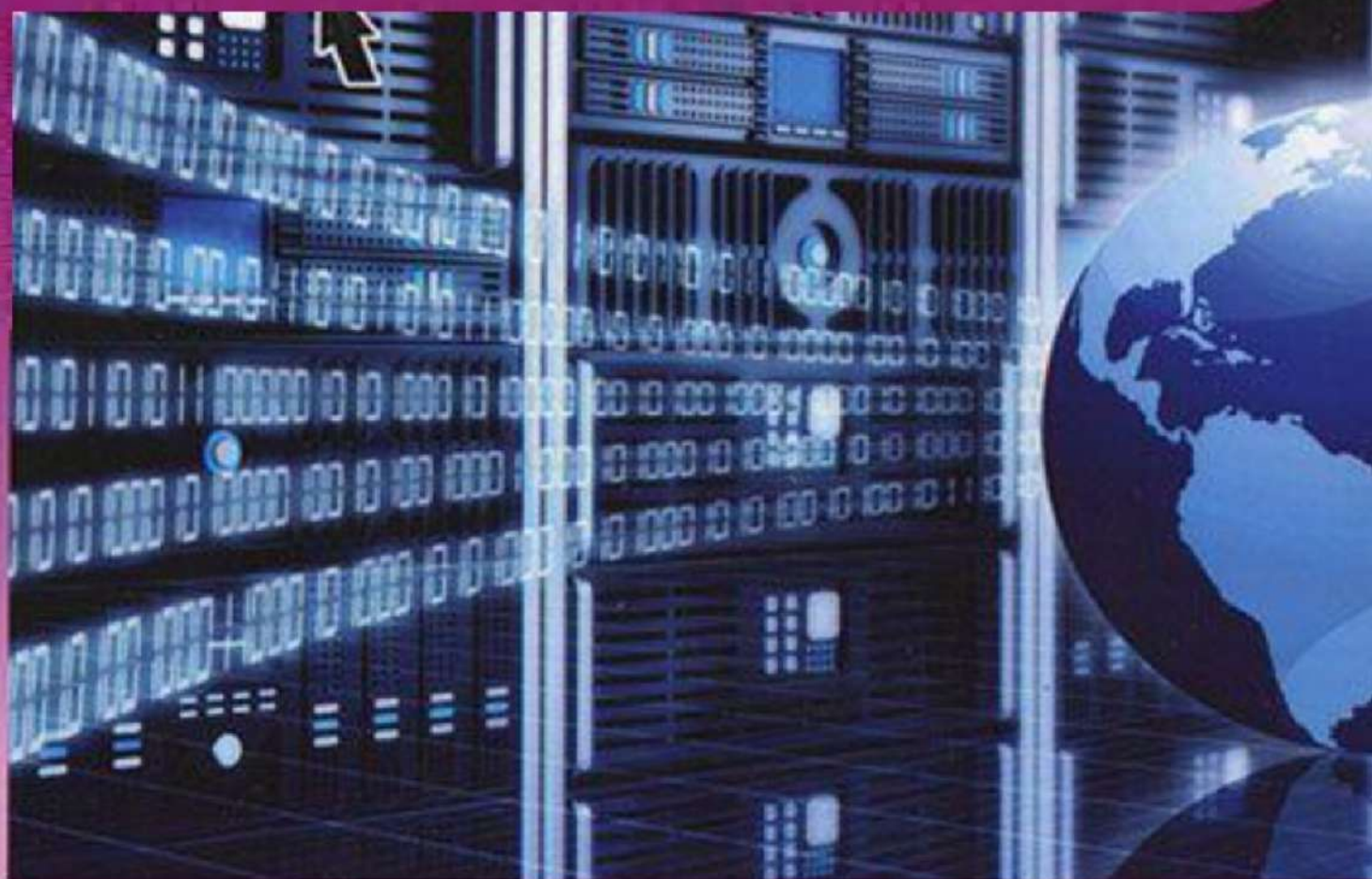


УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



ОСНОВЫ РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

С.Р. ПАПЯН

С.Р. ПАПЯН

**ОСНОВЫ
РАДИОВЕЩАНИЯ
И ТЕЛЕВИДЕНИЯ**



Учебное пособие

Ереван
Издательство РАУ
2017

УДК 654.19 (042.4)
ББК 76.03я7
П 170

П 170 Основы радиовещания и телевидения: Учебное пособие /
С.Р. Папян. – Ер.: РАУ, 2017. – 328 с.

Пособие соответствует учебному плану магистерской подготовки по дисциплине «Основы радиовещания и телевидения». Представлены различные методы построения современных радио и телевизионных систем, принципов формирования, распространения по каналам связи и приема радио и телевизионных сигналов, ознакомление с действующими стандартами в этой области. Рассмотрены особенности светового и звукового восприятия человека, механизмы преобразования оптического сигнала в электрический и способы синхронизации телевизионных сигналов. Описываются методы их преобразования, пространственного и временного сжатия видеосигнала. Рассмотрены различные носители, используемые для записи и хранения видео и аудио информации. Приводится описание стандартов вещания аналогового телевизионного черно-белого и цветного изображения. В пособии также рассмотрены стандарты цифрового телевизионного вещания DVB, методы канального кодирования и модуляции цифрового сигнала, а также принципы построения систем условного допуска. Приведены блок-схемы телевизионных приемников и рассмотрены принципы работы его различных узлов.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также может быть полезно для специалистов, работающих в области радио и телевидения.

УДК 654.19 (042.4)
ББК76.03я7

ISBN 978-9939-67-175-8

© Издательство РАУ, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
1. Предисловие	9
2. Методы формирования радиосигналов и сигналов изображения ..	11
2.1. Физика светового и звукового восприятия	11
2.2. Методы формирования сигналов изображения	17
2.3. Методы формирования радиосигналов	41
3. Цифровая обработка сигналов	44
3.1. Основы цифровых технологий	44
3.2. Цифровые аудио и видео интерфейсы. Двумерное преобразование Фурье	52
3.3. Цифровая фильтрация	59
4. Цифровые методы сжатия телевизионных сигналов	71
4.1. Механизмы сжатия видеоданных	71
4.2. Сжатие аудиоданных	89
5. Стандарты сжатия телевизионных сигналов	95
5.1. Стандарты сжатия неподвижных изображений	95
5.2. Стандарт сжатия MPEG-1	99
5.3. Стандарт сжатия MPEG-2	113
5.4. Стандарт сжатия MPEG-4	135
6. Микширование, комбинирование и методы хранения телеинформации	150
6.1. Микширование телевизионных сигналов	150
6.2. Компьютерная графика и анимация	153
6.3. Стереотелевидение и принципы записи телесигналов	165
7. Формирование телесигналов для подачи в канал связи	183
7.1. Системы аналогового цветного телевидения	183
7.2. Стандарт DVB	201
7.3. Канальное кодирование	207
7.4. Методы модуляции	225
7.5. Стандарты спутникового телевидения DVB-S/S2	237
7.6. Стандарты цифрового радиовещания DAB и DRM	253
7.7. Стандарты кабельного вещания DVB-C/C2	258
7.8. Стандарты наземного вещания DVB-T/T2	270
7.9. Системы условного доступа	288
8. Приемные устройства	298
8.1. Структурная схема телевизионных приемников	298
8.2. Преобразователи электрических сигналов в оптические	304
8.3. Измерение и контроль в технике телевидения	316
Заключение	324
Список рекомендуемой литературы по разделам	325
Основная литература	327
Дополнительная литература	327

ВВЕДЕНИЕ

Телевизионное вещание является одним из самых распространенных средств информационного обслуживания населения и находит широкое применение в различных сферах деятельности общества. Известно, что сегодня происходит слияние средств вещания, телекоммуникаций и компьютерных технологий в едином информационном пространстве. В значительной степени этому способствует переход от аналоговых к цифровым методам формирования и передачи сигналов в технике вещания и телекоммуникаций.

Применение цифровых методов позволяет устранить многие недостатки аналоговых систем вещания, в том числе искажения сигналов при их формировании, обработке и передаче, накапливающиеся с увеличением числа преобразований, переприемов и перезаписей. Разработанные эффективные методы сжатия данных и цифровой модуляции обеспечили возможность многопрограммного телевизионного вещания, при котором по одному каналу вместо традиционной передачи сигнала одной программы можно передавать сигналы нескольких вещательных программ. Учитывая нехватку эфирных каналов в крупных городах и ограниченную способность спутниковых ретрансляторов, это свойство цифрового сигнала оказывается весьма актуальным.

Развитие цифрового телерадиовещания пережило несколько этапов развития, каждый из которых характеризуется научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, созданием соответствующих устройств и систем, а также стандартов.

Первый этап истории цифрового телевидения характеризуется использованием цифровой техники в отдельных частях телесистем при сохранении аналоговых каналов связи. На данном этапе сигналы изображения и звука преобразуются в цифровую форму, обработка и хранение ко-

торых в пределах студии осуществляются цифровыми средствами. На выходе телевизионный сигнал преобразуется в аналоговую форму и передается по обычным каналам связи. Также на данном этапе характерно введение цифровых блоков в телеприемники с целью повышения качества изображения и звука, а также расширения функциональных возможностей.

Второй этап развития цифрового телевидения характеризуется созданием гибридных аналого-цифровых телесистем. Можно выделить два основных направления изменения телевизионного стандарта: переход от одновременной передачи яркостной и цветowych сигналов к последовательной и увеличение числа строк в кадре и элементов изображения в строке. Реализация второго направления связана с необходимостью сжатия спектра ТВ сигналов для обеспечения возможности их передачи по стандартным каналам связи. Примером таких систем являются японская система телевидения высокой четкости MUSE и западноевропейские системы семейства MAC. В передающей и приемной частях этих систем сигналы передаются в аналоговой форме.

Третий этап развития цифрового телевидения – создание полностью цифровых телевизионных систем. После появления аналого-цифровых систем телевидения высокой четкости в Японии и Европе (MUSE и HD-MAC) в США в 1987 году был объявлен конкурс на лучший проект системы телевидения высокого разрешения для утверждения в качестве национального стандарта. В первые годы на этот конкурс были выдвинуты различные аналоговые системы. Рассматривались также проекты аналоговых систем, которые предусматривали передачу по одному стандартному каналу двух сигналов – обычного ТВ сигнала и дополнительного, который в приемнике с соответствующим декодером позволяет получить изображение с большим количеством строк и элементов в строке. Но уже в 1990 году появились первые предложения полного перехода к цифровым системам телевидения. С каждым годом росло количество таких проектов, улучшались их характеристики. В начале 1993 года последние аналоговые системы окончательно были сняты с рассмотрения. А в мае 1993 года 4

компании объединились и представляли единый проект, который и стал основой стандарта цифровой телевизионной системы в США.

В Европе в 1993 году был принят проект DVB (Digital Video Broadcasting).

Уже, начиная с 1995 года, во всех странах мира началось активное внедрение цифрового спутникового и кабельного телевидения.

С 1998 года, в буквальном понимании, началась цифровая технологическая революция в сфере телерадиовещания и связи. В Европе началось внедрение новейшего в эфирном телерадиовещании стандарта DVB-T. Первое вещание началось в 1998 году, в Швеции и Великобритании. В Германии цифровое эфирное вещание началось несколько позже – в 2002 году, но уже в 2003-м в Берлине, впервые в Европе, было отключено аналоговое телевидение. В настоящее время широкое распространение получают технологии формирования телевизионных систем сверхвысокого разрешения 4K и 8K, а также 3D систем различного типа (стереотелевидение S3D и многоакурсное M3D). Граничная частота спектра таких сигналов значительно выше по сравнению с телевизионным сигналом стандартного разрешения. В связи с этим, остро встает вопрос разработки новых методов сжатия видеосигнала.

Целью данного пособия является ознакомление с принципами организации, со стандартами и методами построения сетей цифрового телевидения.

Пособие одобрено решениями кафедры «Телекоммуникаций» Института математики и высоких технологий (ИМиВТ) Российско-Армянского университета (РАУ) Республики Армения, Ученым советом ИМиВТ и Научно-техническим советом РАУ.

Автор выражает благодарность рецензентам: заведующему кафедрой «Радиоустройств» Национального Политехнического Университета Армении к.т.н., доценту О.А. Гомцяну и декану факультета «Радиотехники и систем связи» Национального Политехнического Университета Армении к.т.н., доценту М.Ц. Айвазяну за критические замечания.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Впервые радиопередача была осуществлена Поповым и Маркони в конце XIX века.

В развитии телевидения выделяются следующие этапы:

- зарождение идей до 1920 года, (открытие фотоэлектрического эффекта Беккерелем, изобретение диска Нипкова, создание первой электронно-лучевой трубки Розингом в 1907 году).
- эпоха механического телевидения до 1935 года.
- электронное черно-белое телевидение до 1966 года.
- электронное цветное телевидение и телевидение высокой четкости (ТВЧ).
- цифровое телевидение.

Регулярное вещание оптико-механической системы телевидения с разложением на 40 строк началось в России в 1931 году. Впервые электронное телевизионное вещание было осуществлено в Лондоне в 1936 году, затем – во Франции, Германии и Италии. В США первое вещание состоялось в 1939 году. Первая коммерческая система цветного телевидения была запущена в США в 1953 году.

Основным назначением телевизионных систем (ТВС) является формирование на экране воспроизводящего устройства изображения передаваемых сцен в реальном времени или с использованием видеозаписи, как правило, на значительном от них расстоянии. Блок-схема ТВС приведена на Рис. 1.

Оптический сигнал через систему зеркал проецируется на фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), где преобразуется в электрический сигнал, после чего поступает в тракт передачи сигнала. На приемном конце сигнал подвергается обработке и подается на электронно-лучевую трубку. То есть весь процесс передачи изображения делится на три части:

- формирование электрического сигнала из визуального;

- передача этого сигнала по каналу;
- получение визуального сигнала из электрического.



Структурная схема ТВС

Рис. 1. Структурная схема ТВС.

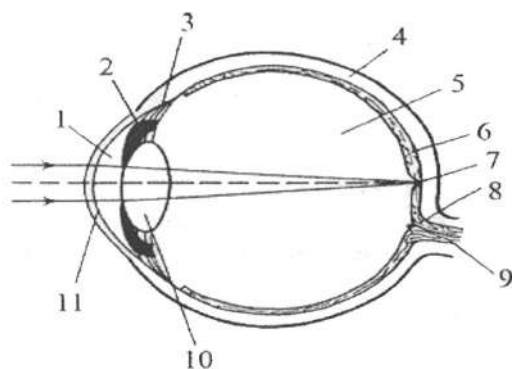
В данной последовательности и будет построен учебный курс. Мы рассмотрим методы формирования электрического сигнала, способы их передачи и приема. Составной частью телевидения является и передача на расстояние звукового сопровождения.

2. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ И СИГНАЛОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

2.1. ФИЗИКА СВЕТОВОГО И ЗВУКОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

Поскольку восприятие человеком изображения и звука связано с особенностями его зрения и слуха, рассмотрим вкратце специфику и механизмы их построения.

Наиболее привычным для человека носителем информации об окружающей среде является видимое излучение [2.1] (область спектра электромагнитных колебаний с длиной волны примерно от 360–760 нм), которое непосредственно воспринимается глазом человека (Рис. 1).



Глазное яблоко человека:
1 – передняя камера, 2 – радужная оболочка, 3 – мышцы, 4 – склера,
5 – стекловидное тело, 6 – сетчатка,
7 – желтое пятно, 8 – слепое пятно,
9 – зрительный нерв, 10 – хрусталик,
11 – роговица

Рис. 1. Глазное яблоко человека.

Глазное яблоко представляет собой шарообразное тело диаметром около 24 мм, окруженное сравнительно твердой оболочкой – склерой, переходящей в передней части глаза в роговицу. Благодаря хрусталику, имеющему форму двояко-выпуклой линзы и роговице, на сетчатке формируется перевернутое изображение предметов. С передней стороны хрусталик прикрывается радужной оболочкой, образующей зрачок и управляющей апертурой глаза, т.е. величиной раскрытия зрачка. Хрусталик благодаря действию удерживающих его мышц обладает способностью изменять радиусы кривизны передней и задней поверхностей, изменяя фокусное расстояние и фокусировку изображения на сетчатке. Это свойство глаза называют «аккомодацией». Светочувствительными элементами глаза являются колбочки (более шести миллионов штук), отвечающие за цветное восприятие и палочки (сто тридцать миллионов), обладающие большей световой чувствительностью, но не распознающие цвет.

Колбочки концентрируются в основном в области желтого пятна на участке сетчатки, обладающей свойствами наилучшего видения. Палочки сконцентрированы на периферии и являются аппаратом сумеречного видения.

Светочувствительные элементы глаза преобразуют световую энергию в нервные импульсы, частота следования которых определяется интенсивностью падающего света, которые через нервные волокна и зрительный нерв передаются в зрительные центры головного мозга. Световой динамический диапазон глаза равен миллиарду. Способность глаза приспосабливаться к различным яркостям наблюдаемого изображения называется «адаптацией». Время темновой адаптации глаза порядка 30–50 минут, световой – 8–10 минут.

Рассмотрим теперь некоторые характеристики глаза, представляющие непосредственный интерес при изучении нашего курса:

- разрешающая способность глаза оценивается тем минимальным углом, под которым раздельно видны две рядом расположенные детали изображения, разделенные промежутком, имеющим яркость, отличную от яркости рассматриваемых деталей. Этот угол называют «углом разрешения глаза». Например, для различения двух деталей изображения разомкнутого

кольца необходимо, чтобы на сетчатке оставалось некоторое пространство, возбуждение которого отлично, чем на участках a' и b' (Рис. 2).

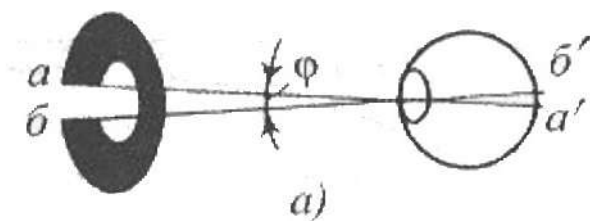


Рис. 2. Определение угла разрешения.

Минимальное значение угла и является углом разрешения. В некоторых случаях вводят понятие остроты зрения – величины, обратной углу разрешения.

К числу принципиальных физических факторов, влияющих на разрешающую способность глаза, относится дифракция света, дискретность структуры сетчатки и пр.

Известно также, что при прослеживании глазом движущихся объектов острота зрения быстро ухудшается с увеличением угловой скорости объекта наблюдения.

Отсюда следует очень важный вывод, что для динамических (движущихся) объектов дискретизация может быть более грубой.

Характеристики разрешающей способности глаза являются основными для расчета необходимой разрешающей способности ТВС.

- бинокулярное зрение позволяет человеку воспринимать пространство трехмерным, хотя изображение на сетчатке двумерное. Существенную роль в объемном восприятии играют аккомодация, восприятие перспективы, относительное перемещение объектов, образование теней и т.д. Глаза при фиксации объектов поворачиваются (конвергируют) так, чтобы изображение формировалось в области желтого пятна. Углы конвергенции и позволяют получить информацию об удалении объекта. Для примера рассмотрим построения, приведенные на Рис. 3.

Основная роль в ощущении объемности связана с различием изображений на сетчатках правого и левого глаза. Чем больше по дальности разнесены объекты, тем больше отличаются отрезки a_1b_1 и a_2b_2 . Порог стереозрения можно выразить как минимальную разность углов α_1 и α_2 . Этот порог составляет $10''$ – $30''$. Этот механизм лежит в основе объемного (стереоскопического) телевидения.

