭВМ и записью изображения через стандартное устройство ввода изображений, в котором поддерживается режим аппаратного просмотра OVERLAY.

В этом случае импульс запуска вспышки можно привязать к моментам обновления изображения в видеобуфере ЭВМ и считать их «системными» кадрами, длительность которых зависит от параметров ЭВМ и устройства видеозаписи.

Для обеспечения устойчивого попадания момента вспышки в прямой ход кадровой развертки телевизионного датчика импульс запуска должен иметь регулируемую программную задержку.

При создании импульсных ИВЛ необходимо учитывать такие параметры импульсных ламп, как электрическая энергия вспышки, продолжительность вспышки, угол рассеяния света, вид источника питания и его напряжение [39]. Получаемая в ИВЛ световая энергия определяется как произведение среднего светового потока вспышки на ее длительность и пропорциональна электрической энергии заряда конденсатора $W = CU^2/2$, где W – энергия заряда, Дж; C – емкость конденсатора, Ф; U – напряжение, до которого заряжается конденсатор, В.

Изменяя емкость конденсатора C и напряжение заряда конденсатора U , можно регулировать энергию вспышки. В действительности конденсатор разряжается через импульсную лампу не полностью, и, следовательно, энергия вспышки получается несколько меньше, чем энергия заряда:

$$W = C \left(U_{\text{зак}}^2 - U_{\Gamma}^2 \right) / 2, \text{ где } U_{\Gamma} - \text{напряжение гашения (обычно 50–60 В).}$$

Время заряда накопительного конденсатора определяет готовность импульсной лампы к работе. При этом рабочее напряжение и емкость нако-

пительного конденсатора определяется фактором нагрузки $H = CU^4$, превышать который недопустимо. Во время вспышки выделяется не только световая энергия, но и тепловая, что приводит к нагреву импульсной лампы. Поэтому, исходя из средней допустимой мощности рассеяния лампы, устанавливают допустимый период следования вспышек: $t = W/P_{\text{ср}}$, где W – энергия заряда, Дж; $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность, Вт.

Повторение импульсной засветки с фиксацией получаемых телевизионных кадров со случайным распределением шумов и их последующее усреднение необходимо для реализации принципа цифрового накопления с целью повышения отношения сигнал/шум. Эффективность импульсного метода иллюстрируется на рис. 7.9.

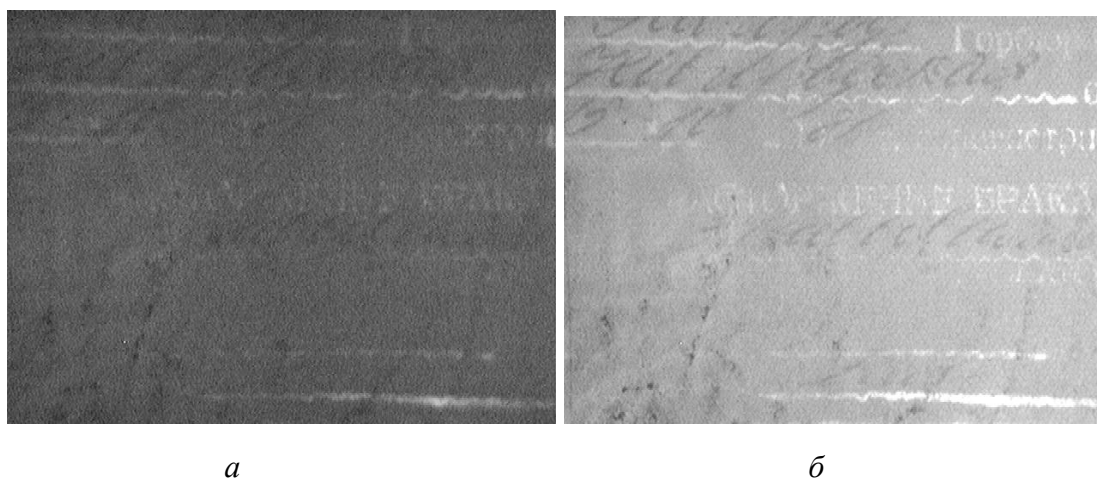


Рис. 7.9. Изображение инфракрасной люминесценции
штемпельной краски в паспорте:
а – при непрерывной засветке; *б* – при импульсной засветке

Оптимизация системы телевизионной визуализации люминесцирующих объектов методом компьютерного моделирования

Визуализация люминесценции объектов является одной из задач, решаемых при помощи телевизионных систем. При проектировании таких систем необходимо осуществлять оптимальный выбор источника возбуждения люминесценции (ИВЛ) и приемника люминесценции (ПЛ), согласуя их параметры с люминесцентными свойствами объекта, с целью получения изображения с максимально возможным контрастом объекта по отношению к фону.

Для принятия решения необходим критерий качества системы. Критерием является контрастность получаемого изображения люминесцирующего объекта по отношению к фону. Действительно, глаз реагирует на относительный контраст в изображении, а гистограмма распределения яр-

костей изображения люминесцирующего объекта имеет два четко выраженных максимума, соответствующих люминесцирующему объекту и фону. Задачей моделирования является оценка получаемого контраста изображений в предварительно выбранных вариантах построения системы для нахождения наилучшего из них. В связи с этим рассмотрим математическую модель, лежащую в основе метода моделирования.

В реальной телевизионной системе из-за возможной собственной люминесценции фона и неидеальности спектральных характеристик ее компонентов имеется фоновая составляющая $i_{\text{ф.с}} = i_{\text{ф}} + i_1 + i_2$, где $i_{\text{ф}}$ – сигнал от люминесцирующего фона, i_1 – сигнал от паразитной засветки ПЛ в области спектра люминесценции, i_2 – сигнал от паразитной засветки ПЛ в области спектра поглощения. Для фототока ПЛ $i = i_0 + i_{\text{ф.с}}$, где i_0 – полезный сигнал от объекта, может быть записано выражение, аналогичное выражению для относительного оптического контраста: $K = \frac{i_0 - i_{\text{ф.с}}}{i_0}$.

Появление сигналов от паразитных засветок иллюстрируется на рис. 7.10, где изображена результирующая характеристика ИВЛ – $W(\lambda)$, определяемая источником света (ИС) с мощностью $P(\lambda)$ и светофильтром $C1(\lambda)$ и согласованная со спектром поглощения, а также результирующая характеристика ПЛ – $E(\lambda)$, определяемая фотоприемником (ФП) с чувствительностью $G(\lambda)$ и светофильтром $C2(\lambda)$ и согласованная со спектром люминесценции исследуемого объекта.

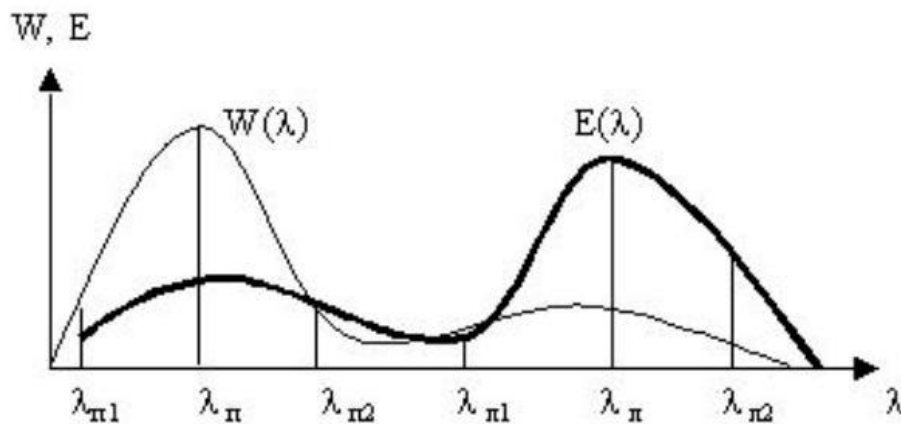


Рис. 7.10. Спектральные характеристики реальных ИВЛ и ПЛ:

$\lambda_{\text{п1}}, \lambda_{\text{п2}}$ – границы диапазона длин волн, соответствующие спектру поглощения;
 $\lambda_{\text{л1}}, \lambda_{\text{л2}}$ – границы диапазона длин волн, соответствующие спектру люминесценции

Все перечисленные компоненты системы приведены на рис. 7.11.

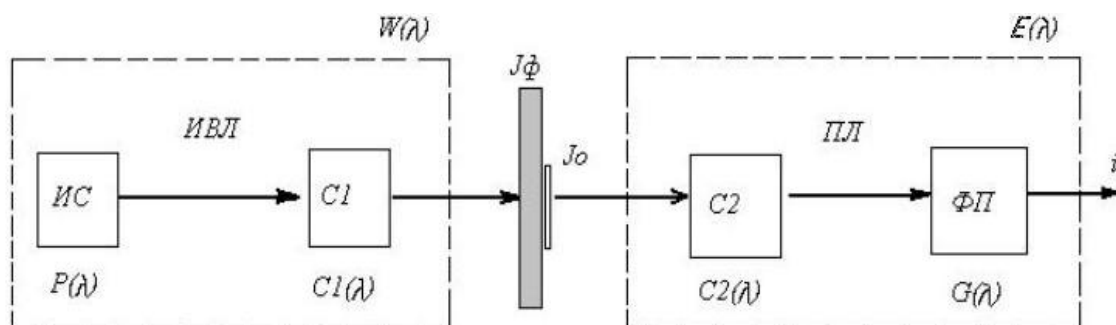


Рис. 7.11. Структурная схема системы телевизионной визуализации люминесценции, содержащая основные компоненты, описываемые математическими выражениями:

ИС – источник света с мощностью $P(\lambda)$;

ФП – фотоприемник со спектральной чувствительностью $G(\lambda)$;

C1 и *C2* – светофильтры с коэффициентами пропускания $C1(\lambda)$ и $C2(\lambda)$;

J_0 и J_ϕ – интенсивность свечения объекта и фона; i – выходной сигнал (фототок)

Компоненты фототока определяются в общем случае выражением $i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) J(\lambda) d\lambda$, где $J(\lambda) = AW(\lambda)$ – общая интенсивность свечения исследуемого поля зрения, A – коэффициент, характеризующий люминесцентные свойства вещества, $[\lambda_1; \lambda_2]$ – участок спектрального диапазона.

Переходя к средним значениям мощности ИВЛ и чувствительности ПЛ в областях спектров поглощения и люминесценции, можно получить выражение для определения контрастности изображения, в котором отражены все основные компоненты системы:

$$K = 1 - \frac{P_{\text{ср.л}} C_{1\text{л}}}{P_{\text{ср.п}} C_{1\text{п}}} - \frac{G_{\text{ср.п}} C_{2\text{п}}}{G_{\text{ср.л}} C_{2\text{л}}} - \frac{A_\phi S_\phi}{A_0 S_0}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ср.л}}$, $P_{\text{ср.п}}$ – средняя мощность источника света в ИВЛ, соответственно в области спектра люминесценции и в области спектра поглощения;

$G_{\text{ср.л}}$, $G_{\text{ср.п}}$ – средняя чувствительность фотоприемника в ПЛ, соответственно в области спектра люминесценции и в области спектра поглощения;

A_0 , A_ϕ – коэффициенты, характеризующие люминесцентные свойства объекта и фона;

S_0 , S_ϕ – площадь объекта и фона;

$$C_{1\text{л}} = \int_{\lambda_{\text{л1}}}^{\lambda_{\text{л2}}} C_1(\lambda) d\lambda, \quad C_{1\text{п}} = \int_{\lambda_{\text{п1}}}^{\lambda_{\text{п2}}} C_1(\lambda) d\lambda, \quad C_{2\text{л}} = \int_{\lambda_{\text{л1}}}^{\lambda_{\text{л2}}} C_2(\lambda) d\lambda, \quad C_{2\text{п}} = \int_{\lambda_{\text{п1}}}^{\lambda_{\text{п2}}} C_2(\lambda) d\lambda.$$

Выражение (1) может рассматриваться как целевая функция, которую следует максимизировать в условиях действующих ограничений. Таким образом, задачу оптимизации можно свести и к классической задаче

линейного программирования о поиске оптимального решения в системе с ограниченными ресурсами.

Однако для инженерной практики более удобно компьютерное моделирование предварительно выбранных вариантов систем с целью оценки их качества – контрастности получаемых изображений.

Принимая во внимание выражение для интегральной чувствительности фотоприемника $G = \frac{i}{\Phi}$ как фототок насыщения i , рассчитанный на

один люмен светового потока Φ , и выделяя в световом потоке составляющие $\Phi = \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_\phi$, причем $\Phi_0 \sim A_0 P_{\text{ср}}$, $\Phi_1 \sim A_1 P_{\text{ср}}$, $\Phi_2 \sim A_2 P_{\text{ср}}$, $\Phi_\phi \sim A_\phi P_{\text{ср}}$, где $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность ИВЛ, A_0 и A_ϕ – коэффициенты, характеризующие люминесцентные свойства объекта и фона, A_1 и A_2 – коэффициенты, характеризующие энергетические свойства паразитных световых потоков и определяемые коэффициентами пропускания $C_1(\lambda)$ и $C_2(\lambda)$, можно записать выражение, удобное для определения пороговых ограничений:

$$P_{\text{ср}} G = \frac{i}{A_0 + A_\phi + A_1 + A_2}.$$

Действительно, из выражения следует, что для

объекта с заданными люминесцентными свойствами A_0 в системе существует множество пар ИВЛ – ПЛ для получения одинакового фототока (а значит и контраста по отношению к фону).

При этом в идеальной системе, для которой $A_\phi = A_1 = A_2 = 0$, пороговые ограничения отсутствуют, и для визуализации более слабой люминесценции при том же фототоке (т.е. при том же контрасте) можно неограниченно увеличивать как мощность источника, так и чувствительность фотоприемника.

В реальной системе, как видно из выражения, существует пороговое ограничение $\Pi = \frac{A_\phi + A_1 + A_2}{A_0} < 1$, при превышении которого бесполезно

увеличивать как мощность источника, так и чувствительность фотоприемника, потому что в этом случае в фототоке фоновая составляющая будет превышать полезную составляющую, несущую информацию об объекте.

Таким образом, в подпороговой области существует множество оптимальных пар ИВЛ – ПЛ, для которых $P_{\text{ср}} G = \text{const}$, обеспечивающих визуализацию объекта с заданным контрастом. При этом возможно увеличение чувствительности ПЛ и мощности ИВЛ для повышения контраста визуализируемого объекта с $A < A_0$.

При использовании метода компьютерного моделирования в ЭВМ вводят известные значения спектральных характеристик компонентов системы, параметров сюжета и в зависимости от решаемой задачи вычисляют значения получаемого относительного контраста с целью выбора наилучшего варианта системы, определяют пороговые ограничения или находят

требуемую для достижения заданного контраста спектральную характеристику исследуемого компонента.

На рис. 7.12 приведен пример результатов компьютерного моделирования при оценке вариантов системы визуализации люминесценции в видимой области спектра под воздействием ультрафиолетовых лучей, построенной с использованием стандартных, практически применяемых компонентов.



В а р и а н т 1



В а р и а н т 2

Рис. 7.12. Результаты моделирования вариантов системы

Как видно из рис. 7.12, количественная оценка контрастности получаемых изображений показывает, что в варианте 2 системы достигается значительно более высокая контрастность изображения люминесцирующего объекта ($K = 0,693$) за счет уменьшения влияния фоновых составляю-

щих, что соответствует предварительной качественной оценке путем совмещения результирующих спектральных характеристик.

Метод позволяет не только оценить получаемый в системе контраст изображения, но и решать обратные задачи. Например, с его помощью можно оценить требования к отдельным компонентам системы для достижения заданного контраста [37].

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип телевизионной визуализации фотолюминесценции?
2. В чем состоит специфика телевизионной визуализации при импульсном возбуждении люминесценции?
3. Каким образом могут быть сформулированы задачи оптимизации системы телевизионной визуализации фотолюминесценции?
4. В чем заключаются достоинства метода компьютерного моделирования системы телевизионной визуализации фотолюминесценции?

Глава 8

ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Необходимость усиления борьбы с правонарушениями требует повышения эффективности технических средств, предназначенных для проведения судебно-медицинских и криминалистических экспертиз, связанных с получением и анализом изображений вещественных доказательств. Для таких исследований выявление практически невидимых невооруженным глазом следов в ряде случаев предопределяет получение вещественных доказательств совершенного преступления [38].

Традиционно применяющийся для решения данной проблемы фотографический метод не обеспечивает оперативности получения результата. Замена фотографического метода визуализации телевизионным методом позволяет повысить как чувствительность и оперативность, так и объективность исследований.

В настоящее время для криминалистических исследований документов и других вещественных доказательств широко используются телевизионные системы, в которых интегрированы источники света различных спектральных диапазонов, светофильтры для выделения тех или иных участков спектра, а также телевизионная камера с повышенным разрешением и чувствительностью, как правило снабженная вариообъективом. Данные системы получили название телевизионных спектральных систем (ТСС), а в зарубежной литературе в этой связи используется название «видеоспектральные компараторы» (в английской аббревиатуре – VSC) [40–44].

ТСС обеспечивают обнаружение в документах подчисток, дописок, исправлений, установление способа нанесения оттисков печатей и штампов, выявление следов травления, элементов защиты, залитых, зачеркнутых или выцветших текстов, записей, образованных вдавленными штрихами, выявление структуры материала документа, следов сажи и остатков минеральных масел, следов крови и других биологических жидкостей.

ТСС позволяют проводить исследования в отраженных и проходящих лучах ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов, а также визуализировать люминесценцию в видимой области спектра под воздействием УФ-лучей и в ИК области спектра под воздействием видимых лучей. Цветные ТСС, дополнительно к возможностям черно-белых ТСС, дают возможность получения цветных изображений объектов, исследуемых в видимой области спектра при прямом и косо падающем освещении, а также при люминесценции под воздействием УФ-лучей.

Принцип построения ТСС характеризуется структурной схемой (рис. 8.1), в которой спектрозональное наблюдение может быть реализовано либо подсветкой объекта источником света с широким спектром (например, без использования С1) и установкой перед фотоприемником светофильтра из набора С2, выделяющего необходимый участок спектрального диапазона,

либо подсветкой объекта в выбранном спектральном диапазоне при помощи светофильтра из набора С1 без установки С2.

При визуализации люминесценции необходимо использовать оба набора светофильтров, причем С1 согласуется со спектром поглощения исследуемого объекта, а С2 – со спектром его люминесценции.

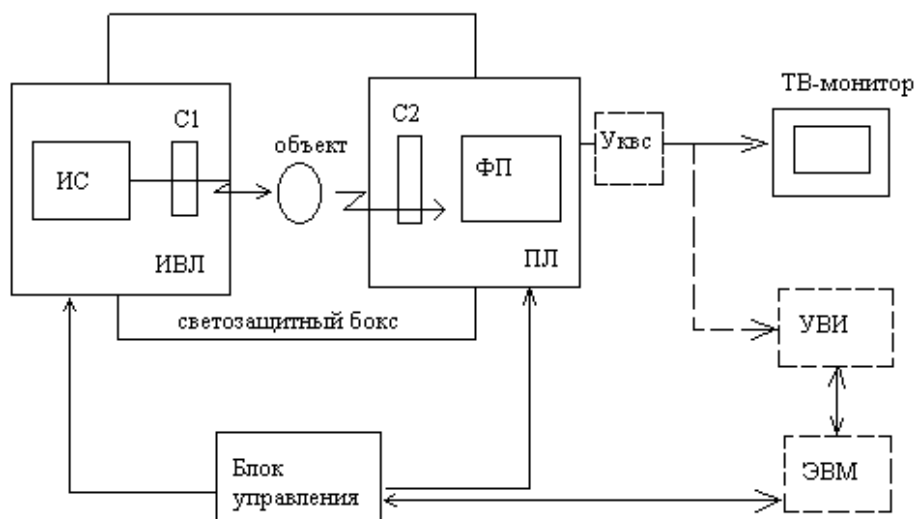


Рис. 8.1. Обобщенная структурная схема ТСС:

С1 и С2 – наборы светофильтров; ИС – набор источников света;
 ФП – фотоприемник; ИВЛ – источник возбуждения люминесценции;
 ПЛ – приемник люминесценции; УКВС – узел коррекции видеосигнала;
 УВИ – устройство ввода изображений

Назначение УКВС – аналоговая яркостная коррекция видеосигнала. В качестве УВИ обычно используется стандартное устройство видеозаписи, подключаемое к ЭВМ для оцифровки и ввода изображения.

В настоящее время можно условно выделить два модельных ряда ТСС, отличающихся друг от друга назначением и, соответственно, уровнем сложности. Примером массовых систем, предназначенных для экспресс-анализа, например, на контрольных постах ГИБДД, являются система ТСС-3М-1 и малогабаритная переносная ТСС «Криминалист-2». Последняя может быть использована для работы на месте происшествия, так как имеется возможность ее питания от аккумулятора.

Эти ТСС отличает наибольшая простота в эксплуатации, отсутствие регулировок, возможность быстрого последовательного переключения режимов, предусматривающих типовые приемы и методики контроля документов: контроль в видимом, ИК-, УФ-свете, проверка люминесценции защитных зон, а также водяных знаков и совмещающихся элементов на просвет. Такого рода экспресс-анализ не требует специальной подготовки в области криминалистики.

При выявлении признаков нарушений в документе более детальная экспертиза может проводиться в лаборатории, оснащенной системой «Радуга», имеющей расширенный набор светофильтров, повышенные энергетические

характеристики источников возбуждения люминесценции, увеличенный размер поля зрения.

Телевизионная спектральная система ТСС-3М-1

В состав системы (рис. 8.2) входят анализатор и черно-белый или цветной монитор с диагональю экрана 9 или 12". ТСС-3М-1 имеет следующие технические характеристики: спектральная чувствительность 365–1000 нм, разрешающая способность 375 т.л., размер контролируемого поля 32×42 мм, размер контролируемого документа 297×210 мм, напряжение питания 220 В, габаритные размеры анализатора $231 \times 248 \times 260$ мм, масса анализатора 7 кг.

В системе используется ИВЛ с относительно небольшой мощностью, что связано с тепловыми ограничениями малогабаритного корпуса, – 2×4 Вт для ИВЛ УФ-диапазона и 2×20 Вт для ИВЛ видимого диапазона. Фотоприемник ТСС-3М-1 имеет стандартную для ПЗС-матрицы чувствительность.

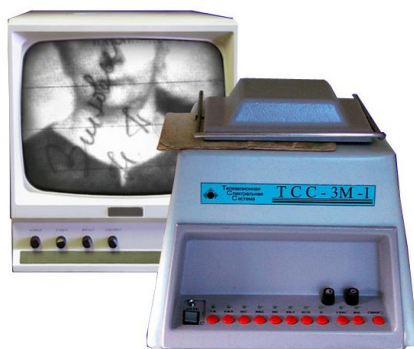


Рис. 8.2. Внешний вид ТСС-3М-1

Исследуемый документ устанавливается на предметную плоскость с прозрачным окном и прижимается откидным прижимом со встроенным источником проходящего света, который одновременно защищает исследуемый документ от посторонних засветок. В ТСС-3М-1 обеспечивается фиксированная наводка на резкость в предметной плоскости.

Исследуемый документ освещается через прозрачное окно ультрафиолетовым, видимым или инфракрасным светом в зависимости от выбранного режима работы.

При анализе люминесценции в ТСС одновременно с включением источника света со светофильтром, соответствующим спектру поглощения исследуемого объекта, автоматически обеспечивается ввод перед фотоприемником светофильтра, выделяющего спектр люминесценции.

В ИВЛ имеется УФ источник света со светофильтром УФС-5 и источник сине-зеленого света со светофильтром СЗС-21.

Набор светофильтров в ТСС состоит из двух светофильтров: типа ЖС-11 для выделения люминесценции в видимой области спектра под воздействием ультрафиолетового света и типа КС-19 для выделения инфракрасной люминесценции под воздействием сине-зеленого света.

Телевизионная спектральная система «Криминалист-2»

Отличительной особенностью ТСС «Криминалист-2» (см. рис. 8.3) (по сравнению со стационарными ТСС-3М-1) является возможность использования непосредственно на месте происшествия, что обеспечивается малыми габаритами и массой аппаратуры, а также возможностью работы от аккумулятора или сетевого источника питания с напряжением 12 В.