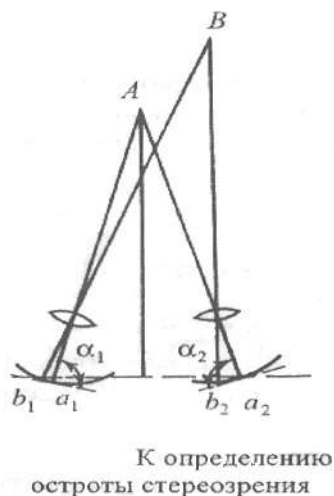


Рис. 3. К определению остроты зрения.

- восприятие мерцающих изображений.

В условиях наблюдения телевизионного изображения глаз человека работает в режиме воздействия на него периодически изменяющихся световых потоков. Установлено, что при частоте мерцания выше 46 Гц человек воспринимает изображение как слитное. Это связано с инерционностью зрения человека. Это число рассчитано для центральной зоны наилучшего видения глаза и определяется инерционностью возбуждения колбочек. Для широкоформатных телевизоров с большим экраном неизбежно возбуждаются и периферийные участки сетчатки, поэтому частота мерцаний должна быть выше. Исходя из этого и из-за помех, вызываемых влиянием электросети, первые телевизионные стандарты предписывали частоту кадров 50 Гц в Европе и 60 Гц в США.

- цветовое зрение.

Человеческое зрение способно различать семь различных цветов в спектре оптического диапазона. Приведем их в порядке возрастания частоты спектра: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый.

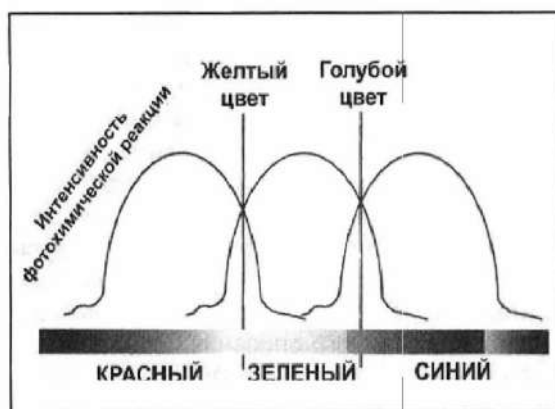
Колбочки содержат родопсин (зрительный пурпур), который при воздействии света распадается на витамин А и белок. Освобождающаяся при этом энергия создает сигнал в нервном волокне. Цветовое трехмерное пространство приведено на Рис. 4.



а)Цветовое трехмерное пространство;

б)Цветовое трехмерное пространство, наблюдаемое в телевизионном вектроскопе

Рис. 4. Цветовое трехмерное пространство.



Фотохимические процессы в клетках сетчатки

Рис. 5. Фотохимические процессы в клетках сетчатки.

Поскольку наши колбочки содержат три типа различных светочувствительных химических реагентов, человек воспринимает только три цвета (красный, зеленый и синий), а остальные являются их комбинацией (Рис. 5).

Рассмотрим далее механизмы восприятия звука человеческим организмом [2.2].

Звуковые волны представляют собой изменение давления воздуха в атмосфере.

Достигая уха человека, они вызывают колебания барабанной перепонки, которые через механизм трех косточек – молоточка, наковальни и стремечка – передаются на мембрану овального окна в улитке. В жидкости, заполняющей улитку, образуются стоячие волны, вызывающие вибрацию базальной мембраны улитки. Колебания последней через орган Корти передаются на более высокие уровни слухового отдела нервной системы. Устройство слухового аппарата человека приведено на Рис. 6.

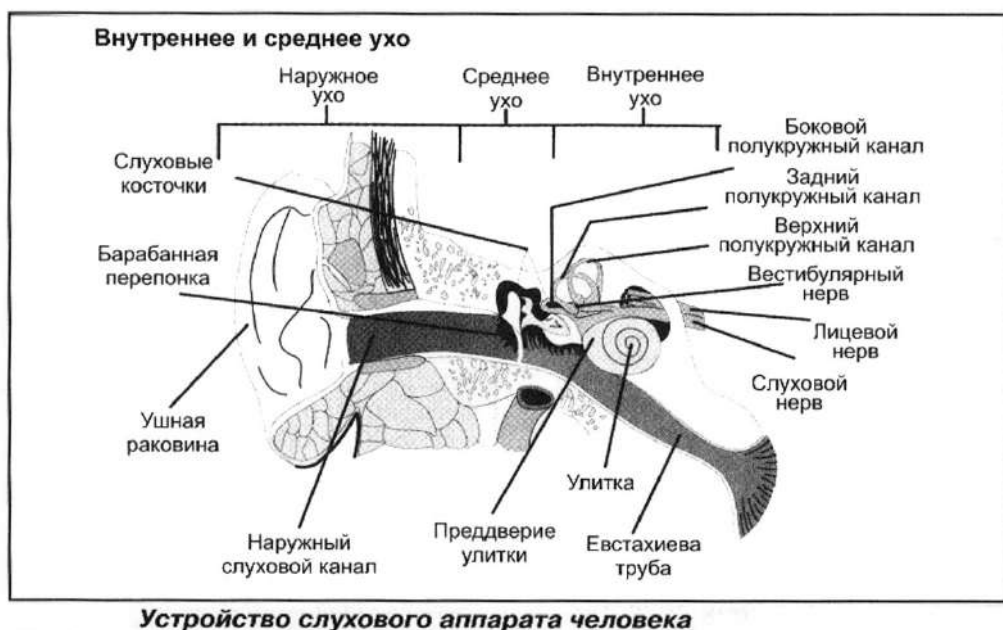


Рис. 6. Устройство слухового аппарата человека.

Улитка и ее элементы работают как преобразователь «частота-положение», в котором положение максимума амплитуды вибраций базальной

мембраны зависит от частоты возбуждения. При этом более сильные сигналы будут маскировать (подавлять) более слабые, попадающие в тот же частотный диапазон. Именно из-за этого мы не можем слышать чей-то шепот, когда кто-то кричит рядом. Эффект маскирования наблюдается и во времени, когда сильный звук подавляет предыдущий (маскирование назад) или предшествующий (маскирование вперед). Длительность маскирования назад составляет 5–50 мсек, а вперед – 50–200. Явление маскирования, как мы увидим в дальнейшем, важно с точки зрения компрессии динамического диапазона звука.

Динамический диапазон отношения интенсивности звуков составляет 140 dB.

2.2. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В этом подразделе мы рассмотрим основные принципы анализа изображения в формирователе телевизионного сигнала [2.1].

Для формирования изображения используется принцип разбиения изображения на отдельные элементы, которые могут передаваться параллельным или последовательным путем, с использованием оптических и электрических каналов связи.

Параллельная передача сигналов используется только при передаче на короткие расстояния. Один из способов – при помощи пучка световодов, на входном торце проецируется при помощи зеркал оптическое изображение сцены. Разбиение изображения на элементы реализуется за счет мозаичной структуры торца оптоволокон, по каждому из которых световой поток передается к выходному торцу, где воспроизводится исходное изображение. Вместо оптических световодов на входе и выходе может осуществляться преобразование свет-электрический сигнал и обратно.

Обычно для передачи изображения используется один канал связи и способ последовательного преобразования и передачи сигналов.

Рассмотрим данный метод на примере диска Нипкова, где используется оптико-механический способ разложения изображения с помощью непрозрачного диска с отверстиями, расположенными по спирали (Рис.1).

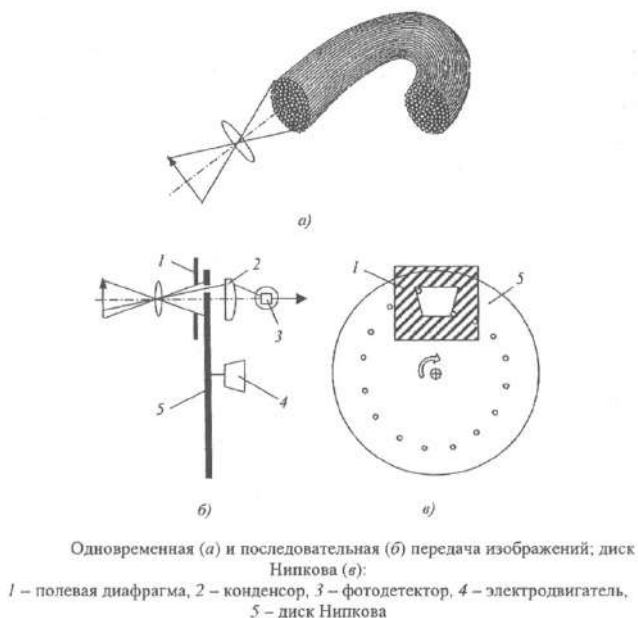


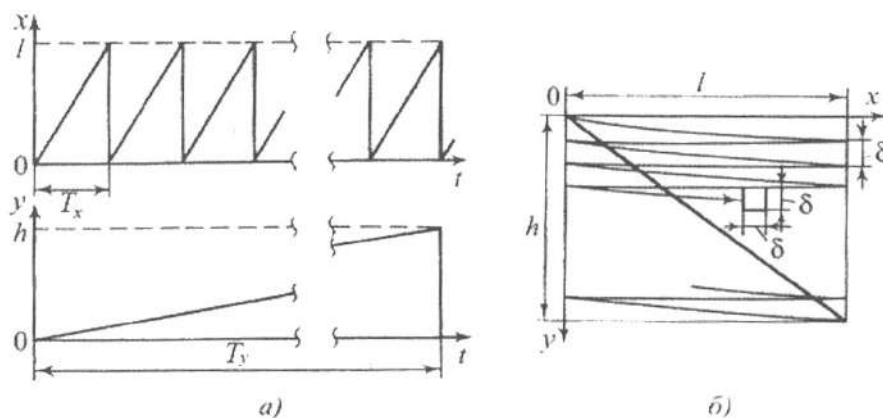
Рис. 1. Диск Нипкова.

Расстояния по дуге между отверстиями составляют равную угловую величину, а смещения по радиусу от периферии к центру равны диаметрам отверстий. Оптическое изображение формируется в плоскости диска, вращающегося при помощи электродвигателя. В плоскости изображения, ограниченного полевой диафрагмой, в любой момент времени находится только одно отверстие – элемент разложения. Далее световой поток с помощью конденсора направляется на фотодетектор, где преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный значению освещенности соответствующего элемента разложения. Обеспечив синхронность и синфазность вращения дисков на передающей и приемной сторонах, с помощью обратного преобразователя и аналогичного диска, можно синтезировать изображение на приемной стороне. Ясно, что количество строк в такой системе ограничено.

К основным характеристикам разложения изображения относят количество строк разложения, траекторию разложения, формат раstra и количество полных изображений, передаваемых за единицу времени (частоту кадров).

Перемещение разлагающего элемента в процессе анализа и синтеза изображения по определенному закону называют «разверткой». Последняя может осуществляться с помощью электронных пучков или электрической коммутации светочувствительных элементов.

Последовательность коммутации элементов изображения, или траектория разложения, может быть различной. В телевидении наиболее распространенными являются построчное (Рис. 2) и чересстрочное разложение с постоянными скоростями движения по горизонтали и вертикали.



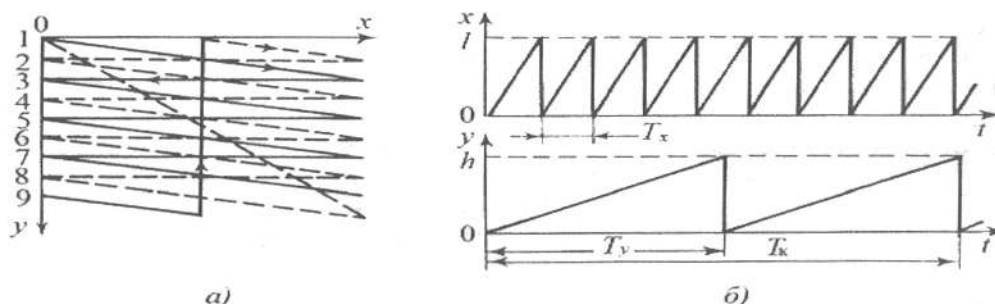
Построение построчного раstra

Рис. 2. Построение построчного раstra.

На Рис. 2,б приведено построение совокупности прямого и обратного ходов разлагающего элемента (телевизионного раstra) для построчной развертки, где T_x и T_y – это, соответственно, время перемещения элемента разложения от начала ($x=0$, $y=0$) до конца строки ($x=l$) и кадра ($y=h$).

Время передачи каждого элемента изображения будет одинаковым. В системе вещательного телевидения применяются растры с отношением к ширины (l) к высоте (h) $4/3$ или $16/9$.

Более эффективно применение чересстрочных растров, где передача всего кадра изображения производится не за один, а за несколько циклов, например, за два (Рис. 3).



Построение чересстрочного растра

Рис. 3. Построение чересстрочного растра.

Для его реализации при прочих равных условиях вертикальную скорость отклонения увеличивают в два раза. Полное изображение будет передано за две развертки: первая формирует совокупность нечетных строк (первое поле), вторая – четных (второе поле). При этом полное число строк в кадре

$$Z = n (z+0.5),$$

где z – число целых строк в поле,

n – кратность чересстрочного разложения.

Таким образом, при реализации чересстрочного разложения на два поля полное число строк должно быть нечетным.

Разумеется, при синтезе изображения траектория разложения должна соответствовать последней на передающей стороне или необходимо использовать пространственно-временные преобразования видеосигнала.

С учетом того, что реально для перемещения разлагающего элемента в начало строки и кадра требуется вполне определенное время, периоды передачи T_x , T_y и кадра T_k делятся на две части: активные, в течение которых передается информация непосредственно об изображении, и пас-

сивные, в течение которых осуществляются обратные ходы разлагающего элемента и, как увидим ниже, передается дополнительная информация, обеспечивающая функционирование различных элементов ТВС.

Выбор количества строк разложения Z_{opt} или числа элементов в растре

$$n_{\text{opt}} = kZ_{\text{opt}}^2,$$

базируется на свойствах глаза по различению мелких деталей изображения.

Две точки, воспроизводимые на телеэкране, будут восприниматься раздельно, если они расположены, по крайней мере, через строку раstra, т.е. на расстоянии не менее 2δ (Рис.4) и просмотре под углом $\gamma \geq \varphi_{\text{min}}$, где φ_{min} – угол разрешения глаза.



Рис. 4. К выбору числа строк разложения.

С учетом малости угла можно записать

$$\gamma = 2\delta/a = 2h/aZ,$$

где a – расстояние от глаза наблюдателя до экрана.

При этом

$$Z_{\text{opt}} = 2h/a \varphi_{\text{min}}$$

и зависит от относительного расстояния рассматривания изображения a/h . Обычно это значение составляет 3–12, что соответствует Z_{opt} от 1500 до 380 строк. Для формата $k=4/3$ предпочтительным является соотношение $a/h=6$, что соответствует значению $Z_{\text{opt}}=760$.

Поскольку максимальная частота сигнала изображения

$$f_{\max} = 0.5 kZ^2 f_{\text{кадра}}$$

зависит от количества строк, стремятся, по возможности, уменьшить их число.

Исходя из этого, европейский стандарт разложения предусматривает 625 строк, американский - 525, а стандарты телевидения высокой четкости (ТВЧ) – 1250 и 1125 ($a/h=3$).

В телевидении изображение воспроизводится в виде последовательной серии статических кадров. Выбор частоты кадров определяется двумя факторами:

- условием восприятия слитности движения;
- необходимостью превышения критической частоты мельканий.

Опыт показывает, что для первого фактора достаточна передача со скоростью 16–20 кадров в секунду. Для превышения же критической частоты мельканий (46 Гц) в телевидении увеличивают частоту «вспышек» экрана за счет использования чересстрочной развертки.

Таким образом, частота полей в европейском стандарте выбрана 50 Гц, а в американском – 60 Гц.

Как было отмечено ранее, критическая частота мельканий для периферийных участков сетчатки глаза выше, чем для центральных. Поэтому в современных широкоформатных телевизорах используются мультиплексоры, повышающие частоту воспроизведения.

Обратимся теперь к системе воспроизведения цветного изображения. Как уже упоминалось, системы цветного телевидения основаны на трехкомпонентной теории цветового зрения. В связи с этим, наряду с дискретизацией изображения в пространстве и времени, в системах цветного телевидения производят разделение изображения на три цветоделенных.

Из многочисленных методов формирования сигналов цветного телевидения рассмотрим два, основанных на последовательной во времени и одновременной передаче цветоделенных изображений.

В последовательной системе цветоделение осуществляется с помощью вращающегося между плоскостью изображения и объективом

диска со светофильтрами красного, зеленого и синего цвета. Если на приемном конце синхронно и синфазно производить смену светофильтров, расположенных между экраном и зрителем, то он будет видеть цветное изображение передаваемой сцены. Однако при этом частоту смены цветоделенных изображений приходится выбирать в три раза больше, чем в черно-белой ТВС, что приведет при сохранении числа строк к трехкратному расширению полосы частот передаваемого сигнала. Поэтому данная система имеет недостатки:

- несовместимость с действующими ТВС;
- появление цветных окантовок при быстрых перемещениях объектов в поле изображения;
- механическое устройство смены цветов применяется только в ТВС специального назначения.

В системе одновременного типа цветоделенные изображения формируются светоделительными устройствами (Рис. 5).

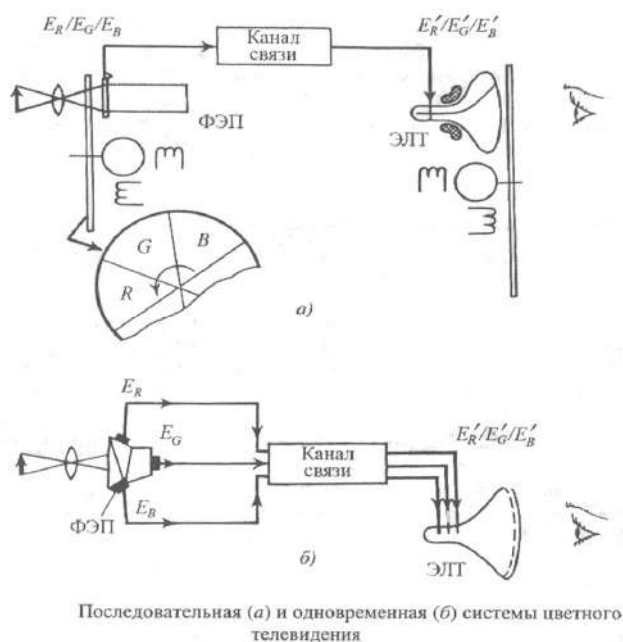


Рис. 5. Последовательная и одновременная системы.

При этом передача их по каналам связи связана с особенностями их обработки в передающей и приемной частях.

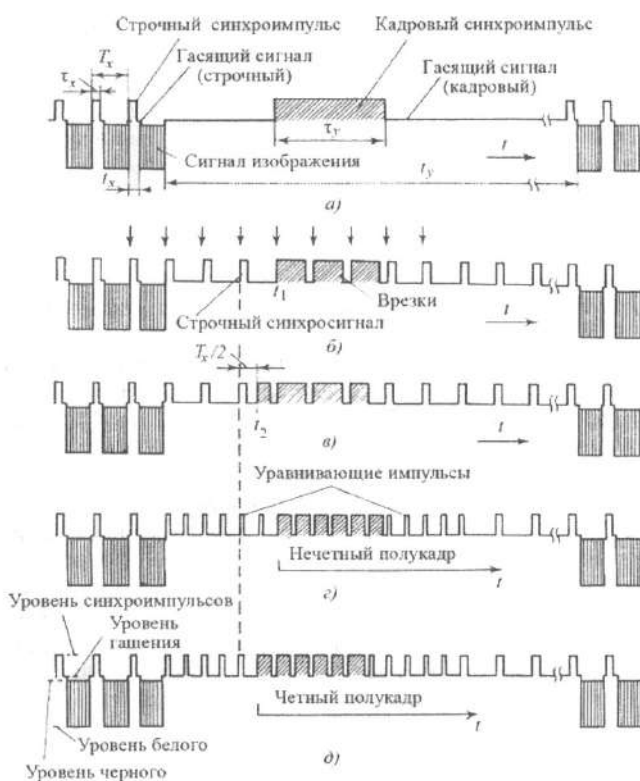
Обеспечение колориметрически правильной цветопередачи связано с выбором спектральных характеристик фотоэлектронного преобразователя (ФЭП), устройства цветоделения с учетом спектральной характеристики источника освещения и функции сложения цветовой системы кинескопа. Неизбежно возникающие при этом ошибки цветопередачи уменьшают при помощи цветокорректора, который представляет собой аналоговое или цифровое устройство, реализующее матричное преобразование сигналов изображения. Для поддержания синхронного режима работы различных узлов ТВС необходимо формирование синхроим-пульсов, обеспечивающих жесткую привязку между соответствующими событиями (началом строки, поля, кадра и др.). Система синхронизации должна обеспечивать высокую помехоустойчивость, так как нарушение последней может привести к изменению геометрического положения элементов изображения в процессе его синтеза, что, естественно, существенно исказит изображение.

Основные фрагменты системы ТВС приведены на Рис. 6.

Наряду с генерированием синхросигналов необходимо формировать также гасящие импульсы, предназначенные для запираания электронных пучков преобразователей изображения и кинескопов во время обратного хода развертки, иначе произойдет высвечивание траектории пучка по экрану во время обратного хода как по горизонтали, так и по вертикали. Уровень гасящих импульсов при этом должен быть равен или ниже уровня «черного» в сигнале изображения.

Синхросигналы и гасящие импульсы служат для управления развертывающими устройствами, устройствами фиксации уровней сигнала изображения, кодеками, генераторами испытательных таблиц.

Для обеспечения синхронизации в ТВС используется синхрогенератор, устанавливающий основные ритмы работы узлов и формирующий с помощью высокостабильного источника опорных колебаний сетку основных частот – частоты следования элементов, строк, кадров и др. Опорную частоту выбирают, как правило, кратной частоте строк или колебаний цветовой поднесущей.



Формирование структуры сигнала синхронизации приемников

Рис. 6. Формирование структуры синхросигнала приемника.

Сигналы синхронизации приемников передаются вместе с сигналом изображения.

Выбор длительности кадрового импульса намного больше строчного и обеспечивает возможность простого разделения их на приемной стороне. При этом во время действия кадрового гасящего импульса строчные синхроимпульсы отсутствуют, что может привести к потере синхронизации строчного синхрогенератора приемника с возможным отклонением частоты его автоколебаний. При возобновлении строчных синхроимпульсов из-за переходного процесса несколько первых строк раstra могут быть искажены. Для устранения данного эффекта во время действия кадрового гасящего импульса в виде врезок в него формируются строчные синхросигналы.

При чересстрочном разложении кадровые синхроимпульсы различны для начала четных и нечетных полей, что приводит к ошибкам установления момента начала кадрового импульса. Для устранения этого эффекта до и после действия кадрового импульса вводят так называемые уравнивающие импульсы с удвоенной строчной частотой. Амплитуда синхроимпульсов составляет до 30% от полного размаха видеосигнала. В системах цветного телевидения вводятся дополнительные синхросигналы цветовой синхронизации, частоты и фазы цветовой поднесущей.

Методы преобразования светового сигнала в электрический с использованием фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и приборов с зарядовой связью (ПЗС)

Основными характеристиками ФЭП являются чувствительность, спектральная и разрешающая способность. Различают ФЭП мгновенного действия и с накоплением заряда [2.1].

В свою очередь, можно выделить две группы ФЭП мгновенного действия:

- устройства, в которых вся световая энергия концентрируется на одном элементе изображения и затем преобразуется в электрический сигнал, ФЭП с «бегущим световым пучком»;
- устройства, на входе которых световой поток соответствует всей передаваемой сцене, а формирование элемента изображения происходит посредством его пространственного диафрагмирования в оптическом или электронном звене.

Первый метод используется в основном для преобразования изображения транспаранта (диапозитива, кинокадра) и для регистрации натуральных сцен.

Устройства 2-ого типа использовались в ТВС на начальном этапе ее развития.

В качестве примера рассмотрим принцип действия такого ФЭП (Рис. 7).

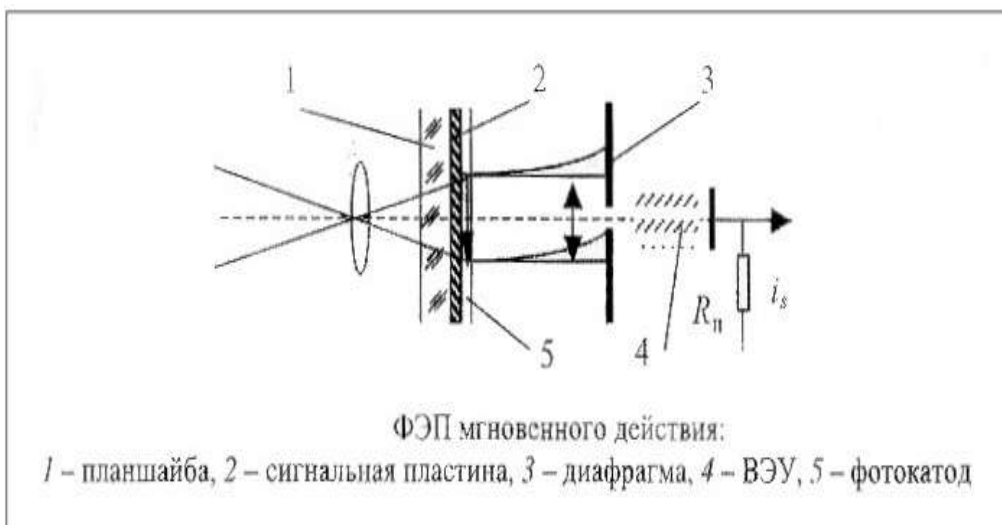


Рис. 7. ФЭП мгновенного действия.

На вход такого преобразователя поступает световой поток, соответствующий передаваемой сцене и с помощью полупрозрачного фотокатода преобразуется в электрический поток. С помощью магнитного и электрических полей, создаваемых фокусирующей катушкой и ускоряющего электрода, изображение фокусируется в плоскости диафрагмы, отверстие которой является апертурой, формирующей элемент изображения. Далее поток электронов попадает на вход вторично-электронного умножителя. Развертка осуществляется отклонением электронного изображения относительно отверстия диафрагмы. Таким образом, через отверстие диафрагмы последовательно, элемент за элементом, проходят электроны, соответствующие различным участкам передаваемой сцены.

Поскольку в формировании сигнала изображения на нагрузке в любой момент времени принимает участие только $1/n$ -я часть (n – число элементов разложения) электронного потока с фотокатода, чувствительность такого преобразователя низка.

Для того чтобы использовать всю световую энергию, падающую на элемент ФЭП, при формировании сигнала предложена идея накопления заряда. Увеличение сигнала в этом случае пропорционально числу эле-

ментов разложения и при $k=4/3$, $z=625$ строк, ток сигнала увеличится примерно в 500000 раз ($n=kz^2$).

К числу ФЭП, реализованных на принципе накопления заряда, относятся телевизионные передающие трубки, например, видикон и его дальнейшие модификации.

Рассмотрим принцип формирования сигнала в трубках подобного типа на примере видикона, устройство которого приведено на Рис. 8.

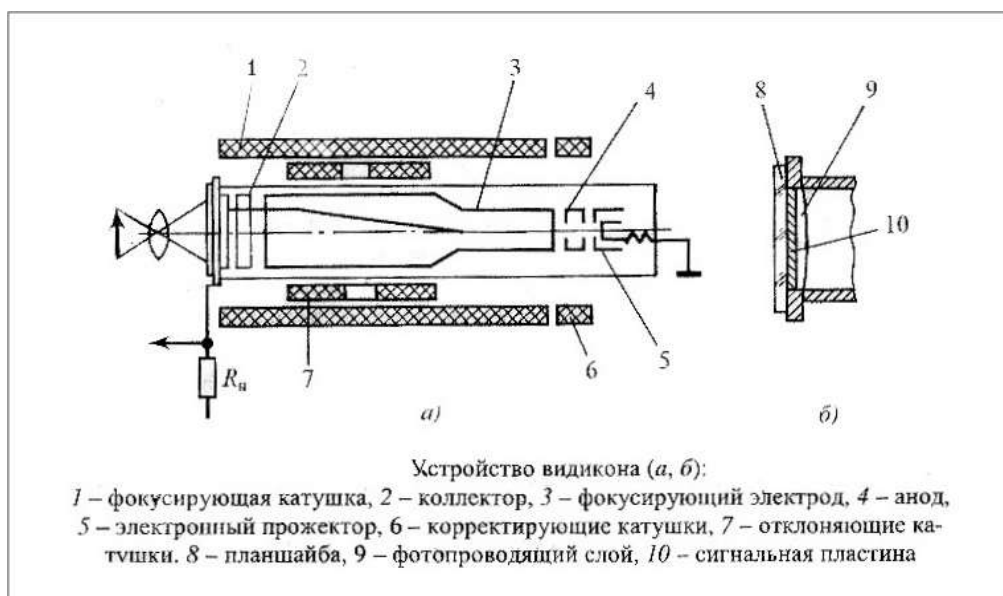
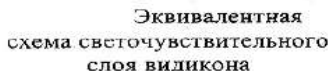


Рис. 8. Устройство видикона.

Основой конструкции видикона является цилиндрическая колба, с торца которой на фотопроводящий слой проецируется изображение сцены. На стеклянную пластину нанесен прозрачный для проходящего света тонкий слой проводника – сигнальная пластина, соединенная с кольцевым электродом, через который снимается выходной сигнал изображения. Непосредственно на сигнальную пластину наносится светочувствительный слой трехсернистой сурьмы, являющийся для коммутирующего пучка мишенью, преобразующей падающий световой поток в потенциальный рельеф. Использование трехсернистой сурьмы позволяет полу-

Фокусирующая катушка совместно фокусирующим электродом обеспечивают фокусировку пучка в плоскости мишени. Отклонения пучка по вертикали и горизонтали осуществляется двумя парами отклоняющих катушек, **питаемых** токами пилообразной формы с частотой строк и полей. Корректирующие катушки обеспечивают параллельное оси трубки направление коммутирующего пучка.



29

(трехсернистой сурьмы). Конденсаторы во время действия коммутирующего пучка заряжаются током до напряжения $U_{\text{сп}}$.

В течение остального времени (длительность кадра) емкость разряжается током, проходящим по цепи, обозначенной буквой P (разряд). Скорость разряда определяется постоянной времени – R_3C_3 . При увеличении освещенности постоянная времени уменьшается, и конденсатор за время кадра разряжается быстрее. Ток заряда конденсатора (ток в нагрузке) в момент действия коммутирующего пучка зависит от напряжения на конденсаторе, а, следовательно, и от освещенности.

Как мы видим, изображение воздействует на мишень в течение всего кадра, а не только в момент воздействия коммутирующего пучка, что приводит к накоплению заряда, а, следовательно, к увеличению чувствительности.

Рассмотрим теперь преобразователи изображения на основе ПЗС.

В ПЗС реализуется принцип направленного перемещения зарядов вдоль цепочки элементарных накопителей.

К достоинствам ПЗС структур относятся:

- возможность непосредственного преобразования светового потока в зарядовые пакеты с сохранением данной информации.
- способность направленной передачи зарядовой информации и преобразование ее в сигнал изображения при точном соблюдении геометрии точечного раstra.
- возможность обработки информации непосредственно на матрице.
- высокое быстродействие, степень интеграции и надежность, малая мощность потребления и габариты.

Основным элементом ПЗС является МОП-конденсатор, сформированный на кремниевой подложке p -типа (Рис. 10).

В качестве диэлектрика МОП-конденсатора используется диоксид кремния, а второй обкладки – поликремневый электрод. При подаче положительного смещения на электрод относительно подложки приповерхностная зона обедняется основными носителями – дырками, а не основные носители – электроны, накапливаются под электродом. Расположим теперь два МОП-конденсатора в непосредственной близости друг от друга (Рис. 11).

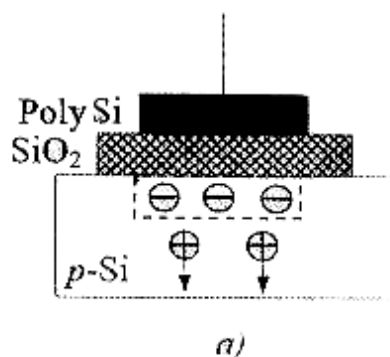


Рис. 10. Структура МОП-конденсатора.

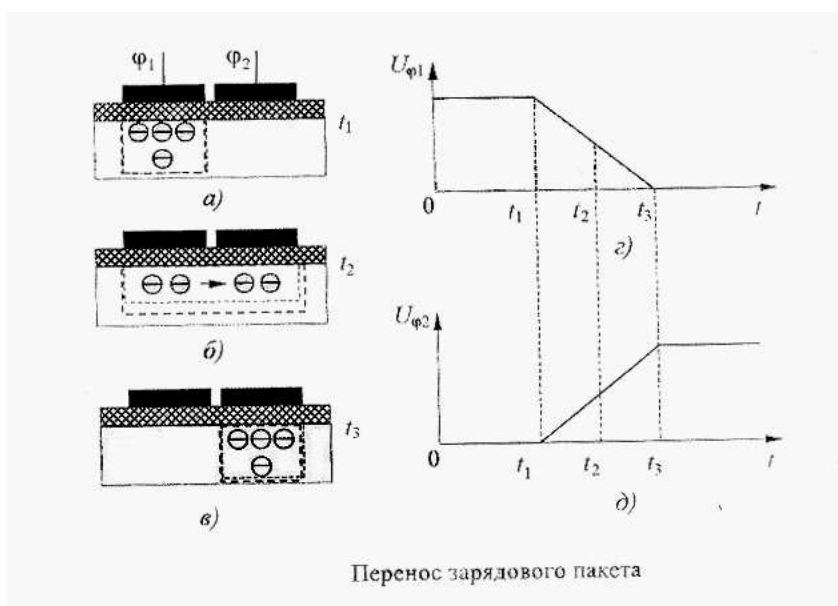


Рис. 11. Перенос зарядового пакета.

До момента времени t_1 положительный потенциал подан на первый электрод и накопленный зарядовый пакет находится под ним. В течение промежутка t_1-t_2 положительный потенциал снимается с первого электрода и подается на второй. При этом зарядовый пакет перераспределяется между электродами. В момент t_3 весь зарядовый пакет локализуется под вторым электродом. Таким обра-

зом, коммутируя потенциал на электродах, мы осуществляем зарядовую связь между двумя МОП-конденсаторами.

Регистр ПЗС изображен на Рис. 12, где ряд МОП-конденсаторов управляются при помощи трех потенциалов, сдвинутых во времени друг относительно друга. При этом организуется направленный перенос группы зарядовых пакетов у поверхности полупроводника.

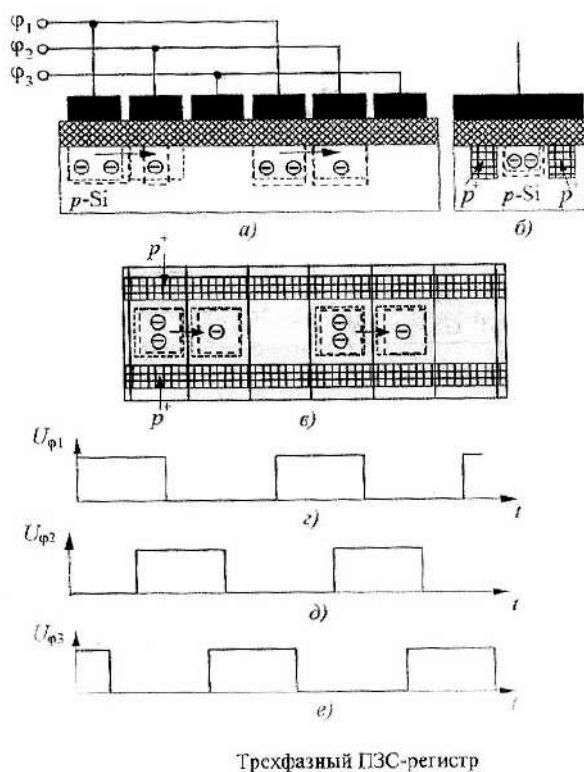
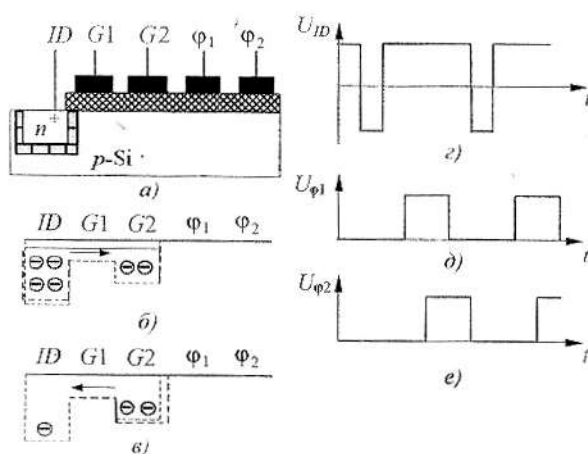


Рис. 12. Трехфазный регистр ПЗС.

Для ограничения растекания зарядового пакета вдоль поверхности в направлении, перпендикулярном направлению переноса, используются так называемые стоп-каналы, реализуемые легированием узких областей полупроводника вдоль направления переноса (вид сверху Рис. 12в).

Для построения различных устройств на основе ПЗС необходимо также наличие узлов, позволяющих вводить в ПЗС и выводить из него информацию. На Рис. 13 изображено двухзатворное устройство ввода заряда в ПЗС.



Ввод зарядового пакета в ПЗС

Рис. 13. Ввод зарядового пакета в ПЗС.

Оно содержит входную диффузионную область n⁺-типа ID, образующую p-n переход с подложкой p-типа, а также два затвора G1 и G2, на которые поданы постоянные положительные смещения. Далее следуют электроды обычного ПЗС-регистра. На входную область подаются короткие отрицательные импульсы, во время действия которых входной p-n переход раскрывается и обедненные области под затворами насыщаются электронами. По окончании импульса электроны из-под этих затворов экстрагируются обратно, за исключением части заряда, оставшейся под затвором G2, значение которой пропорционально разности потенциалов между затворами. Далее этот заряд поступает под первый электрод и переносится обычным образом. Следовательно, меняя потенциалы на двух затворах, можно вводить в регистр ПЗС заряд заданного размера. Пода-

вая на какой-либо из затворов аналоговый сигнал, в ПЗС регистр можно вводить заряды, пропорциональные значениям входного напряжения. Этот прием используется для ввода сигнала в дискретно-аналоговые линии задержки.