Рис. 8.3. ТСС «Криминалист-2»

При работе на месте происшествия имеется возможность записи наблюдаемых изображений в память пульта оператора или «ноутбука», что позволяет в дальнейшем производить их просмотр, обработку, документирование. ТСС позволяет исследовать как плоские, так и объемные объекты, имеет двукратное оптическое масштабирование изображения, широкую номенклатуру источников света (светодиодов) для спектрально-аналитических исследований, возможность отображения дополнительной информации о режиме работы (режиме освещения и наблюдения).

Телевизионная спектральная система «Радуга-2»

Особенностями системы «Радуга-2» (рис. 8.4) являются: повышенная мощность ИВЛ непрерывного типа УФ-диапазона с длинами волн 254 и 365 нм, наличие импульсных ИВЛ большой мощности видимого и УФ-диапазона для выявления слабо люминесцирующих объектов, возможность изменения спектра импульсного ИВЛ видимого диапазона путем замены светофильтров из комплекта принадлежностей, повышенная чувствительность фотоприемника, возможность ввода и дополнительной обработки изображений в ЭВМ (устранение шумов за счет накопления изображений, яркостная коррекция), плавное изменение масштаба изображения (6-, 10- или 16-кратный вариообъектив), значительно увеличенные размеры поля зрения, большие размеры и оригинальная конструкция светозащитного бокса, позволяющая

исследовать объемные объекты и документы, подшитые папки, наличие выполненных в виде линеек 20 светофильтров, выделяющих отдельные участки спектра в диапазоне от 400 до 1000 нм, для проведения спектральных исследований объектов.

Основные технические характеристики системы следующие: спектральный диапазон 254–1000 нм, разрешающая способность 500 т.л., размер исследуемого поля зрения от 112×148 мм до 21×28 мм, напряжение питания 220 В, габаритные размеры анализатора $550 \times 260 \times 410$ мм, масса анализатора 5 кг. Особенностью конструкции ТСС «Радуга-2» является наличие увеличенного светозащитного бокса, более мощных непрерывных ИВЛ УФ-диапазона (2×15 Вт для 254 и 365 нм), а также импульсных ИВЛ для обнаружения слабо люминесцирующих объектов в видимой и ИФ областях спектра.



Рис. 8.4. Телевизионная спектральная система «Радуга-2»

Кроме этого, ТСС «Радуга» имеет дополнительный комбинированный ИВЛ на светодиодах, с помощью которого в светозащитном боксе можно подсветить объект светом с длиной волны 470, 567, 590, 615, 626 или 655 нм в поле с диаметром около 30 мм.

В ТСС использован моторизованный вариообъектив COMPUTAR с управляемой фокусировкой, диафрагмой и масштабированием 6, 10 или $\times 16$. С помощью узла ввода светофильтров в задний рабочий отрезок объектива вводятся светофильтры из дискретного набора (линейки) цветных оптических стекол. В качестве фотоприемника используется телевизионная камера с повышенной чувствительностью черно-белого или цветного изображения. Камера цветного изображения адаптируется для работы в широком диапазоне спектра от длинноволновой УФ области спектра (380 нм) до ближней ИК области спектра (1000 нм).

В ТСС применен узел коррекции видеосигнала (УКВС), который позволяет увеличить контраст получаемого изображения за счет дополнительной фиксации уровня черного и усиления видеосигнала. Программное обеспечение системы позволяет производить эффективное подавление шумов в изображении за счет межкадровой обработки – цифрового накопления.

Приборы дооснащения ТСС. Телевизионные лупы

Максимальный размер изображений, получаемых с помощью ТСС, обычно достигает размера документа формата А4, а минимальный – определяется кратностью масштабирования вариообъектива ($\times 10\text{--}16$). Такой масштаб изображения является недостаточным для выявления структуры основы документа, микротекстов, вида типографского исполнения и ряда других необходимых исследований при их экспертизе.

Расширение функциональных возможностей телевизионных спектральных систем достигается за счет приборов их дооснащения, к которым, в частности, относятся телевизионные лупы (далее – ТЛ) различного назначения. ТЛ незаменимы при проведении криминалистических экспертиз документов и иных вещественных доказательств, обеспечивают визуализацию в различных участках видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра фрагментов с минимальными размерами от 3×4 мм, что соответствует (примерно) увеличению $\times 60$ при выводе на монитор с размерами экрана 12".

ТЛ представляют собой малогабаритные устройства, выполненные конструктивно в виде манипулятора типа «мышь». Исследование документа производится путем непосредственного перемещения телевизионной лупы по его поверхности. ТЛ имеет фиксированную наводку на резкость в плоскости документа, а также переключатели режимов работы. Номенклатурный ряд ТЛ определяется конкретными решаемыми задачами криминалистических исследований:

1. Цветная ТЛ с режимом прямого или косо падающего освещения поверхности документа.
2. Черно-белая ТЛ с режимом прямого или косо падающего освещения поверхности документа в красной и зеленой областях спектра.
3. ТЛ для спектрально-аналитических исследований в видимой и ИК областях спектра с возможностью обнаружения ИК-люминесценции.
4. Цветная ТЛ с режимом прямого или косо падающего освещения поверхности документа и возможностью визуализации цветной люминесценции под воздействием УФ-света.
5. ТЛ для исследования документов в ИК области спектра с возможностью визуализации антистоксовой (АС) люминесценции.
6. Черно-белая ТЛ с режимом прямого или косо падающего освещения поверхности в красной и зеленой областях спектра и оптическим масштабированием.

На рис. 8.5 приведен пример ТЛ для исследования фрагментов изображений ИК-люминесценции. Визуализация ИК-люминесценции осуществляется при освещении объекта голубыми светодиодами и введении перед черно-белой телевизионной камерой (1) светофильтра типа КС-19 с помощью узла (2). Дополнительно к режиму исследования ИК-люминесценции ТЛ

имеет следующие режимы работы: широкий спектр, создаваемый путем смешивания голубого (470 нм), зеленого (567 нм) и желтого (590 нм) цветов, вертикальный свет в голубой (470 нм), зеленой (567 нм), желтой (590 нм), красной (655 нм) и ИК (810 нм) областях спектра, а также косо падающий свет в зеленой области спектра (567 нм).

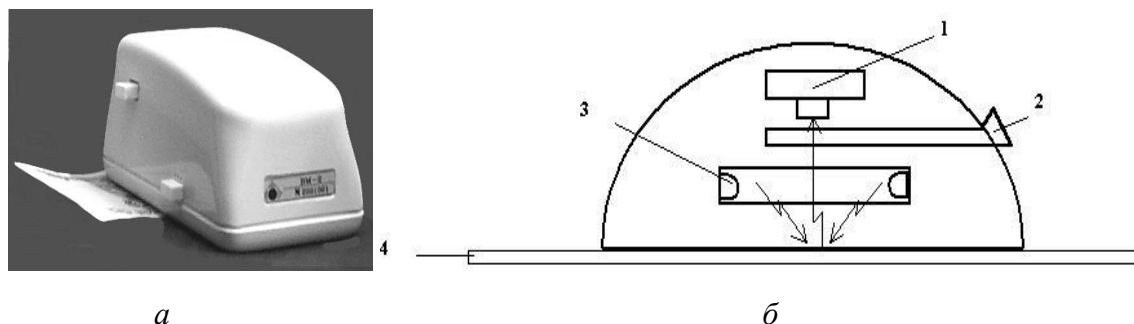


Рис. 8.5. Внешний вид (а) и конструктивная схема (б) ТЛ для визуализации ИК-люминесценции:

1 – телевизионная камера; 2 – узел ввода светофильтра;
3 – комбинированный источник света на светодиодах; 4 – исследуемая поверхность

На рис. 8.6 приведены изображения, получаемые при помощи ТЛ различного назначения.

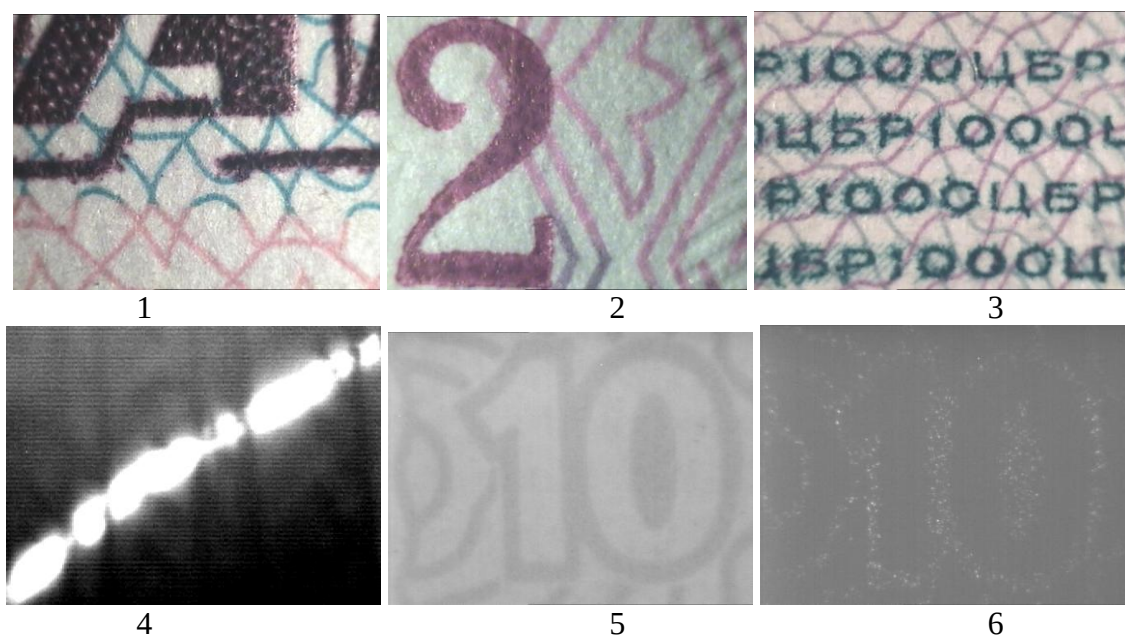


Рис. 8.6. Визуализация при помощи телевизионных луп:

1 – текста, выполненного с использованием металлографии;
2 – текста, выполненного методом высокой печати; 3 – микротекста;
4 – ИК-люминесценции защитного волокна;
5 – фрагмента документа в видимой области спектра;
6 – антистоксовой люминесценции фрагмента документа в видимой области спектра

Для визуализации антистоксовой люминесценции в видимой области спектра применяется источник света на инфракрасных светодиодах с длиной волны 940 нм и черно-белая телевизионная камера с повышенной чувствительностью. Перед камерой вводится светофильтр, выделяющий видимую область спектра, типа СЗС-21.

Аппаратно-программные комплексы

Примером аппаратно-программного комплекса (АПК) в минимальной комплектации, предназначенного для экспресс-анализа документов и иных вещественных доказательств на стационарных постах ДПС, контрольно-пропускных пунктах и т.п., является АПК на базе телевизионной спектральной системы ТСС-3М. В состав АПК в минимальной комплектации дополнительно к ТСС входит телевизионная лупа ВМ-1, стандартное устройство видеозаписи (плата ввода изображений, подключаемая к ЭВМ) и специализированное программное обеспечение (рис. 8.7).

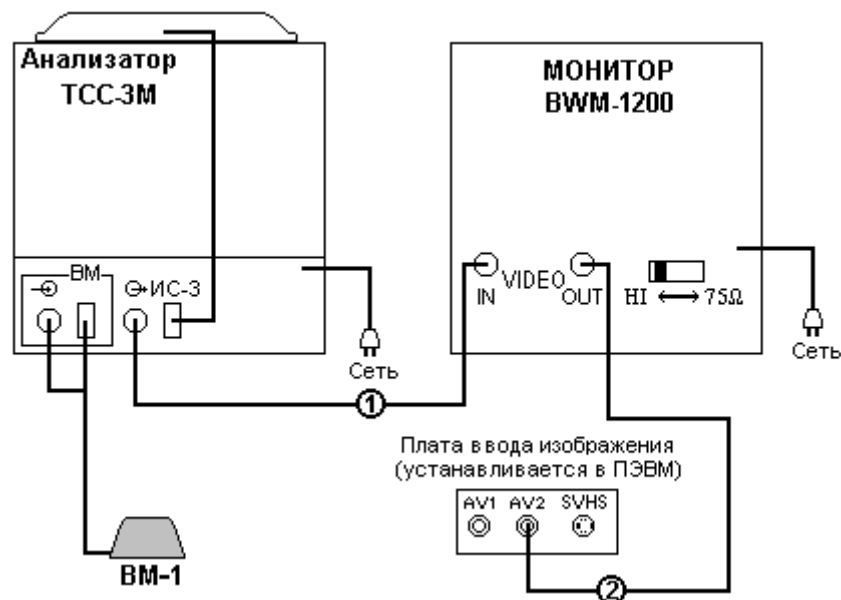


Рис. 8.7. АПК на базе ТСС-3М в минимальной комплектации

Примером АПК в расширенной комплектации, предназначенного для углубленных криминалистических исследований в специализированных центрах и лабораториях, является комплекс на базе ТСС «Радуга» (рис. 8.8–8.9).