Для преобразования зарядового пакета в выходное напряжение служит выходная емкость. Один из вариантов реализации такого устройства с так называемой плавающей диффузионной областью приведен на Рис. 14.

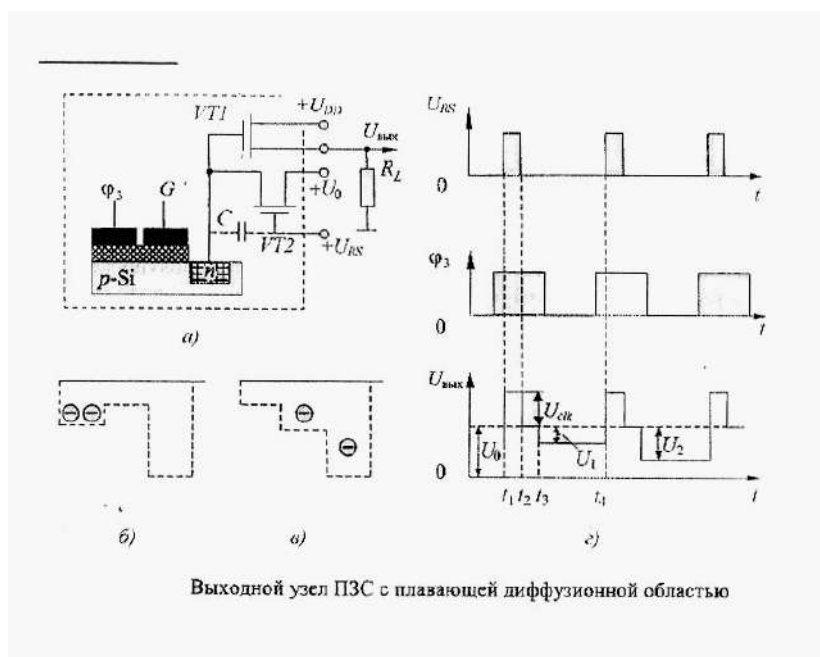


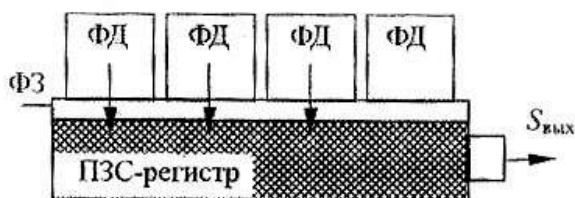
Рис. 14. Выходной узел ПЗС с плавающей диффузионной областью.

Устройство располагается в конце ПЗС регистра и содержит разделительный затвор G и диффузионную область n-типа, образующую обратнo смещенный p-n переход. К диффузионной области также подключены гальванометрический транзистор и транзистор сброса. В промежутке времени t_1 – t_2 транзистор сброса открыт импульсом $U_{\text{ГС}}$ и емкость обратнo смещенного p-n перехода плавающей диффузионной области заряжается до напряжения U_0 . Напряжение

на затворе G выбрано таким образом, чтобы зарядовый пакет, находящийся под третьим электродом ПЗС регистра Φ_3 , не попадал в диффузионную область.

В момент времени t_3 зарядовый пакет выталкивается из-под третьего электрода регистра в диффузионную область, потенциал которой уменьшается на $U_1 = Q_0/C_{\text{вых}}$, где $C_{\text{вых}}$ – емкость диффузионной области. Из-за наличия паразитной емкости C часть импульса U_{rs} проникает в выходной сигнал в виде наводки U_{clk} . Преобразователи на ПЗС делятся на линейные и матричные.

Линейные преобразователи могут передать только одну строку изображения. Для передачи кадра используется либо перемещение передаваемого изображения относительно линейки ПЗС (система передачи документов), либо его перемещение относительно передаваемой сцены (спутниковые системы сканирования Земли). Рассмотрим принцип действия линейного ПЗС с отдельными секциями накопления и считывания зарядовых пакетов (Рис. 15).



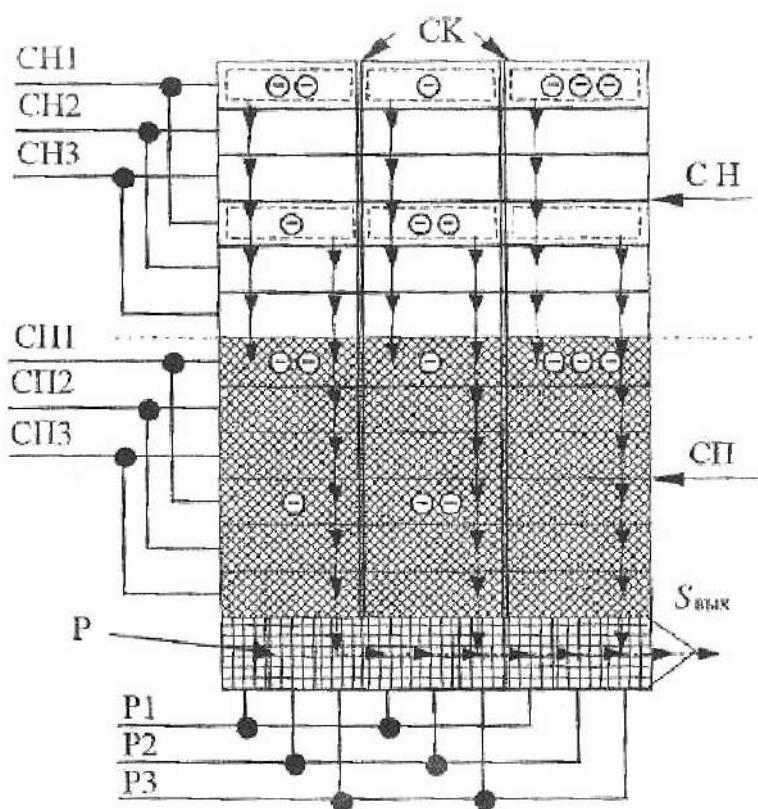
Линейный ПЗС с отдельными секциями накопления и считывания

Рис. 15. Линейный ПЗС с отдельными секциями накопления и считывания.

В таком ПЗС в качестве накапливающих ячеек используются обратно-смещенные фотодиоды (ФД), а для переноса зарядовых пакетов – ПЗС-регистр, изолированный от падающего света. Фотодиоды от регистра отделяет специальный электрод – фотозатвор (Φ_3). В течение времени накопления Φ_3 находится под потенциалом, пре-

пятствующим перетеканию зарядовых пакетов из ФД в регистр. В момент считывания на ФЗ подается короткий положительный импульс и заряд переносится в регистр. В течение следующего периода накопления в регистре осуществляется сдвиг накопленных зарядов к выходу.

Для телевидения особый интерес представляют матричные ПЗС, позволяющие формировать видеосигнал, соответствующий двумерному распределению освещенности. Исторически первыми были разработаны матричные ПЗС с кадровым переносом (Рис. 16).



Матричный ПЗС с кадровым переносом

Рис. 16. Матричный ПЗС с кадровым переносом.

Матричный ПЗС с кадровым переносом содержит светочувствительную секцию накопления (СН), состоящую из вертикальных ПЗС-регистров, отделенных друг от друга областями стоп-каналов (СК). Непосредственно к СН примыкает секция памяти (СП), имеющая структуру и количество элементов, идентичные с секцией накопления. В нижней части СП расположен горизонтальный регистр (Р), число элементарных ячеек которого равно числу столбцов в СН и СП. СП, горизонтальный регистр и выходное устройство экранируются от падающего света напылением алюминиевого покрытия на поверхность кристалла.

Оптическое изображение, представляющее собой двухмерное распределение освещенности, проецируется на СН, формируя неосновные носители заряда, в количестве строго пропорционально падающему свету. По окончании времени накопления во время обратного хода по кадру на фазные электроды СН и СП подаются импульсы переноса, обеспечивающие сдвиг накопленного двухмерного массива из СН в СП. Одновременно с этим, в СП во время обратного хода по строке зарядовые пакеты построчно переносятся в горизонтальный регистр. Далее во время прямого хода по строке заряды считываются из горизонтального регистра.

Недостатками матричных ПЗС с кадровым переносом являются значительная площадь кристалла, обусловленная наличием СП, а также вертикальный смаз от ярких деталей изображения. Последнее объясняется тем, что во время переноса зарядовых пакетов из СН в СП световой поток продолжает генерировать носители сигнала. При наличии областей, освещенность которых во много раз превышает средний уровень, на изображении образуется светлый вертикальный столбец, являющийся продолжением яркой детали (вертикальный смаз).

Данных недостатков лишены матричные ПЗС со строчным переносом заряда, которые из-за малых размеров (отсутствие СП) получили широкое распространение в прикладном телевидении (Рис. 17).

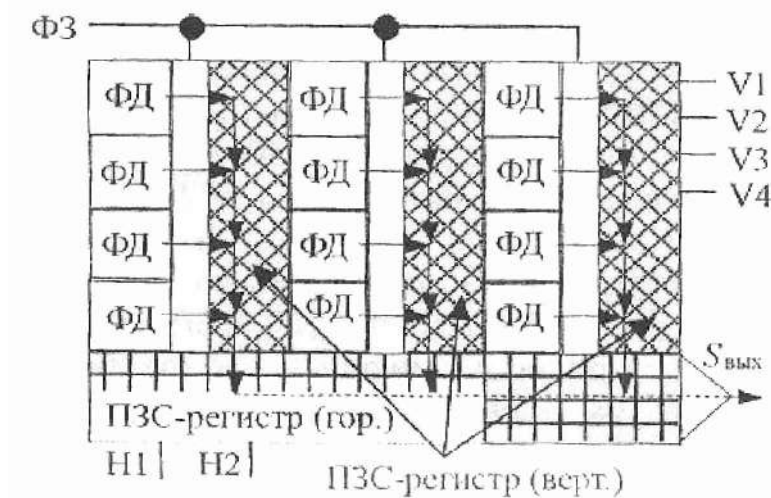


Рис. 17. Матричный ПЗС со строчным переносом.

Перенос зарядов из светочувствительных диодов в вертикальные регистры осуществляется во время обратного хода по кадру, однако уже за существенно меньший промежуток времени, а перенос зарядов в горизонтальный регистр – во время обратного хода по строке. Количество ФД в столбце матричного ПЗС выбирается равным числу строк в кадре.

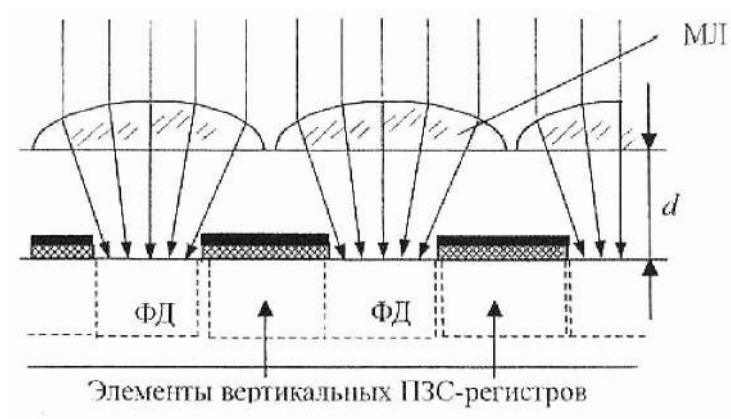


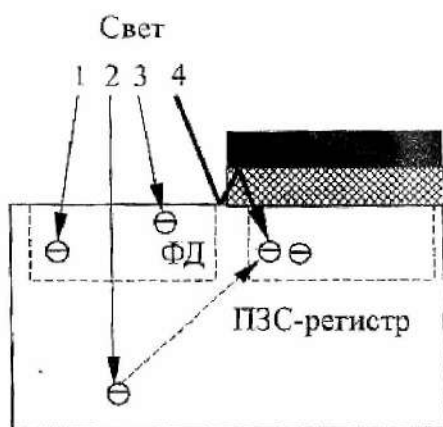
Рис. 18. ПЗС с микролинзами.

Основным недостатком ПЗС такого типа является неполное использование светового потока, поскольку ФД занимают лишь часть площади

кристалла, что приводит к уменьшению чувствительности. Для устранения этого недостатка на поверхность кристалла наносятся микролинзы (Рис. 18).

Несмотря на то, что уровень смаза в матричных ПЗС со строчным переносом существенно меньше, в вещательном телевидении он все же является недопустимым. Смаз в таких ПЗС объясняется двумя причинами:

- переотражением света на электродах вертикального ПЗС-регистра (жирные линии на Рис. 19).
- проникновением фотонов глубоко в полупроводник, откуда возможна диффузия образованного электрона в вертикальный ПЗС-регрстр.



Механизм образования смаза в ПЗС со строчным переносом

Рис. 19. Механизм образования смаза в ПЗС со строчным переносом.

Поэтому для вещательных камер разработаны ПЗС со строчно-кадровым переносом (Рис. 20).

В таких матрицах добавлена СП для реализации кадрового переноса, количество ячеек в которой равно половине количества светодиодов. Зарядовые пакеты переносятся в вертикальные ПЗС, после чего на повышенной частоте в вертикальные регистры СП. Таким образом, механизмы смаза действуют только во время переноса зарядовых пакетов в СП. Уровень смаза в таких устройствах в 20–50 раз меньше, чем в ПЗС со строчным переносом.

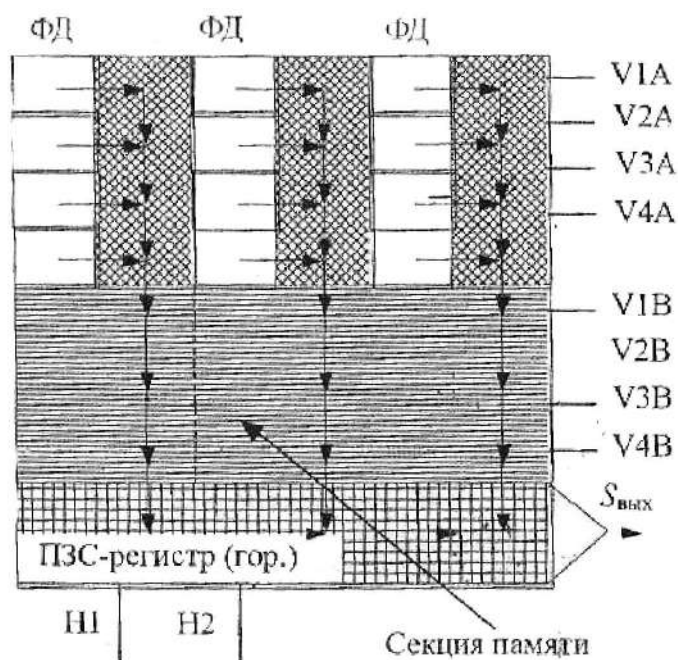


Рис. 20. Матричный ПЗС со строчно-кадровым переносом.

Современная технология позволяет создать матричные ПЗС для телесистем с числом элементов 1035×1920 , работающие на частоте 74.25 МГц, на основе которых созданы цветные камеры для систем телевидения высокой четкости.

Для получения сигналов цветоделенных изображений в таких устройствах на светочувствительную поверхность матричного ПЗС наносят кодирующие светофильтры.

Однако кардинальное решение проблем формирования сигналов изображения и их обработки, повышения технологичности элементов было найдено в использовании КМОП-технологий.

Преобразователь такого типа позволяет объединить на одном кристалле матрицы ФД, модулей коммутации элементов с координатной адресацией и управления режимом работы матрицы, обработки сигналов изображения, интерфейсного модуля и других схемных элементов, обеспе-

чивающих работу преобразователя. Достоинством КМОП-преобразователя является также возможность формирования каскадов усиления видеосигнала на каждом сенсоре матрицы. Основное применение такие устройства нашли в видеокамерах, компьютерных устройствах и бытовой технике.

2.3. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ

Для преобразования акустических колебаний в электрические используются микрофоны. В большинстве из них акустическая энергия преобразуется в электрическую, за исключением микрофонов, сконструированных на релейном принципе, где под воздействием акустических колебаний энергия постоянного тока преобразуется в энергию переменного. Качество микрофонов характеризуется их чувствительностью (отношением напряжения на выходе микрофона к звуковому давлению, действующему на него), частотной характеристикой, характеристикой направленности, уровнем собственного шума и т.п.

По акустическим характеристикам микрофоны делятся на приемники давления, градиента давления, комбинированные и групповые.

Механическая система приемников давления открыта для воздействия звуковых волн только с одной стороны, в отличие от приемников градиента давления, где на диафрагму действует разность акустических волн, падающих с различных направлений. Комбинированные приемники с использованием приемников давления и градиента давления и групповые приемники, классифицируемые как линейные (расположенные в ряд) и трубчатые, состоящие из набора трубок различной длины, служат для формирования различных характеристик направленности.

Микрофоны по принципу электромеханического преобразования делятся на электродинамические, электростатические, электромагнитные и релейные. Для высококачественной передачи звуковых сигналов вещательного телевидения применяются в основном электростатические мик-

рофоны, подразделяющиеся на конденсаторные, электретные и пьезомикрофоны.

Конструкция конденсаторного микрофона (Рис.1) представляет собой конденсатор, один из электродов которого массивный 3, а второй – тонкая натянутая мембрана 1. На конденсатор подано поляризующее напряжение через высокоомное сопротивление R . Заметим, что источник поляризующего U напряжения не расходует энергии, так как постоянной составляющей тока нет. При колебаниях мембраны емкость конденсатора C_0 изменяется, а так как заряд q остается постоянным (конденсатор не успевает перезаряжаться из-за большой постоянной времени), то изменяется напряжение на нем.

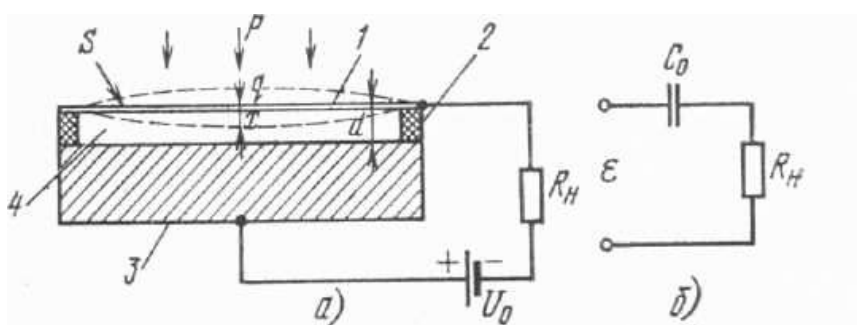


Рис.1. Конденсаторный микрофон:

а) принцип действия; б) электрическая схема микрофона;

1 – мембрана; 2 – изоляционная прокладка;

3 – массивный электрод; 4 – зазор между электродами.

Это дополнительное напряжение $\Delta U = \epsilon$ и будет являться ЭДС от действия звукового давления на мембрану. Напряжение, получаемое при нагрузке, несколько меньше ЭДС из-за падения напряжения на емкость конденсатора.

В электретном микрофоне, в отличие от конденсаторного, поляризующее напряжение образовано предварительной электризацией одного из электродов, изготовляемого из полимеров или керамических поляри-

зующихся материалов. Такой электрод имеет металлическое покрытие, которое, по существу, и является электродом конденсатора, а электрет служит лишь источником поляризующего напряжения. Поляризация электрета постепенно уменьшается, и через несколько лет требуется или его замена, или повторная поляризация. В этом недостаток электретного микрофона по сравнению с конденсаторным, но и достоинство, так как для него не нужен источник напряжения. По механическим, акустическим характеристикам, а также по конструкции электретный микрофон ничем не отличается от конденсаторного.

Стандартный уровень чувствительности конденсаторных микрофонов с усилителем составляет 54 дБ. Уровень собственных шумов микрофона 0–10 дБ.

Электретные микрофоны выпускают пока только для бытовых магнитофонов. Частотный диапазон их составляет 50–15 000 Гц, неравномерность частотной характеристики 10–15 дБ, уровень собственного шума 27–38 дБ. Из-за высокого уровня шумов они непригодны для вещательных систем.

Пьезомикрофоны используют явление пьезоэффекта: при деформации пластинки, вырезанной из кварца, сегнетовой соли и других кристаллов, а также пьезокерамик (титаната бария и др.), происходит ее поляризация, т.е. выделение зарядов на плоскостях. Если пластинку вырезать под определенным углом к оси кристалла, то можно получить поляризацию при деформации пластинки от ее поперечного изгиба. При наклеивании металлических электродов на две противоположные грани пластинки между ними получают разность потенциалов, пропорциональную величине деформации пластинки от поперечного изгиба.

Ввиду высокого входного сопротивления, сложности механической системы, низкой чувствительности и большой неравномерности частотной характеристики пьезомикрофоны имеют очень ограниченное применение.

3. ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

3.1. ОСНОВЫ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В последнее время все чаще в обиходе мы слышим термин «цифровой», что обусловлено тем, что цифровые методы передачи, обработки и хранения информации все чаще приходят на смену аналоговым. В чем же причины этой тенденции:

- первая причина – наиболее важная с точки зрения радиотехники. Это повышение помехоустойчивости, поскольку переход при передаче от аналогового к цифровому сигналу позволяет получить высокое качество изображения при значениях сигнал/помеха (с/п) в десятки раз меньших. Например, для устойчивого приема сигнала в аналоговом телевидении отношение с/п на входе телевизора должно быть порядка 50 дБ, а в цифровых приемниках – в десятки раз меньше.

- вторая причина – получение функциональных возможностей, объединяемых термином «цифровая обработка сигналов». В этом случае аппаратная реализация заменяется выполнением математических операций над числами, составляющими цифровой сигнал. Ведь все преобразования, производимые в реальных устройствах, оформляется формулами.

При этом достигается увеличение в четыре и более раз количества передаваемых в стандартном телевизионном канале программ, возникает возможность передачи по единому каналу сигналов телевидения, Интернета, телефонии.

Однако существенным недостатком систем с цифровым сигналом изображения является необходимость расширения полосы пропускания канала связи по сравнению с аналоговым. Кроме того, механизм цифровой передачи подразумевает наличие мощного, быстродействующего устройства, позволяющего в реальном масштабе времени обеспечить проведение необходимых математических расчетов.

Вот почему лишь с появлением быстродействующих процессоров и вычислительных машин на их базе цифровые методы находят все большее и большее применение.

Различают три этапа развития цифрового телевидения:

- применение цифровой техники в отдельных частях ТВС при сохранении обычного стандарта разложения и аналоговых каналов связи.

Это – создание цифрового студийного оборудования, где сигналы с камер оцифровывались, и вся их дальнейшая обработка и хранение в пределах студии производились цифровыми средствами. Для передачи через канал связи сигнал снова преобразовывался в аналоговый.

Введение цифровых блоков в телевизионные приемники: устройства перехода от чересстрочной развертки к прогрессивной, повышение частоты полей до 100Гц, реализация функций «стоп-кадр» и «кадр в кадре».

- переход к последовательной передаче яркостного и цветоразностных сигналов, увеличение количества строк в кадре и элементов изображения в строке (системы ТВЧ). Передача таких сигналов через каналы связи вызвала необходимость развития методов сжатия их спектра. Для решения данной задачи Международная организация по стандартизации (ISO) создала рабочую группу, занимающуюся разработкой методов сжатия неподвижных изображений – JPEG, а затем и движущихся изображений MPEG. Разработки данных групп стали основой создания всех современных систем цифрового телевидения.

- создание полностью цифровых телевизионных систем.

Для того чтобы преобразовать аналоговый сигнал в цифровой, необходимо выполнить три операции [3.4]:

- дискретизацию во времени, т.е. замену непрерывного аналогового сигнала последовательностью его значений в дискретные моменты времени;

- квантование во времени, заключающееся в нахождении для каждого отчета сигнала ближайшего к нему уровня квантования из используемого набора;

- кодирование, в результате которого номер найденного уровня квантования представляется в виде двоичного числа в параллельной или последовательной форме.

Все три операции выполняются в одном устройстве – аналого-цифровом преобразователе (АЦП), а обратное преобразование – с помощью

цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Примерные структурные схемы этих устройств приведены на Рис. 1.

Спектр дискретизированного сигнала приводится на Рис. 2.

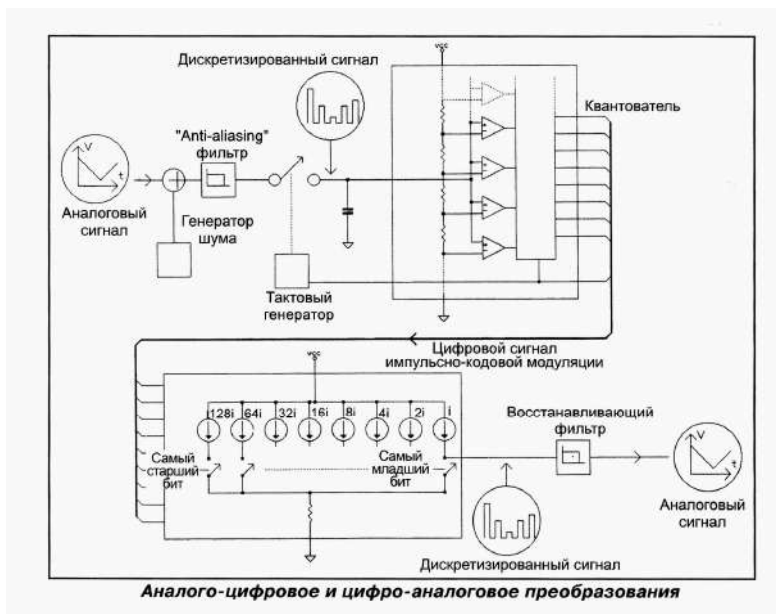


Рис. 1. Структурные схемы АЦП и ЦАП.

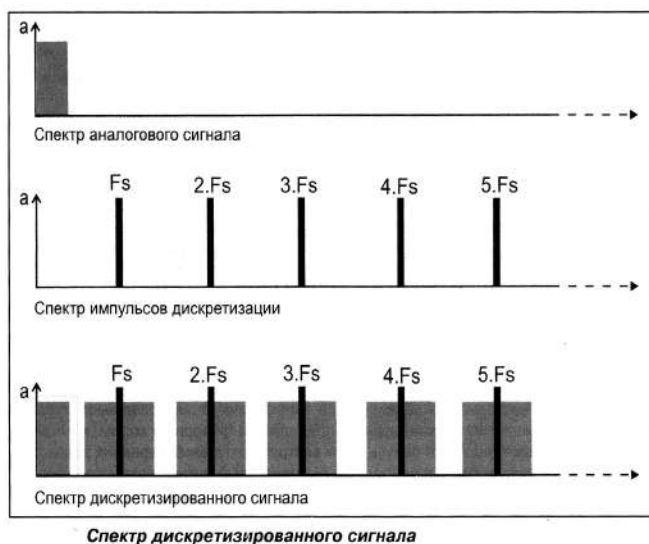


Рис. 2. Спектр дискретизированного сигнала.

Фактически эффект дискретизации сводится к перемножению аналогового сигнала на периодическую последовательность δ -импульсов.

При этом спектр сигнала после дискретизации содержит как исходный спектр модулирующих импульсов, так и спектр аналогового сигнала в виде боковых полос. Частота дискретизации F_s должна удовлетворять неравенству

$$F_s > 2F_b,$$

где F_b – верхняя граничная частота дискретизируемого сигнала.

Это условие было сформулировано Котельниковым. Из рисунка видно, что для получения исходного сигнала достаточно использование фильтра нижних частот (ФНЧ). Если условие теоремы Котельникова не выполняется, произойдет наложение спектров (aliasing), и исходный спектр восстановить не удастся. Для исключения этого эффекта в схему введен также и ограничитель спектра входного сигнала.

На практике импульс выборки имеет реальную величину (апертуру), а, следовательно, и выходной сигнал является некоторым усредненным значением на интервале действия импульса. Апертурным эффектом можно пренебречь при длительности импульса менее $0.2T_s$.

Изменение положения импульса выборки (jitter) также может приводить к ошибкам в процессе дискретизации.

Частота дискретизации сигнала может меняться. Для ее увеличения между отсчетами дискретного сигнала вставляются дополнительные отсчеты. Данная операция называется «интерполяцией», как и преобразование дискретного сигнала в аналоговый.

Процесс дискретизации изображения в трехмерном пространстве [3.2] приведен на Рис.3, где горизонтальные координаты X и Y соответствуют пространственным в плоскости изображения, а Z показывает величину яркости в каждой точке изображения.

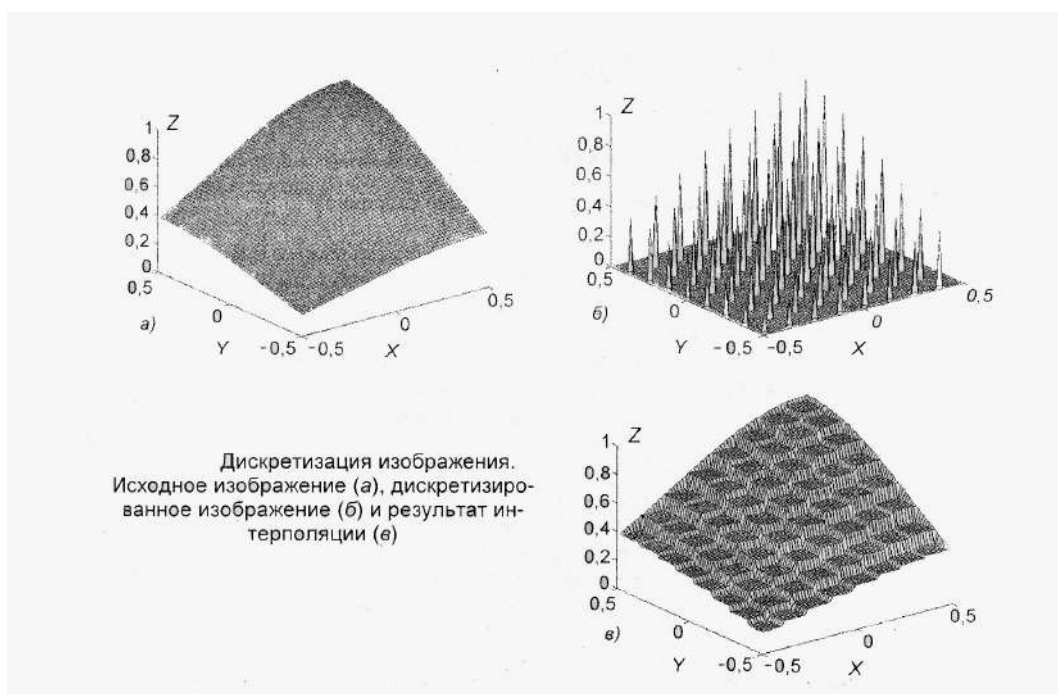


Рис. 3. Дискретизация изображения.

Данный рисунок иллюстрирует процесс дискретизации для телевизионного сигнала, поскольку последний описывается как раз пространственной функцией.

Из рисунка видно, что введение интерполяции позволяет приблизить форму дискретизированного сигнала к исходному.

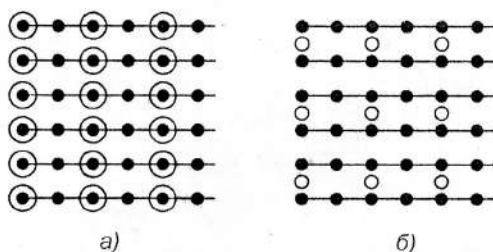
Поскольку полоса телевизионного сигнала при стандарте SECAM равна 6,5 МГц, частота дискретизации должна быть не менее 13 МГц. Учитывая, что последняя должна также быть целым кратным от частоты строк, чтобы на периоде строки помещалось целое число отсчетов сигнала, частота дискретизации выбрана 13,5 МГц.

Эта частота равна 858-й гармонике строчной частоты 15625 Гц стандарта 625/50/2:1 и 864-й гармонике частоты 15734 стандарта 525/59.94/2:1. Частота строк рассчитывается по формуле:

$$f_{\text{строки}} = f_{\text{кадра}} Z$$

В соответствии с единым международным стандартом кодирования предусмотрено раздельная цифровая дискретизация яркостного (Y) и двух цветоразностных сигналов C_R и C_B (компонентное кодирование). Данные компоненты получаются путем матрицирования исходных сигналов R, G, B .

Учитывая особенности восприятия цвета мелких деталей изображения, количество выборок цветности может быть меньше, чем яркостного. Наиболее часто используют формат, где частота дискретизации цветоразностных сигналов в два раза меньше чем Y , причем в каждой строке присутствуют оба цветоразностных сигнала. Такой формат получил название 4:2:2 (Рис. 4).



Положение отсчетов яркостного и цветоразностных сигналов при форматах дискретизации 4:2:2 (а) и 4:2:0 (б):
 ● — отсчеты сигналов яркости; ○ — отсчеты цветоразностных сигналов

Рис. 4. Положение отсчетов при форматах дискретизации 4:2:2 и 4:2:0.

При использовании формата 4:2:0 каждый цветоразностный сигнал имеет частоту дискретизации в два раза меньше Y и число передаваемых строк для него уменьшается вдвое.

Соответственно, для стандартов ТВЧ частота дискретизации должна быть в два раза выше, чем для телевидения стандартной четкости.

Рассмотрим теперь операцию квантования по уровню. Это нахождение для каждого отчета сигнала ближайшего к нему уровня квантования или, проще говоря, округлении значений отчетов сигнала до ближайших уровней квантования. Получающиеся при этом ошибки квантования до-

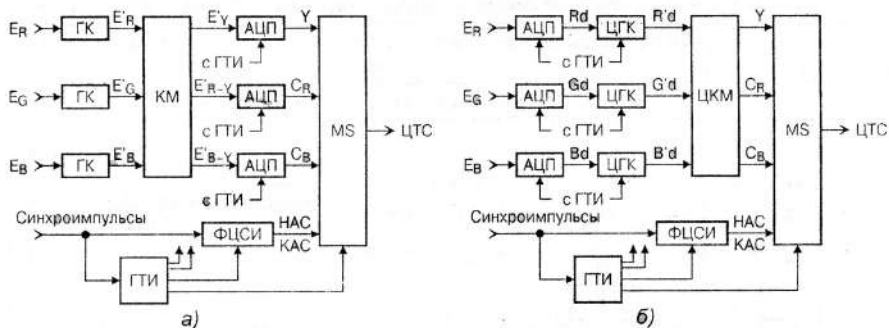
вольно заметны при низких уровнях сигналов. Когда преобразовывается высокий уровень сигнала, проходящий через большое число уровней квантования, результирующая ошибка от сотен не совсем верных значений приводит к появлению в сигнале случайного по своей природе шума. Для низкого уровня ошибка скоррелирована с сигналом и не носит шумового характера, из-за чего становится более заметной на конечном изображении. Поэтому в исходный аналоговый сигнал добавляется шумовой сигнал низкого уровня, который декоррелирует ошибку при малых сигналах (Рис. 1).

Количество уровней квантования $N_{\text{кв}}$ связано с числом двоичных разрядов АЦП b соотношением

$$N_{\text{кв}} = 2^b.$$

Выбор числа уровней квантования определяет динамический диапазон АЦП и приблизительно равен $6b$.

На Рис. 5 приведены два варианта структурной схемы формирователя цифрового телевизионного сигнала (ЦТС).



Варианты структурной схемы формирователя цифрового телевизионного сигнала

Рис. 5. Структурные схемы формирователей цифрового телесигнала.

В первом – сигналы с телекамеры подаются на γ -корректоры (ГК), с выхода которых поступают на кодирующие матрицы (КМ), где формируются яркостный и цветоразностные сигналы. Далее они преобразуются в АЦП и подаются на мультиплексер (MS). Синхроимпульсы с формиро-

вателя цифровых синхроимпульсов (ФЦСИ), вырабатывающего сигналы начала активной строки (НАС) и конец активной строки (КАС), подаются на вход MS, на выходе которого формируется ЦТС. Синхроимпульсы используются также для работы генератора тактовых импульсов (ГТИ), вырабатывающего необходимые импульсы управления.

Во втором – обработка сигнала полностью производится с применением цифровых устройств.

Рассмотрим теперь методы преобразования звуковых сигналов.

Параметры цифрового представления звуковых сигналов выбираются в соответствии с параметрами этих сигналов и свойствами слуха. Человек воспринимает звуки от 20 Гц до 20 кГц, частотный же диапазон звуков речи простирается от 70 до 8000 Гц и зависит от типа голоса. Количество разрядов квантования для звуковых сигналов должно быть больше, чем для видео, поскольку динамический диапазон слуха доходит до 140 дБ. Поэтому перед квантованием в звуковом тракте используется компрессирование сигнала. В Таблице 1 приведены параметры некоторых вариантов цифрового представления звуковых сигналов.

Таблица 1.

Параметры цифрового представления звуковых сигналов.

Область использования	Частота дискретизации, кГц	Число уровней квантования	Скорость передачи двоичных символов, кбит/с
Кокпакт-диски	44,1	16	705,6
Цифровое радиовещание, цифровое ТВ-вещание	48	16 ... 20	768 ... 960 (на один канал)
NISAM – система цифровой передачи звука для аналогового ТВ-вещания	32	14 до компрессирования, 10 – после него	996 (стерео) до компрессера, 728 после него
Передача речи по Рекомендации G.711 (с компрессированием)	8	8	64

Обратное преобразование звуковых сигналов подразумевает опять-таки использование фильтра нижних частот (ФНЧ), для упрощения требований к которому применяется интерполяция (повышение частоты дискретизации) с использованием цифрового фильтра.

Для построения ЦАП используется принцип, основанный на суммировании токов (см. Рис. 1). Величины токов пропорциональны степеням 2. Ключ замыкается, если соответствующий бит в цифровом сигнале равен лог.1. Суммарный ток течет через сопротивление нагрузки и создает выходное напряжение. Для преобразования суммы токов в напряжение на выходе ЦАП можно использовать операционный усилитель.

3.2. ЦИФРОВЫЕ АУДИО И ВИДЕО ИНТЕРФЕЙСЫ. ДВУМЕРНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ

«Цифровым интерфейсом» называется точка соединения двух приборов, в которых данные передаются от одного устройства к другому [3.2]. Чтобы обеспечить быстрое и надежное соединение без подстройки параметров оба прибора должны соответствовать единым требованиям к точке стыка. Соединение может быть однонаправленным или симплексным, когда данные передаются только в одном направлении, и двунаправленным или дуплексным, когда передача идет в обоих направлениях. Понятно, что сигналы реального времени (телевидение, звуковое вещание) могут передаваться только в симплексном режиме. Для описания любого цифрового интерфейса необходимо указать протокол обмена данными, уровень напряжений, входные и выходные сопротивления, вид соединителей, тип кабеля.