В состав АПК в расширенной комплектации дополнительно к ТСС входит телевизионная камера, устанавливаемая на стандартный микроскоп, телевизионная лупа ВМ-1, макропроектор, коммутатор видеосигналов, выход которого подключается к стандартному устройству видеозаписи. Кроме этого, в АПК решается задача управления от ЭВМ импульсным источником света при визуализации слабо люминесцирующих объектов

как в режиме одиночного экспонирования, так и в режиме накопления серии кадров изображения.



Рис. 8.8. Внешний вид АПК на базе ТСС «Радуга» в расширенной комплектации

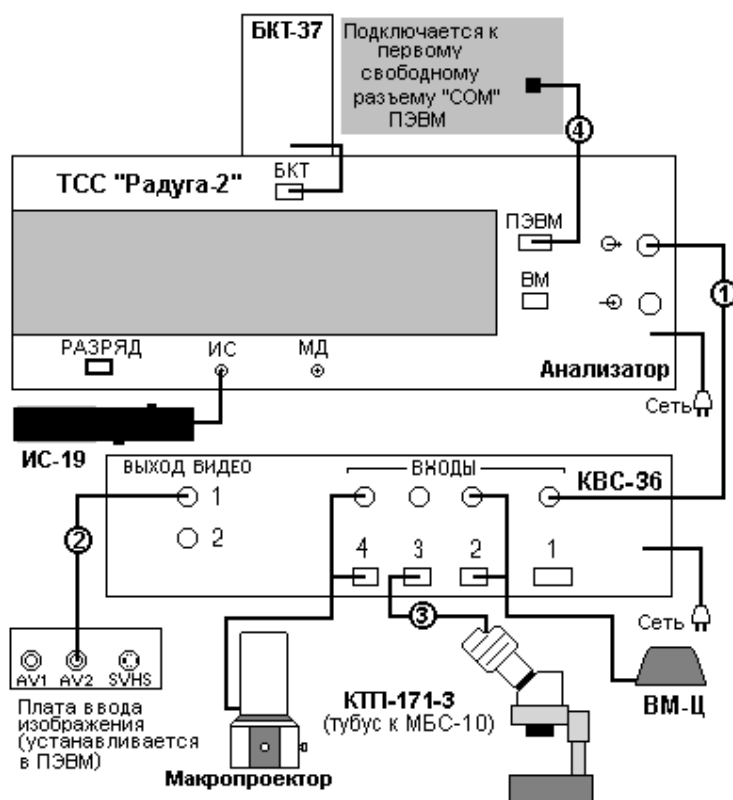


Рис. 8.9. Структурная схема АПК на базе ТСС «Радуга»

Мобильный АПК на базе ТСС «Криминалист-2» (рис. 8.10), предназначенный для проведения криминалистических экспертиз непосредственно на месте происшествия, отличаются малые габариты и масса, возможность питания от аккумулятора с напряжением 12 В, наличие встроенного микроконтроллера, позволяющего управлять режимами работы комплекса как автономно, так и от ПЭВМ.

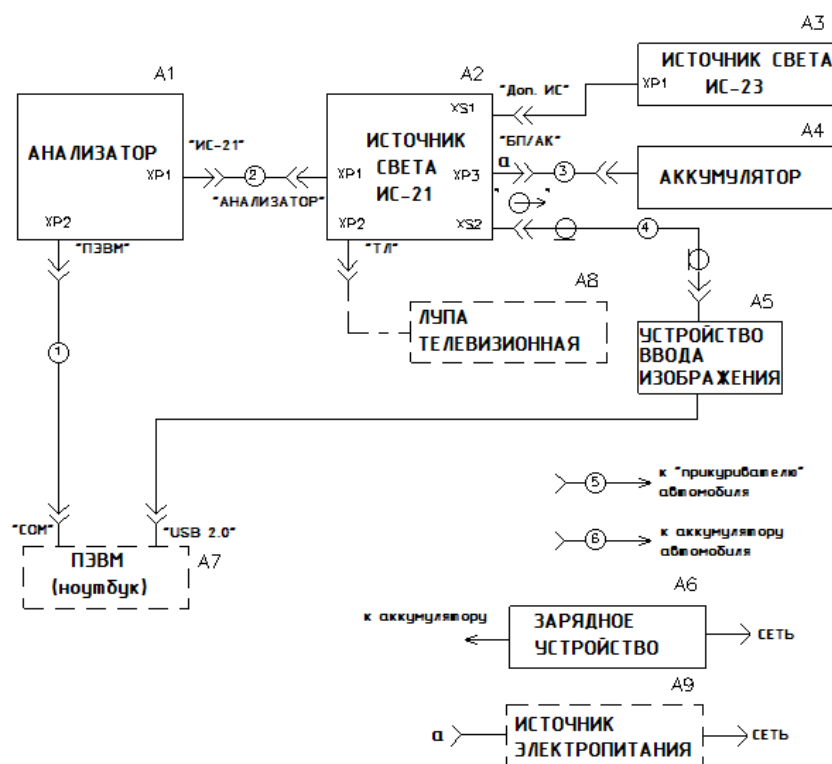


Рис. 8.10. Мобильный АПК на базе ТСС «Криминалист-2»

Основные этапы и тенденции развития данного вида аппаратуры

Этап 1. 1988–1993 гг. – создание первой телевизионной спектральной системы ТСС-1 и модификаций на ее базе.

Отличительные особенности аппаратуры этапа 1:

1. ТВ-камеры на базе видеоконов.
2. Ртутные лампы высокого давления для возбуждения люминесценции.
3. Стандартные светофильтры 40×40 и 80×80 мм.
4. Стационарный вариант исполнения.
5. Импортозамещающая техника по отношению к зарубежному аналогу VSC-1 («F&F», Великобритания). Отечественный аналог: ВСК-1 (НПО «Спектр», Москва).

Этап 2. 1993–2003 гг. – создание номенклатуры телевизионных спектральных систем (ТСС-2, ТСС-3, ТСС-2М, ТСС-3М, ТСС-3Ц, ТСС «Эксперт», ТСС «Эксперт-Ц», ТСС «Радуга»), а также приборов дооснащения к ним и аппаратно-программных комплексов на их базе (УСИ-7, УСИ-9, ВМ-1, ВМ-2, макропроектор, КВС-26, ТСМ-1, ТМ-1, ТМ-2, КТП-171, КТП-171-1, КТП-171-2, КТП-171-3, УВВИ, программное обеспечение TSS-32 и TSS-32GS).

Отличительные особенности аппаратуры этапа 2:

1. ТВ-камеры на ПЗС.
2. Люминесцентные лампы для возбуждения УФ-люминесценции.

3. Малогабаритные галогенные лампы для возбуждения ИК-люминесценции.

4. Дополнительные источники света на светодиодах.

5. Уменьшение массы и габаритов, возможность переноса аппаратуры.

6. Специализация систем (для экспресс-анализа и углубленных криминалистических исследований).

7. Аппаратно-программные комплексы и автоматизированные рабочие места экспертов-криминалистов.

8. Импортозамещающая техника по отношению к зарубежным аналогам VSC-1, VSC-4 («F&F», Великобритания), DVC-1 («CES», Германия), Docubox, Docuzenter («Projectina», Швейцария). Отечественные аналоги: ВСК-1 (НПО «Спектр», Москва), Эксперт-К («ЭВС», Санкт-Петербург).

Этап 3. 2004–2008 гг. – совершенствование приборов и систем. (ТСС-3М-1, ТСС «Радуга-2», ТСС «Криминалист-2», ТЛ-2, программное обеспечение «Videomix», «Радуга», «Криминалист-2»).

Отличительные особенности аппаратуры этапа 3:

1. ТВ-камеры на базе ПЗС повышенной чувствительности и разрешающей способности.

2. Широкое применение светодиодов в качестве источников освещения как в видимом, так и в УФ и ИК диапазонах спектра.

3. Наличие встроенного микропроцессора и программного управления источниками света на светодиодах (ТСС «Криминалист-2»).

4. Программно управляемые источники света на базе импульсных ламп повышенной мощности (ТСС «Радуга-2»).

5. Применение вариофокальной оптики.

6. Малые габариты и масса. Возможность использования при выезде на место происшествия (ТСС «Криминалист-2»).

7. Импортозамещающая техника по отношению к зарубежным аналогам VSC-2000, VSC-5000 («F&F», Великобритания), Docuzenter-500S («Projectina», Швейцария), ED-1100 («Regula», Беларусь). Отечественные аналоги: ВСК-1 (НПО «Спектр», Москва), Эксперт-К («ЭВС», Санкт-Петербург), VC-20.1 (ЗАО «Вилдис», Москва).

Анализ этапов развития, а также изучение зарубежных и отечественных аналогов позволяют выделить такие основные тенденции совершенствования аппаратуры для криминалистических исследований, как повышение разрешающей способности, чувствительности, избирательности и интеллектуализация оборудования.

Недостаточно высокая разрешающая способность, контрастная чувствительность и спектральная избирательность существующей аппаратуры в ряде практических случаев существенно сказывается на достоверности результатов криминалистических исследований, а ручное управление аппаратурой ограничивает их производительность и объективность.

Повышение разрешающей способности связано с использованием новых твердотельных преобразователей «свет – сигнал», в частности КМОП-матриц, и обеспечивает возможность обнаружения мелких деталей в исследуемых изображениях.

Повышение контрастной чувствительности обеспечивает возможность обнаружения малоконтрастных объектов в исследуемых изображениях и связано с использованием:

- 1) преобразователей «свет – сигнал» с повышенной чувствительностью;
- 2) источников света с повышенной мощностью и светоотдачей;
- 3) усреднения кадров изображения за время наблюдения, которое может составлять десятки секунд.

Повышение избирательности в оптическом диапазоне обеспечивает возможность обнаружения различий в объектах с близкими спектрами поглощения и люминесценции и связано с увеличением:

- 1) числа диапазонов спектральной чувствительности фотоприемника за счет дополнительных светофильтров;
- 2) числа спектральных диапазонов источников света за счет дополнительных источников как для видимой, так и для УФ и ИК областей спектра.

Интеллектуализация оборудования связана с использованием микропроцессоров и управлением режимами работы аппаратуры от ЭВМ и обеспечивает:

- 1) повышение производительности и объективности работы эксперта (проведение исследований в автоматическом режиме по заданной программе);
- 2) воспроизводимость результатов при повторении исследований (режимы, масштаб, диафрагма, настройки и т.д.);
- 3) расширение функциональных возможностей при получении и обработке изображений исследуемых объектов (синтез цветного изображения из спектральных, синтез изображений с увеличенной глубиной резкости и т.п.).

Развитие телевизионных средств визуализации для криминалистических исследований идет в направлении создания автоматизированных рабочих мест экспертов-криминалистов. Интеграция средств вычислительной техники и телевизионных систем позволяет поднять на качественно новый уровень техническое оснащение криминалистических лабораторий и обеспечить оперативное получение изображений, их обработку, включая количественный анализ, хранение, документирование, передачу по каналам связи и др.

Контрольные вопросы

1. Какие основные задачи решаются при помощи телевизионных спектральных систем?
2. Каковы основные технические характеристики телевизионных спектральных систем?
3. Каковы основные тенденции развития телевизионных спектральных систем?