Интерфейсы делятся на «параллельные», когда каждый бит отсчета и сигнал тактовой частоты передаются по отдельной линии, и «последовательные».

Потребность в большом числе соединительных линий является серьезным недостатком параллельной передачи, поэтому метод используется только для соединений внутри аппаратуры и в меньшей степени

внутристудийных соединений. При использовании формата 4:2:2 передача значений отчетов происходит по одним и тем же линиям в следующем порядке: Y, Cr, Y, Cb, Y

Частота тактовых импульсов при этом равна:

$$f_T = 13,5 + 6,75 + 6,75 = 27 \text{ МГц.}$$

Произведение частоты дискретизации и числа разрядов квантования называется «скоростью передачи двоичных символов – Q» и измеряется в Мбит/сек. При этом суммарная скорость передачи двоичных импульсов ЦТС для параллельного видеостыка равна 270 Мбит/сек. При этом максимальная длина кабеля без коррекции АЧХ – 50 метров, номинальное сопротивление нагрузки – 110 Ом.

Для соединений используется 25-ти контактный соединитель D-типа.

Передача сигнала на большие расстояния осуществляется в последовательной форме. Двоичные разряды каждого отчета передаются один за другим по одной линии, в качестве которой можно использовать коаксиальный кабель или оптоволокно. Импульсы тактовой частоты отдельно не передаются, а выделяются в приемнике в соответствии с Рис. 1.

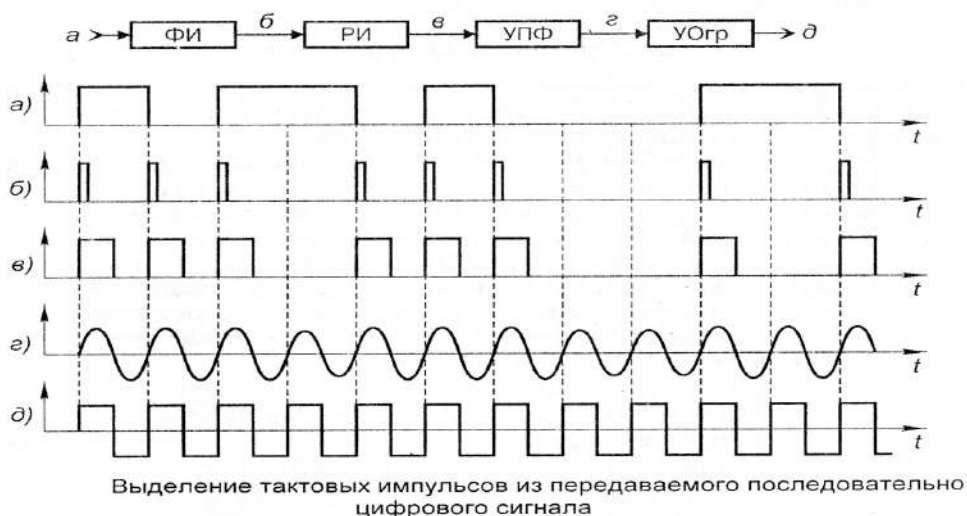


Рис. 1. Выделение тактовых импульсов.

Входной сигнал поступает на формирователь импульсов (ФИ), вырабатывающий короткие импульсы при перепадах напряжения входного сигнала. Расширитель импульсов (РИ) преобразует их в импульсы с длительностью, равной половине периода тактовой частоты, которые поступают на узкополосный фильтр (УПФ), на выходе которого выделяется синусоидальный сигнал тактовой частоты.

Видно, что в случае, когда амплитуда импульса на входе длительное время не меняется, начало действия импульса на выходе усилителя ограничителя (УОгр) из-за наличия переходного процесса в фильтре может смещаться. Поэтому необходимо преобразование цифрового сообщения в форму, пригодную для передачи по каналу (канальное кодирование). Сигнал такого типа должен удовлетворять двум условиям [3.1]:

- отсутствию постоянной составляющей, наличие которой приводит к смещению уровня сигнала и положения фронтов импульса относительно порогового уровня. При этом возникает эффект фазового дрожания.

- отсутствию длинных серий нулей или единиц.

В наиболее распространенном цифровом интерфейсе SDI (Рис. 2) используется инвертированный код без возврата к нулю (БВН) и сверточное скремблирование.

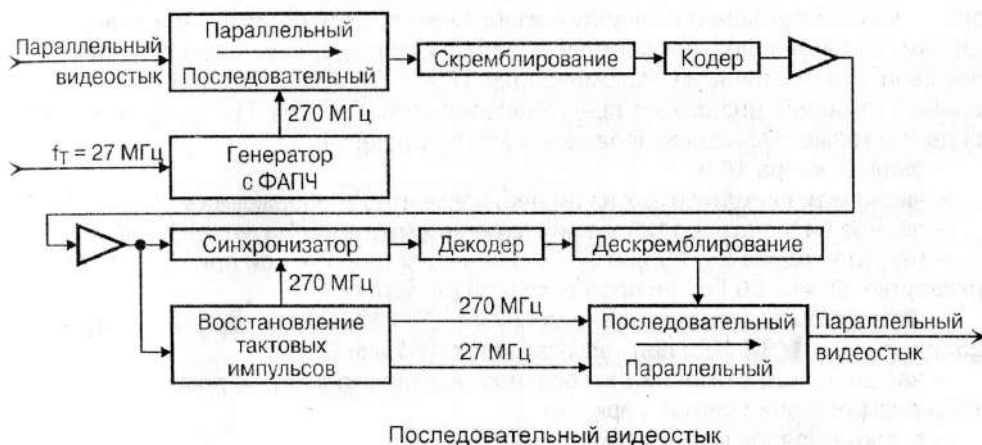
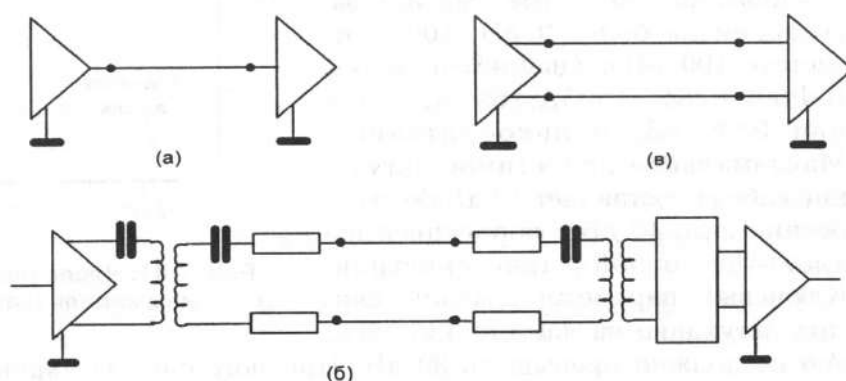


Рис. 2. Цифровой интерфейс SDI.

Входной 10-битовый сигнал записывается в параллельной форме в регистр сдвига с тактовой частотой 27 МГц, из которого считывается последовательно с тактовой частотой 270 МГц и поступает на скремблер. Информация в выходном сигнале скремблера содержится в переходах, а не в самих импульсах, и поэтому не зависит от полярности сигнала. Это свойство SDI позволяет использовать в канале как инвертирующие, так и неинвертирующие устройства.

Интерфейс SDI широко используется для соединения различных устройств в пределах здания и между ними. Соединение осуществляется по 75-му коаксиальному кабелю с помощью простых соединителей BNC, обеспечивающих хорошее согласование в полосе частот до 600 МГц.

Схемное исполнение соединения существенно влияет на его характеристики (Рис. 3). В простом небалансном интерфейсе (Рис. 3,а) в качестве одного из проводов используется земля, к которой подсоединяется и экранирующая оболочка кабеля.



Электрические схемы небалансного и балансного интерфейсов:

- а) небалансный;
- б) балансный трансформаторный;
- в) балансный электронный

Рис. 3. Схемы небалансного и балансного интерфейсов.

Из-за разности потенциалов у потребителя и источника и недостаточной экранировки на полезные сигналы накладываются помехи, навод-

ки от сети переменного тока и прочее. Балансное соединение содержит два параллельных провода, по которым полезный сигнал передается в противофазе, а помехи наводятся в фазе и на приемном конце компенсируются. Для балансировки применяются трансформаторные и электронные схемы. в параллельных интерфейсах используют балансное соединение с уровнями ЭСЛ. Размах сигнала на выходе SDI порядка 800 мВ. Широкое распространение SDI во многом связано с прогрессом оптоволоконной техники, обладающей следующими преимуществами по сравнению с коаксиалом:

- высокая пропускная способность;
- малое затухание на единицу длины;
- нечувствительность к наводкам и помехам;
- неподверженность коррозии и гниению;
- отсутствие электромагнитного излучения в окружающую среду.

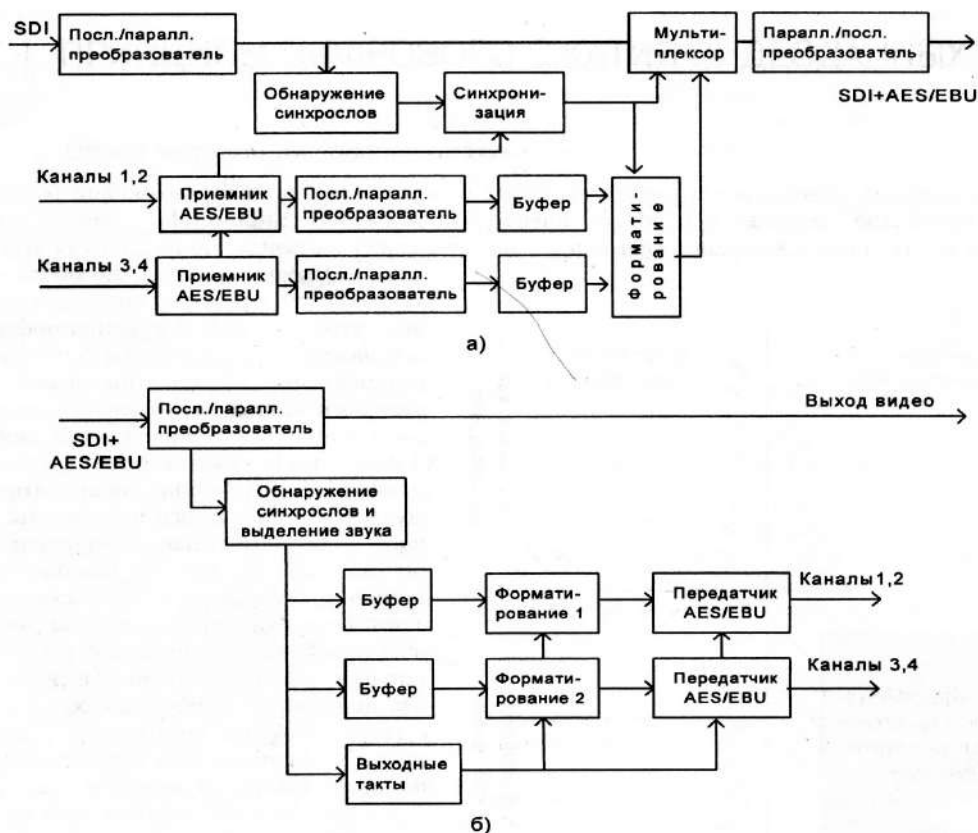
При помощи оптоволокна можно передавать без регенерации сигналы со скоростью несколько гигабит в секунду на расстояние в десятки километров. В качестве передатчиков используются полупроводниковые лазеры.

Для передачи звука принят интерфейс AES/EBU, обеспечивающий передачу с мультиплексированием по времени двух потоков звуковых данных, соответствующих правому и левому каналам стереосигнала или двум независимым моноканалам. Скорость потока составляет при частоте дискретизации 48 кГц – 3,072 Мбит/сек.

Устойчивое выделение тактовой частоты обеспечивается при помощи бифазного канального кода, исключаящего постоянную составляющую. Синхросигналы передаются в начале отсчетов левого и правого каналов и в начале блока.

Для передачи применяется балансная линия с выходным сопротивлением 110 Ом в виде витой пары с соединителями XLR. Стандартизован также и коаксиальный вариант данного интерфейса с выходным напряжением 1В на нагрузке 75 Ом.

При передаче большого числа телевизионных сигналов широко используется SDI со вложенным звуком (Рис. 4).



Структурная схема устройств ввода (а) и вывода (б) встроенного звука

Рис. 4. Структурная схема устройств ввода и вывода звукового сигнала.

При этом звуковое сопровождение передается в промежутке между сигналами конца и начала активных строк изображения.

Рассмотрим теперь цифровые методы обработки изображений [3.3].

Во многих практических областях сигналы рассматриваются не во временной области, а в частотной. Известно, что преобразование любой периодической функции из временной области в частотную и, наоборот, может быть представлено при помощи прямого и обратного преобразования Фурье:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$x(t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega ,$$

где $x(t)$ и $x(\omega)$ – соответственно, сигнал во временной и его комплексный спектр в частотной областях, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

Для пространственного сигнала в преобразовании вместо t нужно подставить пространственную переменную x , а вместо частоты f – пространственную частоту v (для телевизионного сигнала – частоту горизонтальной развертки).

$$G(v) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) e^{-j2\pi vx} dx .$$

Для телевизионного сигнала, являющегося двумерным пространственным сигналом (вертикальная и горизонтальная развертка), данное преобразование запишется в виде:

$$G(v,u) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x,y) e^{-j2\pi(vx+uy)} dx dy .$$

Преобразование Фурье для цифрового телевизионного сигнала описывается при помощи дискретного двумерного преобразования Фурье (ДПФ)

$$G(v,u) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x,y) e^{-j2\pi(vx+uy)/N} ,$$

где N – число отчетов за период, $g(x,y)$ – функция, чьи дискретно выбранные и квантованные амплитуды относятся к яркости конечного числа $(N \times N)$ выборок на телевизионном изображении. Математически двойное суммирование можно производить в два этапа: сначала по координате x , а затем – y .

Учитывая, что в качестве пространственных частот в телевизионном сигнале выступают частоты горизонтальной f_x и вертикальной f_y разверток, очевидно, что компоненты спектра сигнала дискретны и кратны пространственным частотам (см. Рис. 5).

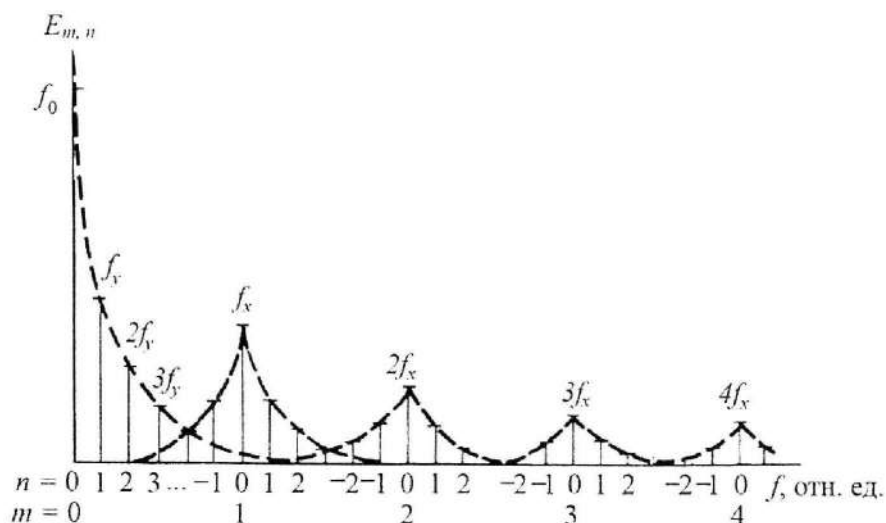


Рис. 5. Спектр телесигнала.

Недостатком ДПФ для практических расчетов является наличие комплексных чисел в коэффициентах разложения. Поскольку разложение в ряд Фурье четных функций содержит только действительные коэффициенты, соответствующие косинусоидальным членам ряда, к области отчетов слева можно добавить ее зеркальное отображение и использовать так называемое дискретно-косинусное преобразование (ДКП). При этом объем вычислений в два раза уменьшается. Для дальнейшего упрощения расчетов используют алгоритм быстрого преобразования Фурье. Смысл использования ДКП при обработке данных заключается в том, что мы получаем возможность воздействия на различные частотные составляющие спектра, что широко используется в современных стандартах сжатия.

3.3. ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Цифровая фильтрация – один из важнейших методов обработки одномерных и многомерных цифровых сигналов [3.4]. С помощью цифровых фильтров в телевидении решаются задачи уменьшения влияния шу-

мов и помех, разделения сигналов яркости и цветности, повышения субъективного качества изображения и т.д.

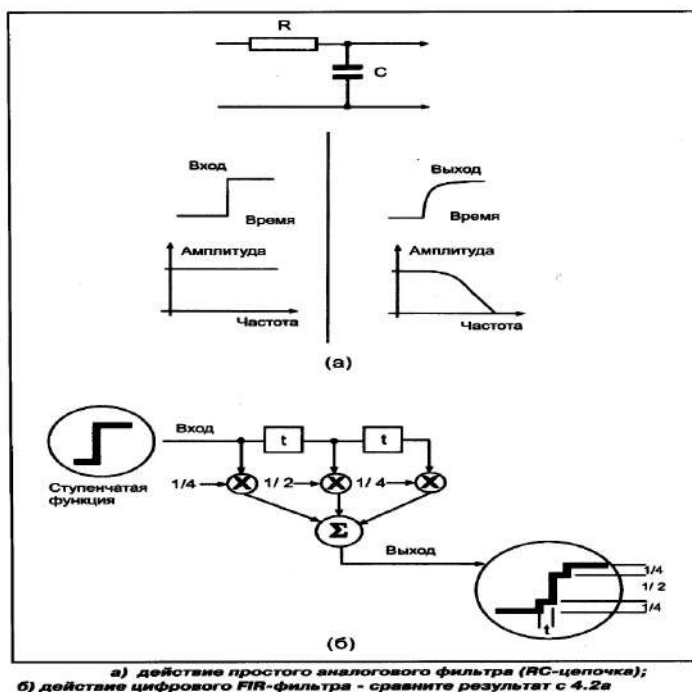


Рис. 1. Схемы реализаций аналогового и цифрового ФНЧ.

При этом используются как одномерная, так и двумерная (пространственная) фильтрация. На Рис.1 приведены простейшие схемы реализаций аналогового и цифрового ФНЧ. Обратите внимание, что фильтр замедляет формирование фронта, а в частотной области обеспечивает подавление высоких частот. Как мы видим, цифровые фильтры работают на сочетании задержек со сложением и умножением на различные весовые коэффициенты, что обеспечивает возможность получения практически любой формы кривой, описывающей характеристику фильтра.

Линейный цифровой фильтр [3.2] преобразует последовательность отсчетов $x(i)$ входного сигнала в последовательность отсчетов $y(i)$ выходного сигнала в соответствии с правилом

$$y(i) = a_0 x(i) + a_1 x(i-1) + \dots + a_m x(i-m) + b_1 y(i-1) + \dots + b_n y(i-k). \quad (1).$$

Значения m и k могут быть любыми натуральными числами. Наибольшее из чисел m и k называется «порядком цифрового фильтра».

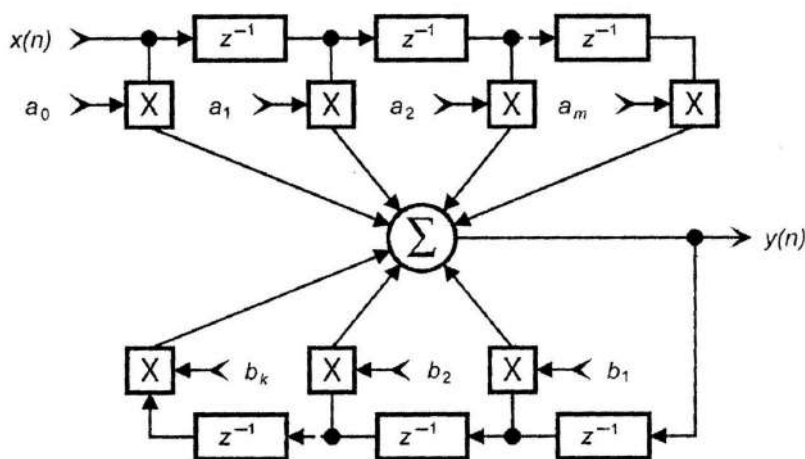
Коэффициенты a и b могут быть любыми действительными числами – как положительными, так и отрицательными. Часть этих коэффициентов может быть равна нулю. Свойства цифрового фильтра полностью определяются набором коэффициентов.

Z-преобразование формулы (1) записывается в виде:

$$Y(z) = (a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}) X(z) + (b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-k}) Y(z).$$

Здесь $X(z)$ и $Y(z)$ – z-преобразования сигналов $x(i)$ и $y(i)$.

На Рис. 2 показана структурная схема цифрового фильтра, выполняющего преобразование такого типа.



Структурная схема цифрового фильтра для одномерных сигналов

Рис. 2. Структурная схема цифрового фильтра.

Отметим, что это один из возможных вариантов структуры цифрового фильтра с данным набором коэффициентов. Каждый блок z^{-1} выполняет задержку сигнала на один отсчет. Такое обозначение задержки связа-

но с Z-преобразованием, которое является удобным средством описания и анализа цифровых фильтров. Задержка цифрового сигнала на k отсчетов в результате z-преобразования заменяется умножением на z^{-k} .

При этом:

$$Y(z) = (a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}) / (1 - b_1 z^{-1} - \dots - b_n z^{-n}) X(z) = H(z) X(z).$$

Функция $H(z)$ называется «передаточной» или «системной» функцией цифрового фильтра. Если в выражении для нее заменить все z^{-k} на $e^{-j2\pi k f}$, то получится комплексная частотная передаточная функция фильтра $H(j2\pi f)$, модуль которой является амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) фильтра $H(2\pi f)$.

Здесь f – безразмерная частота, равная отношению частоты сигнала к частоте дискретизации и принимающая значения в интервале от 0 до 0,5 в соответствии с условием Котельникова.

Другой важной характеристикой цифрового фильтра является импульсная характеристика $h(n)$ – реакция фильтра на входной сигнал, в котором один отсчет равен единице, а все остальные – нулю. Операция вычисления отсчетов выходного сигнала по (1) называется сверткой входного сигнала с импульсной характеристикой фильтра.

Если известны все коэффициенты цифрового фильтра в соотношении (1), то и импульсная характеристика, и передаточная функция, и АЧХ могут быть рассчитаны.

Если в (1) все коэффициенты $b=0$, цифровой фильтр называется «нерекурсивным». Его передаточная функция имеет вид:

$$H(z) = a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}$$

Приняв $x(0) = 1$, а остальные $x(i) = 0$, из (1) получаем $y(0) = a_0$, $y(1) = a_1$, ... $y(m) = a_m$, а все остальные отсчеты выходного сигнала равны нулю. Следовательно, импульсной характеристикой нерекурсивного фильтра является последовательность его коэффициентов. Реакция нерекурсивного фильтра на единичный импульс занимает $m+1$ отсчет выход-

ного сигнала. Поэтому нерекурсивные фильтры называют еще фильтрами с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтрами). На Рис. 3а в качестве иллюстрации возможностей нерекурсивных цифровых фильтров показаны заданная АЧХ трапецеидальной формы и АЧХ двух синтезированных для ее получения нерекурсивных ФНЧ. По горизонтали отложена частота сигнала, выраженная в долях частоты дискретизации.

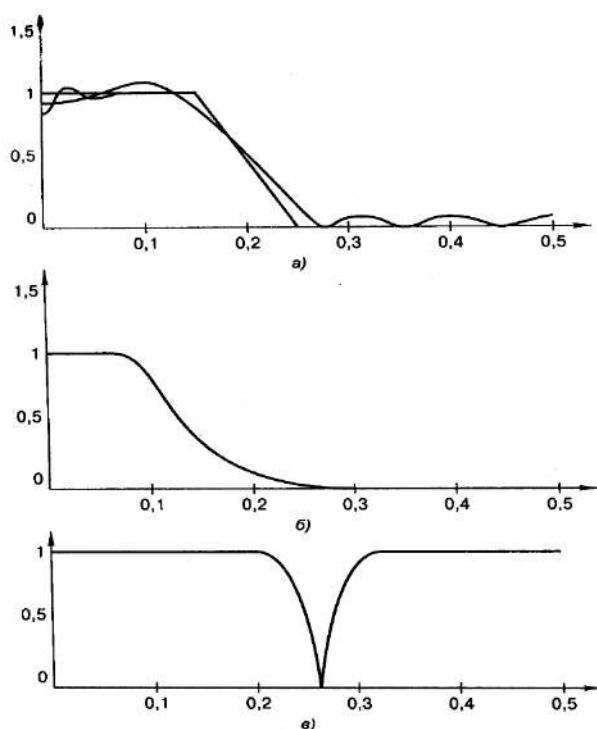


Рис. 3. Примеры АЧХ цифровых фильтров.

Первый ФНЧ 11-го порядка и АЧХ этого фильтра содержит значительные колебания, далекие от идеальной. Второй ФНЧ имеет порядок 101. АЧХ этого фильтра почти совпадает с заданной.

Если хотя бы один из коэффициентов b не равен нулю, цифровой фильтр называется рекурсивным. В этом случае на текущее значение выходного сигнала влияют не только значения входного сигнала, но и более ранние значения выходного сигнала.

Такие фильтры называют еще фильтрами с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтрами), так как они «помнят» все предыдущие значения входного и выходного сигналов, и реакция рекурсивного фильтра на единичный импульс на входе теоретически длится бесконечно долго. На Рис. 3.б и 3,в представлены АЧХ рекурсивного ФНЧ Баттерворта четвертого порядка и рекурсивного режекторного фильтра второго порядка.

Этот фильтр имеет частоту режекции, равную 0,27 частоты дискретизации, и добротность, равную 10.

Изменение характера АЧХ достигается соответствующим выбором коэффициентов фильтра. Повышая порядок цифрового фильтра, можно получить АЧХ с более крутыми спадами и, вообще, лучше соответствующую поставленным требованиям. Однако надо понимать, что возможности улучшения параметров цифровых фильтров не беспредельны. Основное ограничение здесь – это ошибки квантования и округления, возникающие из-за конечного числа разрядов квантования входного и выходного сигналов, коэффициентов фильтра и конечной разрядности устройств, выполняющих вычисления по формуле (1). Влияние ошибок квантования и округления на результат фильтрации возрастает с повышением порядка фильтра. Используя рекурсивные фильтры, можно, как правило, получить необходимые параметры АЧХ при более низком порядке фильтра, чем в случае применения нерекурсивных фильтров. Следовательно, требуются меньший объем ЗУ и меньшее количество арифметических операций. Но рекурсивные фильтры могут быть неустойчивыми, так как в них есть обратные связи и они более подвержены влиянию упомянутых выше ошибок квантования и округления.

Для цифровой фильтрации сигнала необходимы процессор, выполняющий операции умножения и сложения, и ЗУ, в котором хранятся отсчеты входного и выходного сигналов, используемые в вычислениях по (1). Цифровой фильтр может быть реализован программно на обычном персональном компьютере, микропроцессоре или микроконтроллере. Фильтрация звуковых и телевизионных сигналов в реальном времени часто выполняется с помощью специальных БИС.

Фильтрация путем вычисления по формуле (1) называется «фильтрацией во временной области». Возможно также выполнение фильтрации в частотной области. Для этого выполняется ДПФ исходного сигнала, полученный набор коэффициентов ДПФ почленно умножается на набор чисел, представляющих частотную характеристику фильтра, после чего выполняется обратное ДПФ. Такой метод во многих случаях позволяет добиться лучших результатов, чем фильтрация во временной области. Однако для реализации заданной АЧХ с большей точностью надо обрабатывать более длинные отрезки сигнала, что, в свою очередь, приводит к быстрому росту объема вычислений.

Фильтр, описанный соотношением (1), является линейным. Если на его вход подать сумму нескольких сигналов, то выходной сигнал будет суммой сигналов, получаемых при действии каждого из входных сигналов по отдельности. Широкое применение на практике имеют и нелинейные фильтры, для которых принцип суперпозиции не выполняется.

Одним из наиболее известных видов нелинейных фильтров являются медианные фильтры. Кратко принцип действия такого фильтра можно пояснить следующим образом. Для получения каждого отсчета выходного сигнала берется соответствующий отсчет входного сигнала и некоторое количество предшествующих ему и следующим за ним отсчетов входного сигнала. Значения этих отсчетов упорядочиваются по возрастанию или по убыванию. Далее берется центральный по порядку элемент полученного набора чисел, называемый «медианой» этого набора чисел, и его значение присваивается отсчету выходного сигнала.

Рассмотрим пример:

- задан входной цифровой сигнал (число разрядов квантования 8):

85, 86, 84, 84, 86, 48, 84, 86, 87, 85, 112, 144, 145, 143, 145, 146, 143, 144.

В сигнале имеется выброс вниз в 6-м отсчете, а после 10-го отсчета уровень сигнала за два периода дискретизации повышается. Сигнал пропускается через медианный фильтр с шириной окна 5 отсчетов. Окно смещается слева направо. При вычислении первых двух и последних двух

отсчетов выходного сигнала набор чисел дополняется до 5 повторением значений, соответственно, первого и последнего отсчетов входного сигнала. Пусть центр окна находится на 5-м отсчете. В окно попадают отсчеты со значениями 86,84,84,84,48. После упорядочивания этот набор чисел имеет вид 48, 84, 84, 84, 86. Медианой этого набора и, следовательно, значением 5-го отсчета выходного сигнала будет число 84. Аналогично вычисляются значения остальных отсчетов выходного сигнала. В результате получается выходной сигнал

85, 85, 85, 84, 84, 84, 86, 85, 86, 87, 112, 143, 144, 145, 145, 144, 144, 144.

Мы видим, что короткий отрицательный выброс в 5-м отсчете удален. Заметно сгладились мелкие флуктуации сигнала. Положительный перепад остался на месте, и его крутизна не изменилась. Для сравнения приведем результат обработки того же входного сигнала нерекурсивным ФНЧ 5-го порядка, в котором все 5 коэффициентов равны 0,2. Такой ФНЧ формирует отсчеты выходного сигнала путем усреднения по 5 отсчетов входного сигнала. Правило обработки начала и конца сигнала такое же, как для медианного фильтра. Результат действия ФНЧ:

85,85,85,78,77,77,78,78,91,103,115,126,138,145,144,144.144,144.

Видно, что линейный ФНЧ не устраняет короткий выброс, а «размывает» его по нескольким отсчетам. Кроме того, он сглаживает крутой перепад в сигнале, что в случае телевизионного сигнала может привести к ухудшению четкости изображения по горизонтали и размыванию границ объектов.

Таким образом, медианный фильтр является хорошим средством подавления коротких импульсных помех с сохранением резких перепадов сигнала. Однако если короткий выброс сигнала несет какую-нибудь информацию, то она будет утеряна, так как отличить помеху от полезной составляющей сигнала медианный фильтр не может.

В современном телевидении большую роль играют двумерные или пространственные цифровые фильтры. При выполнении пространствен-

ной фильтрации выполняется операция двумерной свертки входного изображения, представленного в виде матрицы элементов, с матрицей фильтра.

Простейшие пространственные фильтры имеют матрицу 3x3. Ниже приведено несколько примеров фильтров такого типа:

$$\begin{array}{ll} \text{а)} & \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix} \\ \text{б)} & \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 5 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \end{array} .$$

Пространственно-частотная характеристика или ПЧХ (двумерный аналог АЧХ) для таких фильтров в случае, когда матрица фильтра симметрична как относительно среднего столбца и средней строки, так и относительно обеих главных диагоналей, рассчитывается по формуле:

$$H(u,v) = a_0 + 2a_1(\cos u + \cos v) + 2a_2[\cos(u + v) + \cos(u - v)],$$

где a_0 – число в центральной ячейке матрицы фильтра, a_1 – числа в средних ячейках верхней и нижней строк и боковых столбцов, a_2 – числа в угловых ячейках.

Первый фильтр (а) является фильтром нижних пространственных частот. Значение яркости каждого элемента выходного изображения определяется путем усреднения значений яркости ближайших к нему соседних элементов исходного изображения. Сумма всех коэффициентов матрицы равна единице, что необходимо для сохранения среднего значения яркости изображения при фильтрации. ПЧХ этого фильтра приведена на Рис. 4, а.

Такой фильтр уменьшает заметность шума на изображении, но при этом сглаживаются резкие перепады яркости, ухудшается передача границ объектов, могут пропадать мелкие детали изображения.

Второй фильтр является фильтром верхних пространственных частот. Значения соседних элементов вычитаются из центрального элемента изображения. Сумма всех коэффициентов равна 1. В результате

фильтрации подчеркиваются границы объектов, повышается резкость изображения, но, одновременно, становится более заметным шум. ПЧХ этого фильтра показана на Рис. 4, б.

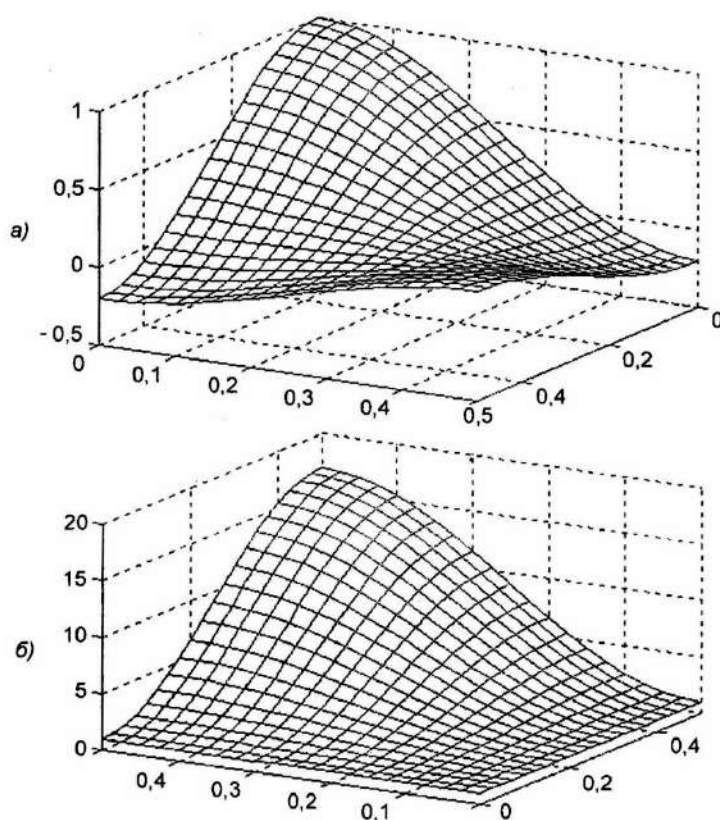


Рис. 4. ПЧХ пространственных фильтров.

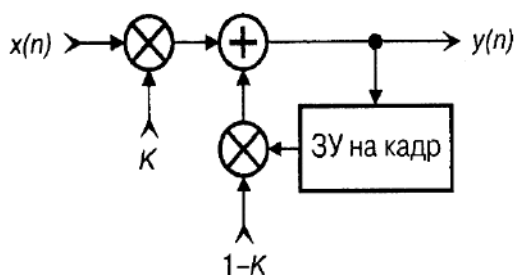
При фильтрации изображений применяются двумерные медианные фильтры. При этом учитываются «соседи» не только по горизонтали, но и по вертикали. Медианный фильтр хорошо устраняет точечные помехи и шумы, сохраняя при этом резкие перепады яркости на границах объектов.

Рассмотрим теперь применение цифровой фильтрации для подавления шумовых составляющих, располагаемых в одной полосе частот с сигналами яркости и цветности. Чтобы отфильтровать их без ухудшения па-

раметров качества изображения, необходимо использовать различия в структуре спектров полезного сигнала и шума.

Простейший вариант – это ограничение полосы частот телевизионного сигнала, однако вместе с этим будут подавлены и высокочастотные составляющие сигнала, что приведет к ухудшению четкости по горизонтали и резкости границ объектов. Нежелательно использовать и простой пространственный ФНЧ, который подавляет высокие пространственные частоты и, соответственно, будет влиять на четкость изображения как по горизонтали, так и по вертикали. Медианный фильтр устранил точечные помехи, но обработка изображения с его помощью может привести к потере малоразмерных контрастных деталей изображения.

Значительно лучшие результаты дает цифровая фильтрация во времени по отдельности для каждого элемента изображения в кадре (Рис. 5).



Рекурсивный шумопонижающий фильтр с задержкой на кадр

Рис. 5. Рекурсивный шумопонижающий фильтр.

Входной цифровой сигнал умножается на коэффициент K и суммируется с выходным сигналом, задержанным ровно на один кадр и умноженным на $(1-K)$.

При этом сигнал каждого элемента изображения очередного кадра на входе фильтра будет суммироваться с сигналом соответствующего элемента предыдущего кадра на выходе фильтра. Тем самым, обеспечивается усреднение по времени сигналов для каждого элемента изображения.

Увеличения соотношения сигнал/шум основано на том, что в неподвижных или медленно меняющихся изображениях полезные сигналы элементов изображения повторяются от кадра к кадру, в то время как шум носит случайный характер. Характер воздействия схож с принципом работы аналогового синхронного фильтра. Соответственно, АЧХ такого фильтра носит гребенчатый характер с полосой пропускания на частотах, кратных частоте кадров 25 Гц. Ширина полосы пропускания при этом зависит от **К** и расширяется с его увеличением. Как мы видим, при передаче неподвижного изображения такой фильтр близок к идеальному, однако воздействие такого фильтра на изменяющихся изображениях будет создавать наложение предыдущих кадров на последующие, что приведет к смазыванию изображений движущихся объектов. Для устранения этого недостатка в схему вводится детектор движения, обрабатывающий изменение яркости элементов от кадра к кадру. Если это изменение невелико, параметр **К** устанавливается малым. В обратном же случае – **К** близок к единице, и воздействие фильтра минимально.

Заметим, что хорошие результаты при использовании данного фильтра достигаются благодаря тому, что принцип их работы согласуется со свойствами зрения. Человек меньше замечает шум на движущихся изображениях и в областях с яркими перепадами яркости, где шумопонижающий фильтр не действует, и сильнее воспринимает мешающее воздействие шумов на неподвижных и относительно гладких участках изображений, на которых как раз и работает фильтр.