Глава 9

МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Телевизионная визуализация в сочетании с компьютерными средствами обработки изображений позволяет осуществить переход от качественных наблюдений к количественным оценкам. Подвергая изображение (или видеосигнал) соответствующей обработке, можно автоматически определять, например, оптические свойства объекта, его размеры, структурные характеристики и т.д. Автоматизация анализа количественных характеристик повышает производительность труда исследователя, уменьшает нагрузку на зрение, сокращает субъективные ошибки. Условно методы количественного анализа можно разделить на две большие группы: интерактивные и автоматические [32].

9.1. Автоматический анализ. Методы счета

Автоматизация определения количества и размеров различного рода частиц широко применяется в прикладных исследованиях, в том числе медико-биологических. Так, например, часто возникают задачи счета микроорганизмов, колоний бактерий, красных и белых кровяных телец, количества нейронов и т.п.

Визуальный счет под микроскопом – весьма трудоемкий процесс, подверженный, кроме того, субъективным ошибкам. Ясно, что автоматические ТВ-устройства здесь весьма эффективны. Автоматический счет-анализ предполагает предварительную бинаризацию изображения (квантование на два уровня), при которой фону присваивается значение «лог. 0», а объектам – «лог. 1».

Условно методы счета [32] могут быть разделены на две основные группы:

- 1) *статистические* – более простые, но имеющие меньшую точность; основаны на обработке сведений об общем числе пересечений частиц сканирующим (скользящим) элементом (окном);
- 2) *методы индивидуальной оценки* – более сложные, но зато более точные; основаны на индивидуальном отсчете и измерении размеров каждой отдельной частицы.

Точность статистических методов существенно зависит от параметров окна и свойств изображения. Максимально возможная точность достигается при однородных частицах, равномерно распределенных в кадре, и соответствующем им размере скользящего окна.

Основной чертой методов индивидуальной оценки является исключение в процессе отсчета информации о всех пересечениях данной частицы, кроме первого, со сканирующим элементом (рис. 9.1).

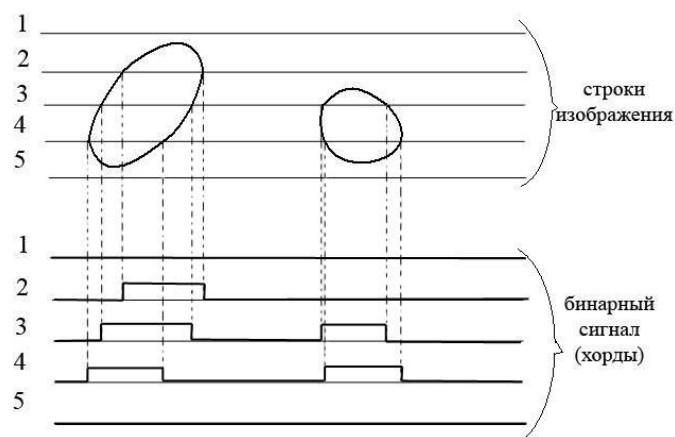


Рис. 9.1. Пример изображения объектов и соответствующего бинарного сигнала

Таким образом, анализирующее устройство должно определять, является ли данный импульс видеосигнала результатом первого пересечения частицы, либо он возник при последующих ее пересечениях. Для этого необходимо сопоставлять сигналы соседних строк на основе критерия перекрытия. Идея в том, что если в текущей строке есть сигнал и он по времени не совпадает с сигналом предыдущей строки, то его надо сосчитать. Рассмотренный способ счета первых хорд не обладает высокой точностью и может быть применен только для объектов простой (например круглой) формы.

Частицы сложной формы могут иметь несколько первых хорд. Например, частица имеет 3 первых хорды и при подсчете дает количество объектов – 3, хотя частица одна.

Так, например, метод счета односвязных (без дырок) частиц сложной формы, предложенный Ю.Ф. Коркуновым [32] (рис. 9.2), основан на вычислении разности числа импульсов N_T пересечения объекта сканирующим элементом и числа импульсов N_C на выходе схемы совпадения. Справедливость данного метода может быть показана математически с использованием вариационного исчисления, поэтому его можно отнести к вариационным методам счета.

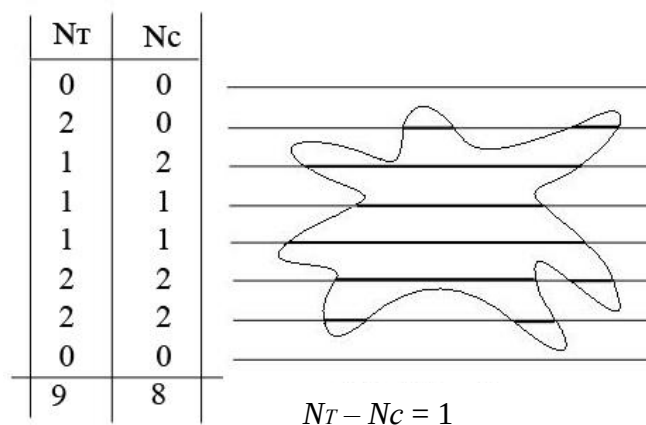


Рис. 9.2. Метод счета Ю.Ф. Коркунова: $N = N_T - N_C$

Счет объектов может быть выполнен также путем анализа и учета дополнительных характерных точек изображения, например точек объединения ветвей, когда на текущий видеоимпульс попадут совпадающие с ним видеоимпульсы предыдущей строки за исключением первого. Такие методы счета основаны на анализе топологии и могут быть названы топологическими [49].

Обозначим точки окончаний первых хорд x_{1i} , а точки объединения ветвей – x_{0i} (для нашего примера, соответственно, x_{11} – x_{15} и x_{01} – x_{05}). Тогда число объектов будет равно разности $N = N_{x1} - N_{x0}$ (рис. 9.3).

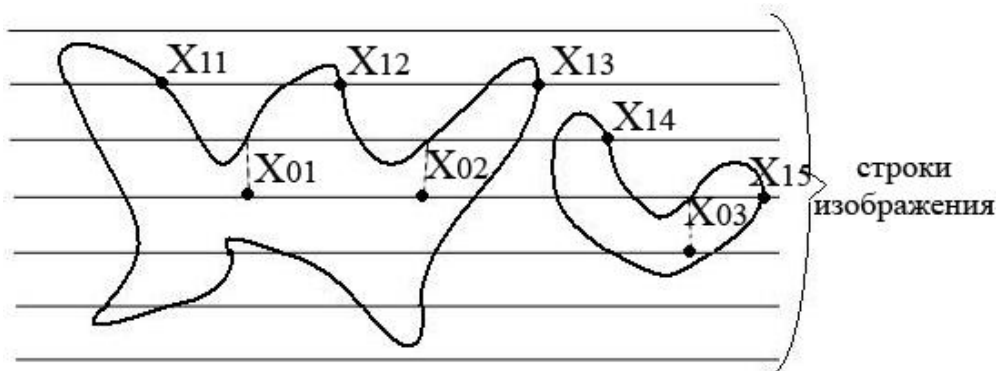


Рис. 9.3. Иллюстрация вариантов топологического счета:
число объектов $N = N_{x1} - N_{x0}$, где N_{x1} – число первых точек;
 N_{x0} – число точек объединения ветвей

Нетрудно заметить, что топологический счет объектов, основанный на вычислении разности начальных точек и точек объединений ветвей, как и метод счета Ю.Ф. Коркунова, дает ошибку для многосвязных объектов (при наличии дырок внутри) (рис. 9.4).

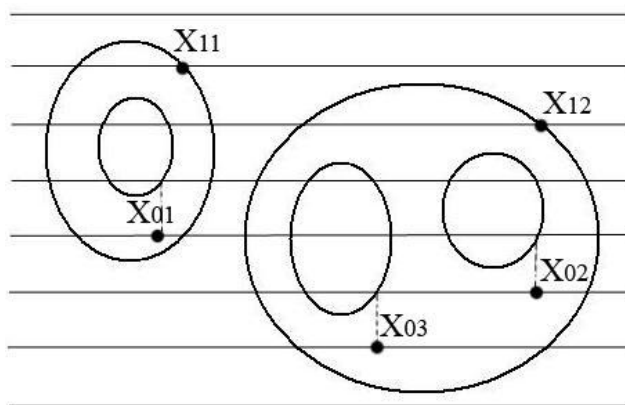


Рис. 9.4. Иллюстрация ошибки варианта топологического счета
при наличии «дырок» в объектах: $N = N_{x1} - N_{x0} = -1$

Рассмотрим некоторые варианты повышения точности топологического счета объектов. Для этого рассмотрим топологию объектов (фигур), используя их представление в виде графов (рис. 9.5).

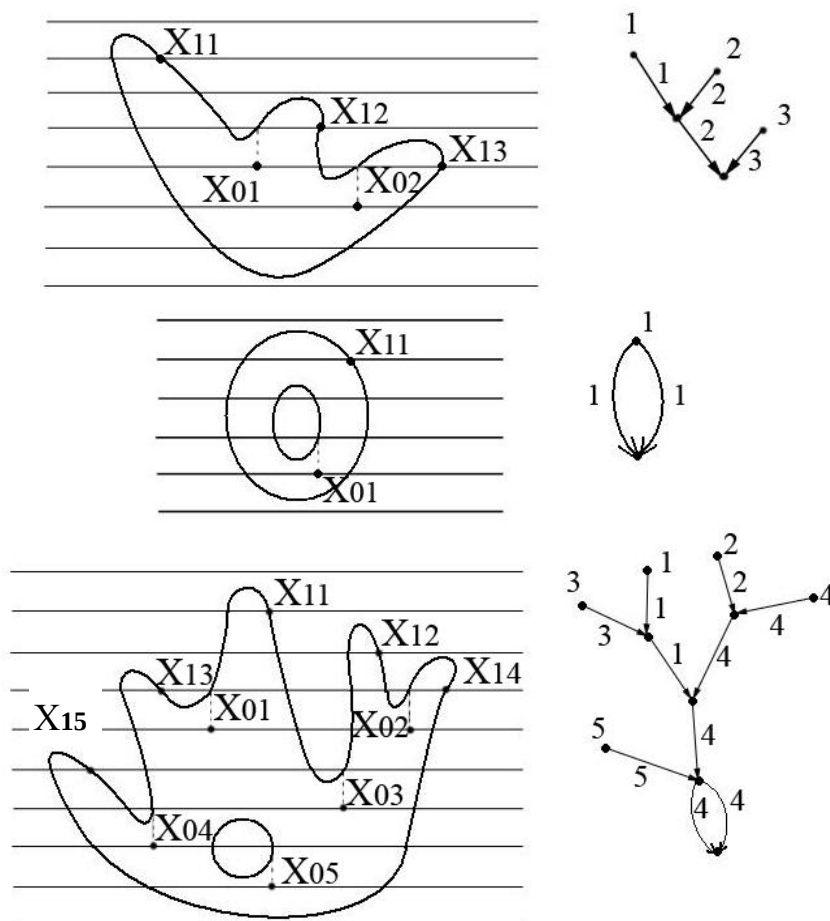


Рис. 9.5. Примеры объектов и соответствующих им графов (корневых деревьев)

В качестве вершин графов будем использовать точки начал x_1 . За направление ветвей графов примем направление от точек x_1 к точкам x_0 . Введем индексацию ветвей по следующему правилу. Номер ветви от точки x_{1i} соответствует индексу i . Номер ветви от точки x_{0i} будем присваивать в соответствии с индексом одной из объединяемых ветвей, например правой ветви. Узлы графа соответствуют точкам объединения и могут быть описаны парами чисел, соответствующих индексам объединяющихся в узле ветвей. Последовательность таких пар будем называть характеристической последовательностью фигуры (объекта) – $\alpha[T]$. Характеристическая последовательность полностью описывает топологию объекта.

Например, для рис. 9.5: $\alpha_1[T] = \{(1, 2), (2, 3)\}$

$\alpha_2[T] = \{(1, 1)\}$

$\alpha_3[T] = \{(1, 3), (2, 4), (1, 4), (5, 4), (4, 4)\}$.

Нетрудно заметить, что числа характеристической последовательности соответствуют номерам начальных точек объектов x_{1i} . При этом на множестве пар чисел существуют взаимосвязи, заключающиеся в том, что для любой из пар может быть найдена по крайней мере одна другая пара, в которой одно из чисел совпадает. Такое отношение в теории множеств называется отношением толерантности.

Как видим, $\alpha_i[T]$ действительно не пересекаются, т.е. выполняются условия $\alpha_i[T] \cap \alpha_j[T] = \emptyset$. Объединение всех $\alpha_i[T]$ образует полное множество $X[T]$, т.е.

$$\bigcup_{i=1}^n \alpha_i[T] = X[T].$$

Рассматривая примеры графов и их характеристических последовательностей $\alpha_i[T]$, нетрудно заметить, что «дырки» в объекте характеризуются ветвями с одинаковыми индексами, образующими в точке объединения пару одинаковых чисел.

Таким образом, наличие в характеристической последовательности пары одинаковых чисел может служить признаком «дырки» в объекте. Усовершенствованный алгоритм счета включает в себя коррекцию – добавление к результату счета $N = N_{x1} - N_{x0} + n$, где n – количество пар характеристической последовательности с одинаковыми номерами.

9.2. Методы автоматического количественного анализа бинарных изображений

Методы автоматического анализа [32; 50–54] можно условно разделить на две группы: методы последовательного анализа и методы параллельного анализа.

При последовательном анализе производится последовательное выделение (селекция) изображений объектов при каждом сканировании кадра и определение их количественных характеристик.

При параллельном анализе возможно получение количественных характеристик всех объектов за время одного сканирования кадра. При этом вычислительных ресурсов и объема памяти требуется значительно больше по сравнению с последовательным анализом.

9.2.1. Последовательный анализ

Последовательный анализ может быть осуществлен различными способами. Рассмотрим их более подробно.

Метод поиска связных элементов бинарного изображения

Суть метода заключается в том, что после определения точки объекта («затравочного» пикселя) идет поиск связных элементов по строке до тех пор, пока не обнаружится элемент фона. После этого переходят к свободному элементу по вертикали и поиску связных элементов на новой строке влево и вправо. Алгоритм может усложняться, для того чтобы определять наличие выступов вверх, например, путем использования реверса развертки.

Метод обхода контура

Широкое распространение получил метод обхода контура бинарного изображения [23], при котором производится поиск контура по выбранному направлению (например по часовой стрелке) путем многократных шагов в окрестности каждой из его точек с анализом переходов сигнала из «0» в «1» и обратно.

Суть метода заключается в том, что сначала определяется «затравочный» пиксель, т. е. начальная точка объекта («лог. 1») в направлении сканирования, являющаяся граничной точкой с фоновой фигурой. После этого начиная от начальной точки осуществляется поиск новой точки в восьмисвязной окрестности, принадлежащей фоновой фигуре («лог. 0»). Затем от новой точки ведется поиск точки, принадлежащей объекту («лог. 1»), и т. д. Обход контура производится в выбранном направлении по или против часовой стрелки и заканчивается после замыкания контурной линии. Связная область внутри контура является объектом. Скорость обхода определяется быстродействием ЭВМ. Точность не очень высокая из-за изрезанности формируемого контура.

Методы селекции связных хорд бинарного изображения

Большая группа методов последовательного анализа основана на селекции связных хорд (ССХ) в направлении сканирования [50–52]. Связными хордами (бинарными сигналами объекта в строках изображения) называют хорды, совпадающие в смежных строках по своему временному положению или, иначе говоря, удовлетворяющие так называемому критерию перекрытия.

Все методы ССХ основаны на предварительном указании хотя бы одной из начальных точек объекта, как правило первой по направлению сканирования. Суть ССХ заключается в фиксации факта совпадения («лог. 1») бинарного сигнала с данным порядковым номером на текущей строке и сигнала предыдущей строки, который выделяется при наличии считывания на текущей строке информации («лог. 1») о факте совпадения на предыдущей строке. Таким образом, обеспечивается выделение множества связных хорд объекта начиная от указанной начальной точки в направлении сканирования (сверху вниз). Нетрудно заметить, что селекция объектов сложной формы, т.е. имеющих несколько начальных точек, требует знания их положения в кадре или, по крайней мере, их порядковых номеров.

Алгоритм селекции связных хорд обеспечивает работу в темпе поступления информации с выхода телевизионного датчика и основан на анализе сигналов в смежных строках. Формируемый сигнал объекта задержан на строку относительно текущего сигнала.

Запуск процесса ССХ производится путем фиксации факта указания начальной точки объекта на текущей строке, например, путем записи «лог. 1» в запоминающем устройстве (ЗУ) по адресу, соответствующему порядковому номеру текущей хорды строки. На следующей строке данная информация считывается, разрешается прохождение задержанного на строку сигнала. Адреса

выбираются в соответствии с порядковыми номерами хорд задержанной строки. Факт наличия совпадения текущего, задержанного на строку и считанного с выбранной ячейки памяти сигнала фиксируется в ячейке памяти другого ЗУ. В этом же ЗУ фиксируется новый факт указания начальной точки (если она есть). При этом режимы записи и чтения ЗУ меняются через строку.

Алгоритм ССХ может быть легко реализован на ЭВМ с минимальными затратами вычислительных ресурсов.

Поиск начальных точек объекта может быть осуществлен, например, при ССХ с реверсом развертки. Суть такого метода заключается в том, что выделенная от первой хорды нижняя часть фигуры позволяет определить путем анализа совпадения все последние ее хорды и использовать их в качестве запуска ССХ при реверсе развертки, т.е. в направлении снизу вверх. Вновь выделенная часть фигуры дает при совпадении дополнение списка номеров первых хорд, которые при следующем сканировании сверху вниз используют для запуска ССХ.

Основные фрагменты фигур сложной формы, таким образом, могут быть выделены за два прохода вниз и вверх. При наличии в объекте специфических ответвлений реверс необходимо повторять несколько раз для обеспечения полного выделения.

Аналогичным по эффективности является метод поиска верхних ответвлений фигуры, основанный на прослеживании номеров объединившихся ветвей индексации. Суть метода, как и рассмотренных выше, заключается в том, что сначала выделяется часть фигур в направлении вниз, но при совпадении выделенного фрагмента с точкой объединения ветвей фиксируется номер соседней ветви фигуры, которым и дополняется список первых хорд объекта.

Наиболее эффективным методом последовательного анализа, при котором используется принцип ССХ, является метод анализа характеристической последовательности, образованной парами номеров объединяющихся ветвей фигур и получаемой в процессе сканирования путем индексации их ветвей.

В кадре изображения, содержащего несколько объектов, расположенных беспорядочно, номера точек x_{1i} и x_{0i} присваиваются в порядке сканирования. В этом же порядке идет индексация ветвей и образование характеристической последовательности кадра – множества пар чисел для узлов графов $X[T]$, которое разделяется на непересекающиеся подмножества пар чисел (характеристические последовательности объектов $\alpha_i[T]$) по отношению толерантности, рассмотренному выше и заключающемуся в том, что для любой из пар в подмножестве находится по крайней мере одна, в которой есть совпадающее число (связные пары).

Последовательность действий заключается в том, что при первом сканировании изображения производится индексация ветвей и формирование характеристической последовательности кадра. Затем производится обработка этой последовательности, сводящаяся к тому, что для выделения первого объекта определяется подмножество связных пар чисел, в которых присутствует число 1. В найденном подмножестве удаляются все повторяющиеся числа, а остальные сортируются в порядке их возрастания. Отсортированные числа соответствуют номерам первых хорд объекта, которые указываются для ССХ.

Для перехода к следующему объекту определяется номер из его начальных точек как наименьшее число натурального ряда, отсутствующее в списке номеров первых хорд выделенных объектов. По этому номеру находится следующее подмножество связанных пар чисел.

Далее процесс повторяется до тех пор, пока список номеров первых хорд объектов не совпадет со списком номеров первых хорд всех объектов в кадре. Метод обеспечивает предельную скорость последовательного анализа: один объект за один кадр ТВ-изображения.

Ниже рассматриваются характерные точки в изображениях объектов, используемые при индексации ветвей, и методы их выделения.

Методы выделения характерных точек в изображениях объектов

Характерные точки объекта на его бинарном изображении показаны на рис. 9.6.

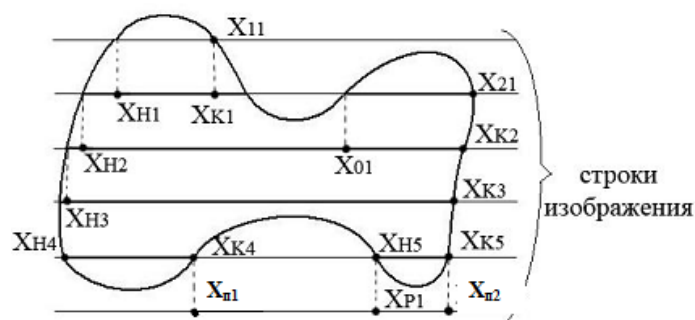


Рис. 9.6. Изображение объекта и его характерные точки:

X_{1i} – первые точки; X_{ni} – последние точки; X_{0i} – точки объединения ветвей;

X_{pi} – точки расхождения ветвей; X_{hi} – начальные точки совпадений хорд;

X_{ki} , где $i = 1, 2, \dots$ – конечные точки совпадений хорд

Ниже (на рис. 9.7–9.16) рассматриваются принципы выделения характерных точек в бинарных изображениях объектов на примерах схем, относящихся к классу конечных автоматов, а именно D-триггеров. Алгоритм работы данных схем может быть легко реализован на ЭВМ с минимальными затратами вычислительных ресурсов.

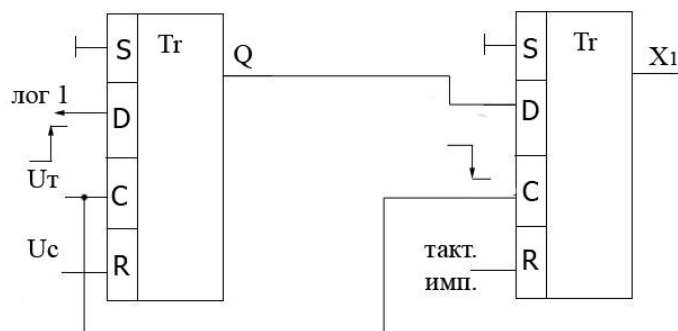


Рис. 9.7. Принцип выделения первых точек объектов X_1 , соответствующих заднему фронту U_T при условии отсутствия сигнала совпадения U_c

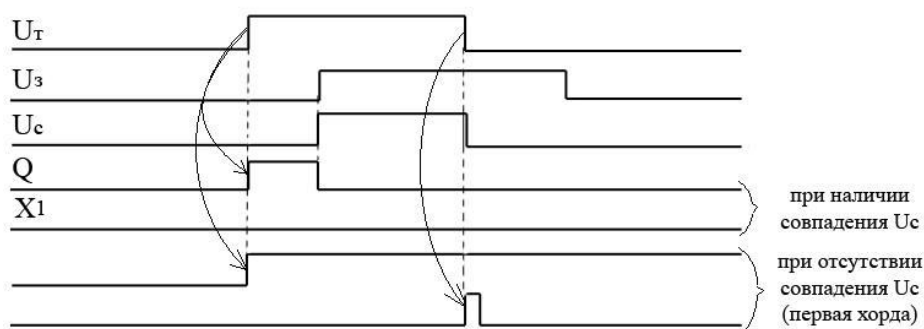


Рис. 9.8. Временные диаграммы, поясняющие принцип выделения первых точек объектов

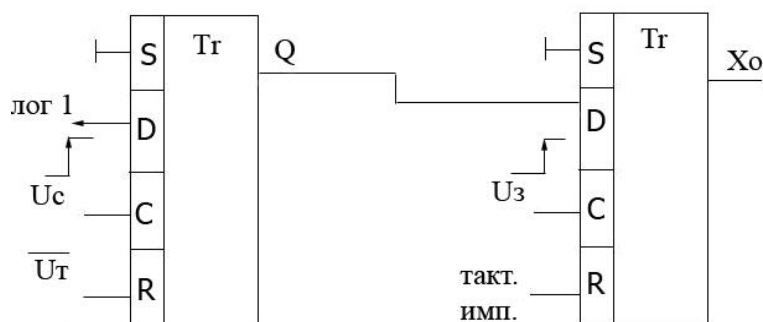


Рис. 9.9. Принцип выделения точек объединения X_0 ветвей объекта, соответствующих началу (переднему фронту) задержанного сигнала U_3 после фиксации факта совпадения U_c при наличии текущего сигнала U_T

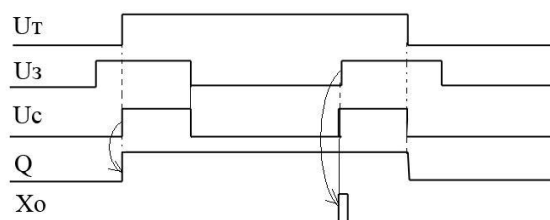


Рис. 9.10. Временные диаграммы, поясняющие принцип выделения точек объединения ветвей объекта

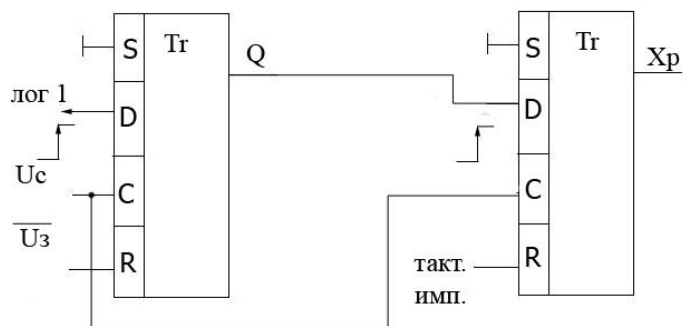


Рис. 9.11. Принцип выделения точек расхождения ветвей объектов

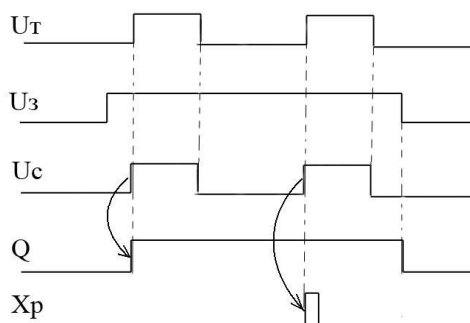


Рис. 9.12. Временные диаграммы, иллюстрирующие принцип выделения точек расхождения ветвей объектов

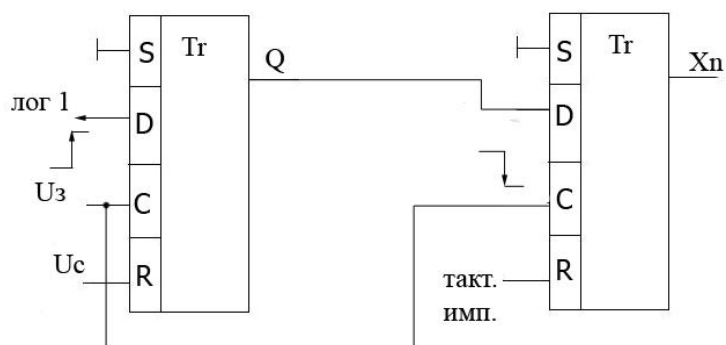


Рис. 9.13. Принцип выделения последних точек объекта X_n , соответствующих окончанию (заднему фронту) задержанного сигнала U_3 при отсутствии совпадения U_c

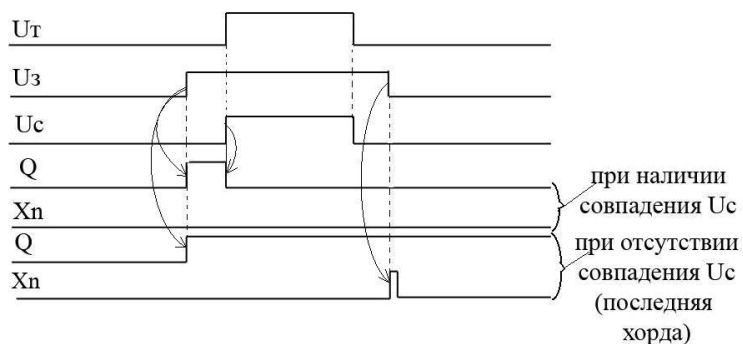


Рис. 9.14. Временные диаграммы, поясняющие принцип выделения последних точек объектов

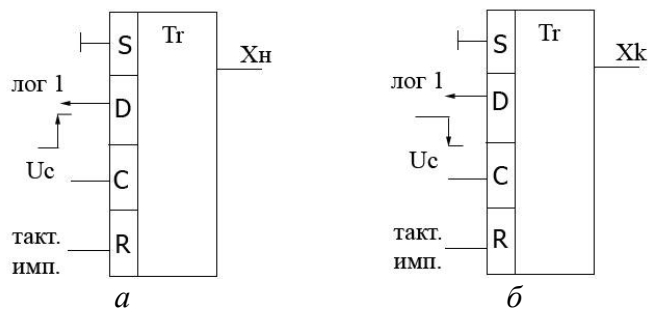


Рис. 9.15. Принцип выделения начальных (а) и конечных (б) точек совпадения хорд объекта

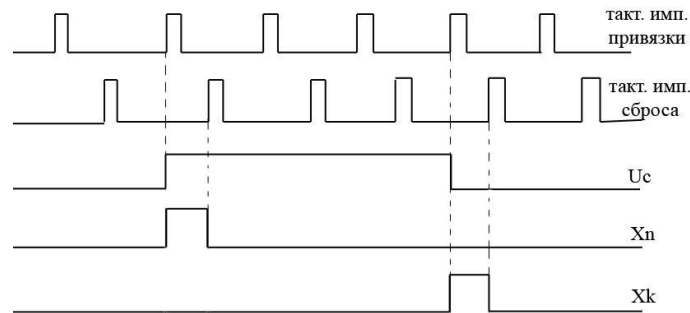


Рис. 9.16. Временные диаграммы, поясняющие принцип выделения начальных и конечных точек совпадения хорд объекта

9.2.2. Параллельный анализ

На основе индексации ветвей может быть произведен параллельный анализ, который заключается в накоплении количественных данных о каждой прослеживаемой хорде по адресам, присваиваемым данной хорде в процессе индексации. Суть метода заключается в том, что получаемая характеристическая последовательность кадра $X[T]$ разбивается на непересекающиеся части $\alpha_i[T]$ – характеристическая последовательность фигур. Каждой фигуре присваивается порядковый номер i , который ставится в соответствие каждому элементу $\alpha_i[T]$.

Задача параллельного анализа будет сводиться к суммированию результатов измерения параметров хорд, имеющих одинаковые индексы. Это может быть сделано в процессе сканирования изображения, если номер хорды, полученный в процессе индексации, сопровождать порядковым номером фигуры G_i , к которой эта хорда принадлежит. При этом номер фигуры служит адресом для ОЗУ, в котором накапливаются данные, например, о площади объекта (площадь – сумма данных хорд объекта). В результате по адресу G_i в конце кадра в ОЗУ будет получена сумма длин хорд объекта, соответствующая его площади [53; 54].

9.3. Интерактивный анализ

Под интерактивным анализом понимается метод, при котором главная роль в выделении или указании областей для получения их количественных характеристик отводится человеку – оператору. Например, количество объектов может быть легко подсчитано, если предварительно оператор расставит метки на их изображениях. Системе остается только сосчитать количество меток.

Такой метод вполне применим в тех случаях, когда другим способом выделить объекты не представляется возможным, например, при малоконтрастных объектах на сложном фоне.

При интерактивном выделении объекта оператор может либо «закрасить» требуемую область, либо (что более просто) оконтурить ее. В первом случае системе остается только определить количественные характеристики, например, площадь как сумму элементов закрашенной области. Во втором случае система должна предварительно сформировать сигнал, соответствующий оконтуренной области.

Методы ввода графической информации

Таким образом, для интерактивного анализа необходимо решить две главные задачи: обеспечить удобный ввод графической информации (меток, контурных линий) и точное выделение оконтуренных областей [23].

Первая задача решается с помощью устройств ввода графической информации («мышь», «трекбол», «планшет», «световое перо», «джойстик» и т.п.). Самым простым устройством является джойстик (набор переключателей, обеспечивающих перемещение курсора в двух взаимно перпендикулярных направлениях: влево, вправо, вниз, вверх). Одновременные команды «влево – вверх», «вправо – вверх», «влево – вниз», «вправо – вниз» могут обеспечивать перемещение курсора по диагонали.

Если рассмотреть элементы раstra, то нетрудно заметить, что каждый элемент соседствует с четырьмя соседними по вертикали и горизонтали (условие четырехсвязности) и еще дополнительно с четырьмя по диагонали (условие восьмисвязности). Соответственно может быть сформирована четырех- или восьмисвязная контурная линия. Естественно, восьмисвязная контурная линия дает более точное оконтуривание границ объекта.

В настоящее время широко распространены манипуляторы типа «мышь» и «трекбол», по сути отличающиеся только тем, что в одном случае шарик катается по плоской поверхности, а в другом – вращается рукой. Для формирования счетных импульсов могут быть использованы различные датчики, фото-, светодиодные пары, емкостные датчики, датчики Холла и т.п.

Устройство ввода графической информации планшетного типа представляет собой плоскость с перекрещивающимися панелями (электродами), задающими сетку координат, соответствующую раstrу.

С точки зрения эргономики, наиболее сложно в реализации так называемое световое перо, которое позволяет пространственно совместить плоскость изображения с плоскостью рисования (оконтуривание). Световое перо позволяет привычным образом формировать рисунок на экране. Оператор рисует прямо по экрану. Принцип светового пера основан на оптическом считывании точки светящегося экрана, привязке ее положения к раstrу экрана и формировании курсора с координатами, соответствующими положению светового пера на экране. В настоящее время функции планшета и экрана совмещены в специальных экранах на основе LCD.

Методы выделения оконтуренных фигур (зон анализа)

При интерактивном анализе оператор обводит контур интересующей его зоны вручную, а сама зона анализа выделяется автоматически. Наиболее просто сформировать зону анализа из замкнутой контурной линии можно, используя свойство четности числа пересечений контура со строкой сканирования. Однако нетрудно заметить, что четность числа пересечений нарушается на горизонтальных границах контура.

Для устранения нарушений четности на таких границах необходимо вводить разрывы контура. В противном случае зона анализа будет формироваться с ошибкой. Автоматически восстанавливать четность числа пересечений одноэлементного замкнутого контура со строкой сканирования можно путем дополнительного сравнения его сигналов в смежных строках. Для 4-связной контурной линии для сравнения достаточно выполнить операцию «И» (умножение) для текущего и задержанного на строку сигнала. Для 8-связной контурной линии необходимо дополнительное «удлинение» как текущего, так и задержанного на строку сигнала контура на длительность одного элемента с целью обеспечения выявления их совпадений в смежных строках. Поскольку сигнал зоны анализа смещен на длительность строки и совпадает в нижней части с контурной линией, то целесообразно включить в него саму контурную линию.

Общими недостатками методов, основанных на свойстве четности, являются необходимость замкнутости начала и конца контура, отсутствие каких-либо выступов, нарушающих четность, и обеспечение толщины на горизонтальных участках, соответствующей одному элементу разложения. Свободным от указанных недостатков является метод выделения фоновой фигуры, внешней по отношению к замкнутым контурам. Инверсия выделенного сигнала фоновой фигуры соответствует оконтуренной зоне анализа. Таким образом, задача формирования зоны анализа в этом случае сводится к задаче выделения связной фигуры, имеющей первую начальную точку, соответствующую началу кадра.

Контрольные вопросы

1. Какие основные задачи решаются при количественном анализе изображений объектов?
2. На чем основаны методы телевизионного счета объектов?
3. В чем заключается последовательный анализ изображений?
4. В чем заключается параллельный анализ изображений?
5. Какие существуют методы выделения связных областей изображений?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы телевизионной визуализации являются информационными машинами, предоставляющими человеку-оператору визуальную информацию об объекте исследования, недоступную для невооруженного глаза. Такая система является своего рода посредником между объектом и зрительным анализатором человека. Поэтому на нее возлагаются функции, свойственные функциям системы «глаз – мозг», заключающиеся не только в получении, но и в обработке и представлении визуальной информации. Проектирование системы визуализации возможно только на основе некоторых априорных сведений о визуализируемом объекте, а также на основе сведений о формах представления получаемой видеоинформации. Общим подходом к рассмотрению и проектированию систем подобного класса, таким образом, становится информационный подход и информационная теория связи, развитие которой идет в направлении создания методов оценки качества получаемой информации. Данная проблема пока еще до конца не решена, несмотря на существующие подходы и определенные результаты.

Вместе с тем качество системы может оцениваться и на основе традиционных критериев, например таких как контрастность, разрешающая способность, число передаваемых градаций яркости, цвета и т.п. Эти критерии, как и методы, лежащие в основе систем визуализации, происходят из принципов и методов, лежащих в основе телевидения, а именно: принципа развертки, принципа накопления, методов преобразования «свет – сигнал», методов преобразования «сигнал – свет», методов внутри- и межкадровой обработки и т.п.

Задачи, связанные с извлечением количественных параметров изображений для последующей количественной формы представления визуальной информации, также основаны на специфических телевизионно-вычислительных методах, получивших широкое распространение и реализуемых в настоящее время на ЭВМ.

Соединение современных персональных ЭВМ и систем телевизионной визуализации характеризует новый этап в развитии данного класса аппаратуры и обеспечивает повышение таких ее качественных характеристик, как многофункциональность, удобство пользования, оперативность получения и отображения видеоинформации, возможность ее представления в различных формах, документирование и передача по компьютерным сетям.

Рассмотрению перечисленных выше основных принципов и методов для построения систем телевизионной визуализации и посвящено данное учебное пособие.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Халфин, А. М.* Основы телевизионной техники / А. М. Халфин. М.: Советское радио, 1955. 580 с.
2. *Халфин, А. М.* Телевизионная техника / А. М. Халфин. Л.: Энергия, 1971. 232 с.
3. *Домбругов, Р. М.* Телевидение: учебник для студентов вузов / Р. М. Домбругов. Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1979. 176 с.
4. Телевидение / под ред. В. Е. Джаконии. М.: Радио и связь, 1986.
5. *Березин, В. В.* Твердотельная революция в телевидении / В. В. Березин, А. А. Умбиталиев, Ш. С. Фахми, А. К. Цыцулин, Н. Н. Шипилов. М.: Радио и связь, 2006. 312 с.
6. *Кузьмин, В. П.* Вклад новгородского НИИ «РАСТР» в разработку систем и аппаратуры промышленного телевидения / В. П. Кузьмин, В. И. Челпанов, О. Ф. Родионов, В. И. Абрамов, Н. П. Корнышев, С. Б. Торицин, М. Я. Орловский, Я. Ю. Гозман, Г. А. Камышев // Проблемы информатизации. 1998. Вып. 2. С. 33–40.
7. *Быков, Р. Е.* Основы телевидения и видеотехники. Учебник для студентов вузов, обучающихся по спец. «Радиотехника» направления «Радиотехника» / Р. Е. Быков. М.: Горячая линия–Телеком, 2006. 399 с.
8. *Марр, Д.* Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов / Д. Марр. М.: Радио и связь, 1987. 399 с.
9. *Хромов, Л. И.* Информационная теория связи на пороге XXI века / Л. И. Хромов. СПб.: ПиК, 1996. 88 с.
10. *Хромов, Л. И.* Информационная революция и виртуальное познание / Л. И. Хромов. СПб.: ЭВС, 2000. 124 с.
11. *Цыцулин, А. К.* Избирательность и теория информации / А. К. Цыцулин // Вопр. радиоэлектроники. Сер. «Техника телевидения». 2007. Вып. 1. С. 3–9.
12. *Кошкин, Н. И.* Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. 8-е изд., перераб. М.: Наука, 1980. 208 с.
13. *Новаковский, С. В.* Стандартные системы цветного телевидения / С. В. Новаковский. М.: Связь, 1976. 368 с.
14. *Хромов, Л. И.* Твердотельное телевидение. Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах / Л. И. Хромов, Н. В. Лебедев, А. К. Цыцулин, А. Н. Куликов. М.: Радио и связь, 1986. 183, [2] с.: ил.
15. *Куликов, А. Н.* Реальная разрешающая способность телевизионной камеры / А. Н. Куликов // Специальная техника. 2002. Вып 2. С. 20–26.
16. *Игнатьев, Н. К.* Дискретизация и ее приложения / Н. К. Игнатьев. М.: Связь, 1980. 264 с.
17. *Цыцулин, А. К.* Телевидение и космос: учеб. пособие / А. К. Цыцулин. СПб.: ЛЭТИ, 2003. 225, [2] с.: ил.

18. Роуз, А. Зрение человека и электронное зрение: пер. с англ / А. Роуз. М.: Мир, 1977. 216 с.
19. Никитин, В. В. Телевидение в системах физической защиты / В. В. Никитин, А. К. Цыцулин. СПб.: ЛЭТИ, 2001. 135 с.
20. Егорова, С. Д. Оптико-электронное цифровое преобразование изображений / С. Д. Егорова, В. А. Колесник. М.: Радио и связь, 1991. 207 с.
21. Бондаренко, А. Аппаратная реализация систем ввода обработки, хранения и вывода изображений различных телевизионных форматов и стандартов / А. Бондаренко, И. Докучаев, В. Стешенко // Chip News. 2004. № 2 (85). С. 34–37.
22. Цифровое телевидение / под ред. М. И. Кривошеева. М.: Связь, 1980. 262 с.
23. Павлидис, Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений / Т. Павлидис. М.: Радио и связь, 1986. 400 с.
24. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений: в 2 кн. / У. Прэтт. М.: Мир, 1982.
25. Ярославский, Л. П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии. Введение в цифровую оптику. М.: Радио и связь, 1987. 296 с.
26. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2001. 784 с.
27. Цифровое преобразование изображений: учеб. пособие для вузов / Р. Е. Быков, Р. Фрайер, К. В. Иванов, А. А. Манцветов; под ред. Р. Е. Быкова. М.: Горячая линия–Телеком, 2003. 228 с.
28. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. М.: Наука, 1984. 831 с.
29. Бронштейн, И. А. Справочник по математике / И. А. Бронштейн, К. А. Семендяев. М.: Наука, 1986. 544 с.
30. А. с. 1117858 СССР, МКИ Н 04 Н 5/21, Н 04 Н 3/14. Способ компенсации неравномерности видеосигнала матричного фотоприемника / Н. Ю. Герасимов, И. М. Рубинович (СССР). № 3530932; заявл. 06.12.82; опубл. 07.10.84, Бюл. № 37. 7 с.: ил.
31. Бычков, С. Н. Цифровая коррекция датчиков ТВ-сигналов / С. Н. Бычков, Н. Н. Кузнецов, Б. С. Тимофеев // Техника кино и телевидения. 1985. № 1.
32. Никитин, В. В. Телевидение в системах физической защиты: учеб. пособие / В. В. Никитин, А. К. Цыцулин. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001. 135 с.
33. Блинов, Н. И. Телевизионные методы обработки рентгеновских и гамма-изображений / Н. И. Блинов, Е. М. Жуков, Э. Б. Козловский, А. И. Мазуров. М.: Энергоатомиздат, 1982. 200 с.
34. Корнышев, Н. П. Телевизионная визуализация и обработка изображений люминесцирующих объектов в криминалистике, молекулярной

биологии и медицине / Н. П. Корнышев; НовГУ им. Ярослава Мудрого. Великий Новгород, 2004. 226 с.

35. *Корнышев, Н. П.* Телевизионные спектральные системы для визуализации люминесцирующих объектов / Н. П. Корнышев // Вестн. Новгор. гос. ун-та. Сер. «Технические науки». 2005. № 34. С. 100–105.

36. *Корнышев, Н. П.* Особенности построения телевизионных спектральных систем для визуализации люминесцирующих объектов / Н. П. Корнышев // Петербургский журнал электроники. 2007. № 1 (50). С. 83–86.

37. *Корнышев, Н. П.* Оптимизация системы телевизионной визуализации люминесцирующих объектов методом компьютерного моделирования / Н. П. Корнышев, А. В. Тимофеев // Оптический журнал. 2008. № 1. С. 19–21.

38. *Павлов, И. В.* Методы и средства контроля подлинности документов ценных бумаг и денежных знаков / И. В. Павлов, А. И. Потапов. СПб.: РИО СЗТУ, 2005. 349 с.

39. *Федотов, Г. А.* Электрические и электронные устройства для фотографии / Г. А. Федотов. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 96 с.: ил.

40. Пат. 2066930 Российская Федерация, МКИ Н 04 N 7/18 Телевизионная спектральная система / Корнышев Н. П., Родионов О. Ф., Трошин Н. Г.; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт промышленного телевидения «Растр». № 93030482/93; заявл. 31.05.93; опубл. 20.09.96, Бюл. № 26. 3 с.: ил.

41. Пат. 2094849 Российская Федерация, МКИ G 07 D 7/00, Н 04 N 7/18, G 06 K 9/18 Телевизионная система для контроля документов / Корнышев Н. П., Родионов О. Ф.; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт промышленного телевидения «Растр». № 95100283/09; заявл. 10.01.95; опубл. 27.10.97, Бюл. № 30. 3 с.: ил.

42. *Бутусов, В. В.* Телевизионные спектральные системы для криминалистических экспертиз / В. В. Бутусов, Н. П. Корнышев, О. Ф. Родионов, В. И. Челпанов // Специальная техника. 2003. № 4. С. 24–33.

43. *Бутусов, В. В.* Телевизионные спектральные системы. Новые разработки и перспективы развития / В. В. Бутусов, Н. П. Корнышев, В. П. Кузьмин, Н. С. Никитин, В. И. Челпанов // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2006. № 1–2. С. 41–43.

44. *Бутусов, В. В.* Приборы дооснащения телевизионных спектральных систем. Телевизионные лупы / В. В. Бутусов, Н. П. Корнышев, В. П. Кузьмин, Н. С. Никитин, В. И. Челпанов // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2007. № 1, 2. С. 98–99.

45. ПЦР – основы метода, применение ПЦР для диагностики инфекционных заболеваний, организация ПЦР-лаборатории, проведение ПЦР-анализа / НПФ «Литех». М., 2001. 15 с.

46. *Черницкий, Е. А.* Спектральный люминесцентный анализ в медицине / Е. А. Черницкий, Е. И. Слобожанина. Минск: Наука и техника, 1989. 140, [1] с.: ил.

47. *Корнышев, Н. П.* Телевизионный метод определения количества ДНК по изображениям люминесцирующих продуктов полимеразной цепной реакции в гелях / Н. П. Корнышев // Вестн. Новгор. гос. ун-та. Сер. «Технические науки». 2006. № 38.

48. *Корнышев, Н. П.* Информационные технологии в диагностике инфекционных заболеваний методом ПЦР / Н. П. Корнышев // Вестн. Новгор. гос. ун-та. Сер. «Медицинские науки». 2005. № 32. С. 49–52.

49. А. с. 1179397 СССР, МКИ G 06 М 11/02. Устройство для счета объектов, расположенных беспорядочно / В. А. Максимов, Е. В. Андреева, Н. П. Корнышев (СССР). № 3678093/24–24; заявл. 23.12.83; опубл. 15.09.85, Бюл. № 34. 5 с.: ил.

50. *Коркунов, Ю. Ф.* Алгоритм селекции изображений объектов произвольной формы / Ю. Ф. Коркунов, Н. П. Корнышев // Техника средств связи. Техника телевидения. 1987. Вып. 5. С. 44–48.

51. А. с. 1474700 СССР, МКИ G 06 К 9/00. Устройство для выделения объектов на изображении / Ю. Ф. Коркунов, Н. П. Корнышев (СССР). № 4215403/24–24; заявл. 24.03.87; опубл. 23.04.89, Бюл. № 15. 5 с.: ил.

52. А. с. 1451739 СССР, МКИ G 06 К 9/00. Устройство для измерения площади фигуры / Ю. Ф. Коркунов, Н. П. Корнышев, В. А. Максимов. (СССР). № 4177356/24–24; заявл. 09.01.87; опубл. 15.01.89, Бюл. № 2. 4 с.: ил.

53. А. с. 1501105 СССР, МКИ G 06 К 9/00. Устройство для счета и измерения размеров объектов / Н. П. Корнышев (СССР). № 4267307/24–24; заявл. 22.06.87; опубл. 15.08.89, Бюл. № 30. 6 с.: ил.

54. *Корнышев, Н. П.* Метод количественного анализа бинарных изображений / Н. П. Корнышев // Техника средств связи. Техника телевидения. 1988. Вып. 4. С. 58–66.