Цифровые фильтры применяются также в декодерах сигналов цветности для подавления эхо-сигналов в приемниках преобразования разверток. К данным применениям мы вернемся позже при рассмотрении схем приема и обработки ЦТС в приемных устройствах.

4. ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ СЖАТИЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИГНАЛОВ

4.1. МЕХАНИЗМЫ СЖАТИЯ ВИДЕОДАННЫХ

Как было отмечено, особенностью формирования цифровых видеосигналов является большой объем данных, получаемых в процессе преобразования оптических изображений [4.3]. Так, для передачи в последовательной форме ЦТС с форматом дискретизации 4:2:2 со скоростью передачи двоичных символов 243Мбит/сек необходим канал связи с шириной полосы не менее 121,5 МГц, поскольку по каналу связи с полосой пропускания ΔF можно передавать без существенных потерь не более $2\Delta F$ бит информации за секунду. Ясно, что ни стандартный канал наземного телевизионного вещания, имеющий ширину полосы не более 8 МГц, ни спутниковый канал с полосой 27 МГц, непригодны для передачи ЦТС. Такие же затруднения возникают и при необходимости архивации видеоданных.

Кодирование видеоинформации позволяет использовать каналы связи с ограниченной пропускной способностью, увеличить скорость передачи или при заданной пропускной способности канала увеличить число одновременно передаваемых программ.

В общем, кодирование представляет собой операцию преобразования сообщения в последовательность символов другого алфавита. Эффективное сжатие видеоинформации в этом случае возможно благодаря ее большой пространственной и временной избыточности.

Заметим, что для задачи передачи видеоинформации требуется обработка сигналов в реальном времени и обеспечение соответствующей помехозащищенности; для архивирования, как правило, этого не требуется, поэтому оно может быть реализовано при помощи программных средств, более дешевых, но в то же время допускающих применение более сложных алгоритмов.

Кодирование видеоданных преследует цель формирования цифрового потока с минимальной скоростью передачи за счет снижения коррелированности цифрового потока данных, поэтому в рассматриваемых задачах при выборе алгоритмов и параметров кодирования руководствуются данными статистической модели входного изображения (все, что представляет в сигнале четко организованную структуру, предсказуемо, и, следовательно, избыточно). При этом практически не учитывается, каким образом эти цифровые потоки далее передаются по каналам связи. С информационно-системной точки зрения этот вид кодирования относится к виду, который называется «кодированием источника».

Вместе с этим, в цифровых видеосистемах используют и другой вид кодирования – помехоустойчивое кодирование. Его назначение состоит в том, чтобы преобразованный в результате кодирования источника цифровой сигнал в канале передачи или устройстве записи подвергался минимальному воздействию помех. В гипотетическом канале связи без помех эта операция, естественно, не требуется. В любом реальном канале связи или накопителе помехи присутствуют, причем их вид и влияние определяются физической реализацией канала или накопителя. Например, в дисковом оптическом или магнитном накопителе возможны выпадения полезного сигнала, в кабельном канале – отражения и затухание, в радиоканале – импульсные помехи и т.д. Использование различных видов модуляции и помехоустойчивого кодирования позволяет более точно учитывать и бороться с помехами в различных каналах, имеющих разную физическую природу. Однако чаще всего это сопряжено с введением в сигнал некоторой избыточности, как правило, меньшей, чем устраняется при кодировании источника.

С учетом вышеизложенного, структурная схема рассмотренной части цифровой ТВС может быть представлена в виде, приведенном на Рис. 1.

В процессе передачи происходят следующие преобразования сигнала изображения:

- аналоговый сигнал изображения преобразуется в цифровой;

- цифровой сигнал в кодере подвергается процедуре уменьшения информационной избыточности, в результате чего реализуется процедура сжатия (кодер источника);

- в результате последующего помехоустойчивого кодирования (кодер канала) сигнал снова приобретает определенную избыточность, за счет чего в приемнике, при возникновении ошибок передачи, возможно восстановление неискаженного сжатого цифрового потока.

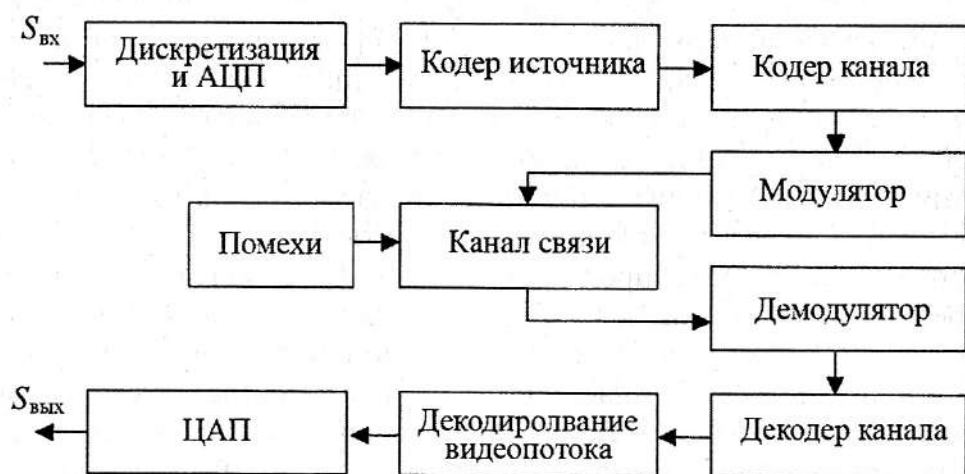


Рис. 1. Структурная схема цифровой ТВС.

С целью формирования сигнала, пригодного для передачи по конкретному каналу связи, используется модулятор. В приемном устройстве реализуются обратные процедуры – демодуляция, декодирование и цифро-аналоговое преобразование.

Любое реальное телевизионное изображение обладает пространственной и временной избыточностью благодаря сильной корреляции его отдельных элементов [4.1.]. Наличие шума в изображении снижает корреляцию и уменьшает возможности сжатия. Априорное знание статистических свойств изображения и шума позволяет подавить его в исходном изображении с помощью предфильтрации с использованием рекурсивной адаптивной и трехмерной медианной фильтрации. Первая эффективно по-

давляет «белый» шум путем усреднения близких значений видеосигнала в последовательных кадрах, вторая подавляет импульсные помехи. При этом, как правило, теряется также и часть информации, присущей самому изображению, но его субъективное качество обычно становится лучше.

Выделяются две группы алгоритмов кодирования: кодирование без потерь (обратимое) и с потерями (Рис. 2).

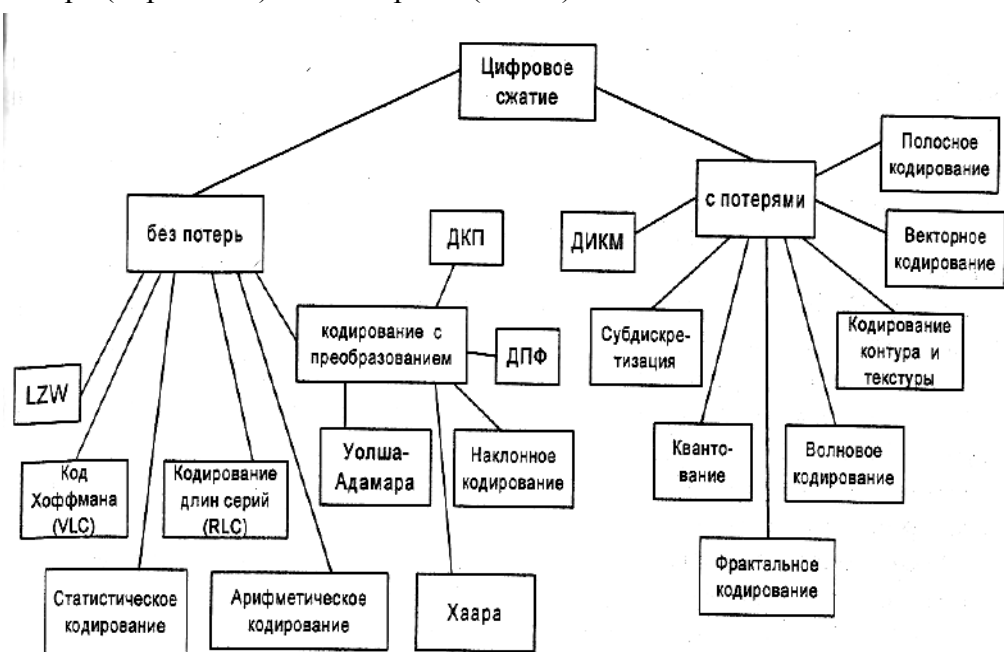


Рис. 2. Алгоритмы кодирования.

В первой из них не происходит потерь информации, содержащейся в сигнале, формируемом датчиком изображения, и данные после декодирования полностью совпадают с данными до кодирования. Коэффициент сжатия, достигаемый при использовании этих методов, зависит от статистических свойств изображений (в частности, уровня шума) и от правильного согласования с моделью, положенной в основу применяемого метода кодирования, и обычно находится в пределах от 1 до 10 для графических изображений и, как правило, не превышает двух для реальных зашумленных изображений. Эти методы широко применяются как составная часть алгоритмов с потерями.

Другой класс алгоритмов реализует сжатие с потерями. При таком сжатии не гарантируется, что изображение после декодирования полностью совпадет с оригиналом. Однако их отличие, как правило, незаметно для глаза. Реализация алгоритмов с потерями сопряжена со значительными вычислительными затратами.

Рассмотрим некоторые примеры кодирования цифровых сигналов, используемого в видеосистемах с целью сжатия сигналов изображений [4.3].

Кодирование длин серий (RLC).

При этом методе длинным непрерывным последовательностям одинаковых битов присваиваются отдельные кодовые слова. Предположим, имеется следующий непрерывный поток байтов:

```
00101011
00101011
00101011
00101011
00101011
00101011
00101100
00101100
00101100
00101100
00101100
```

Сразу видно, что такой поток короче можно записать, как 6 раз по 00101011 и 5 раз – 00101100, т.е.

```
00000110 – 6 раз
00101011
00000101 – 5 раз
00101100.
```

Однако, если входной файл состоит из неповторяющихся байтов, то размер файла после кодирования может и возрасти.

Кодирование методом Хаффмана

Этот метод кодирования является одним из способов сжатия без потерь. Он является префиксным кодом, в котором длина кодового слова обратно пропорциональна встречаемости кодируемого элемента, т.е. по аналогии с азбукой Морзе часто встречающимся элементам соответствуют короткие коды, редко встречающимся – длинные. Пусть алфавит источника содержит четыре символа **a, b, c, d** с вероятностями появления, **соответственно, 0.5, 0.25, 0.125 и 0.125**. Если каждому из символов присвоить двухбитовые значения **00, 01, 10, 11**, средняя длина кодового слова составит 2 бита на символ. Присвоим теперь символу **a** значение **0**, символу **b** – **10**, **c** – **110** и **d** – **111**. Рассчитывая

$$1 \times 0.5 + 2 \times 0.25 + 3 \times 0.125 = 1.75 \text{ бит},$$

заметим, что максимальная длина символа возросла, число битов, требуемых для передачи сообщения, сократилось. Адаптивная версия кода Хаффмана применяется, если вероятность появления кодовых слов изменяется в процессе передачи. По своей эффективности данный код близок к теоретическому пределу расхода битов и называется энтропийным (то есть в нем отсутствует избыточность).

LZW – кодирование

В отличие от метода Хаффмана, в данном методе не требуется перед кодированием создавать кодовую таблицу. Началом алгоритма является простая таблица кодов и по мере продвижения формируется более эффективная, то есть алгоритм является адаптивным. В отличие от кода Хаффмана, обычно не используют более короткие коды для чаще встречающихся элементов. Алгоритм основан на использовании корреляции между соседними элементами изображения и устранении на этой основе избыточности.

Коэффициент сжатия, достигаемый LZW, обычно не превышает трех, так и для любого метода без потерь. Следует отметить, что плохо сжимаются зашумленные изображения, так как в них трудно ожидать наличия повторяющихся участков. Код LZW используют в компьютерной технике для архивации графических файлов.

Арифметическое кодирование

К группе энтропийных относится и арифметический код. Арифметическое кодирование объединяет методы Хаффмана и LZW. Подобно кодированию по схеме Хаффмана, создаются более короткие коды для часто повторяющихся символов и более длинные – для редко повторяющихся. При этом, подобно кодированию LZW, сжимаются последовательности величин (яркости), а не сами величины. Процедура состоит в том, что всей совокупности символов сообщения ставится в соответствие интервал $[0,1]$, который разбивается на участки, соответствующие исходным вероятностям символов, и это разбиение сообщается декодеру. После очередного символа интервал пересчитывается на новые пределы, соответствующие вероятности появления этого символа и вновь разбивается пропорционально исходным вероятностям. С поступлением каждого нового символа размер интервала уменьшается в строгом соответствии с вероятностями символов. Более встречающиеся символы меньше сужают диапазон, чем редкие, и добавляют меньше битов в код интервала. По окончании цикла кодирования формируется некоторый, весьма узкий интервал, однозначно характеризующий передаваемую последовательность символов.

Декорреляция сигналов изображения

В рассмотренных моделях источников сигналы считались независимыми, то есть вероятность наступления каждого события считалась фиксированной. В телевизионных изображениях корреляционные связи очень велики, а, следовательно, велика пространственная и временная избыточность информации в изображении.

Пространственная избыточность изображения обусловлена наличием в видеокадре значительных по размеру однотонных одинаково окрашенных участков. Для ее устранения используют различные методы декорреляции. Наиболее часто применяемые из них – трансформация в спектральную область с последующей обработкой. Для этого можно использовать преобразования ДПФ, ДКП, Уолша-Адамара, Хаара или Карунена-Лоэва. Амплитуды базисных функций – трансформанты, вычисляемые в процессе преобразования, имеют существенно меньшую корреляцию между собой, чем исходные отсчеты. В процессе последующих преобразований осуществляется их эффективное кодирование с целью сжатия цифрового потока. В технике сжатия изображений эти преобразования обычно используют для внутрикадрового сжатия, то есть в пространственной двумерной области. При этом операция преобразования сводится к матричному перемножению вектора изображения в пространственной области с трансформирующей матрицей.

Вид трансформирующей матрицы (т.е. базиса преобразования) в значительной степени определяет как декоррелирующие свойства преобразования, так и сложность ее реализации. Так ДПФ, обладая неплохими декоррелирующими свойствами, является комплексным, что заметно усложняет его техническую реализацию. Преобразование Уолша-Адамара, напротив, очень легко реализуется, так как содержит в матрице преобразования только коэффициенты 1 и -1 . Однако его декоррелирующие свойства несколько хуже. Наилучшими декоррелирующими свойствами обладает преобразование Карунена-Лоэва. Оно формирует индивидуальную матрицу преобразования для каждого изображения в отдельности, что обуславливает как его наилучшие декоррелирующие свойства, так и высокие вычислительные затраты.

В технике сжатия сигналов изображения наибольшее распространение получило ДКП, представляющее собой оптимальный компромисс между рядом противоречивых требований. Его декоррелирующие свойства занимают положение между преобразованиями Фурье и Карунена-Лоэва, оно является вещественным, и небольшие неточности при передаче трансформант не слишком заметны зрителем на восстановленном изображении.

Большое значение при сжатии изображений имеет выбор длины последовательности M , на которой производится преобразование, или размера блока (он обычно выбирается квадратным размером $M \times M$) для двумерного случая. Большая длина последовательности (размер блока) приводит к существенному увеличению вычислительных затрат и не учитывает того факта, что реальное изображение состоит из многих объектов с резкими границами. При очень малом размере блока ухудшаются декоррелирующие свойства из-за увеличения влияния краевых эффектов. Как компромисс, обычно выбирают размеры блоков 8×8 или 16×16 элементов. В результате преобразования блока 8×8 образуется блок из 64 коэффициентов ДКП.

При переносе в частотную область основная мощность сигнала концентрируется вблизи постоянной составляющей сигнала изображения, которую представляет верхний левый коэффициент. Он является арифметическим средним значением коэффициентов всех элементов блока. Очевидно, что непосредственно ДКП не приводит к сжатию цифрового сигнала. Однако, учитывая то, что амплитуды высокочастотных компонент обычно очень малы или равны нулю, это создает благоприятные условия для дальнейшего эффективного статистического кодирования. В этом и состоит основное достоинство и цель перевода изображения в базис пространственных частот. Следует также учитывать, что глаз человека существенно менее чувствителен к ошибкам передачи высокочастотных составляющих, что допускает их более грубую последующую дискретизацию.

Преобразование цветности и субдискретизация

Мы уже отмечали при рассмотрении ДПФ, что глаз человека менее чувствителен к цветовым составляющим мелких деталей изображения, чем к яркостным. Поэтому число выборок цветности C_T и C_B может быть меньшим, чем выборка Y . Эта процедура называется «субдискретизацией», и она также позволяет уменьшить избыточность изображения.



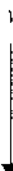

Квантование

Квантование является звеном обработки сигнала, в котором возникают потери. Оно определяет точность хранения результатов ДКП и коэффициент сжатия. Каждое из значений ДКП делится на коэффициент квантования, индивидуальный для каждой пространственной частоты, который берется из заранее определенной таблицы коэффициентов квантования размером 8 x 8 (естественно, она должна быть одинакова для кодера и декодера). Эта таблица может быть взята по умолчанию, или формируется кодером для конкретной статистики изображения и передается декодеру вместе со сжатыми данными. Кроме того, в случае многокомпонентного сигнала таблицы могут различаться для разных компонент, например, в Таблице 1 приведен пример квантования для яркости (а) и цветности (б).

Таблица 1.

Таблицы квантования.

Пример таблиц квантования

	u									u									
																			
v		16	11	10	16	24	40	51	61	v		17	18	24	47	99	99	99	99
		12	12	14	19	26	58	60	55			18	21	26	66	99	99	99	99
		14	13	16	24	40	57	69	56			24	26	56	99	99	99	99	99
		14	17	22	29	51	87	80	62			47	66	99	99	99	99	99	99
		18	22	37	56	68	109	103	77			99	99	99	99	99	99	99	99
		24	35	55	64	81	104	113	92			99	99	99	99	99	99	99	99
		49	64	78	87	103	121	120	101			99	99	99	99	99	99	99	99
		72	92	95	98	112	100	103	99			99	99	99	99	99	99	99	99
Коэффициенты квантования для яркостной составляющей (а)												Коэффициенты квантования для составляющей цветности (б)							

Нетрудно увидеть, что с ростом пространственной частоты коэффициенты косинусного преобразования квантуются все более грубо, поскольку с ростом пространственной частоты снижается контрастная чувствительность глаза, а, значит, отсутствует необходимость передавать

составляющие этих частот с большой точностью. Преобразования, происходящие в процессе кодирования/декодирования, показаны в Таблице 2.

Таблица 2.

Преобразования, происходящие в процессе кодирования/декодирования.

Преобразование сигналов при кодировании / декодировании															
139	144	149	153	155	155	155	155	1260	-1	-12	-6	2	-2	-2	-2
144	151	153	156	159	156	156	156	-22	-17	-6	-3	-3	0	1	-1
150	155	160	163	158	156	156	156	-11	-10	-1	2	1	-1	-1	-1
159	161	165	160	160	159	159	159	-7	-2	0	2	1	0	0	0
159	160	161	162	162	155	155	155	0	-1	1	1	-1	-1	1	2
161	161	161	161	160	157	157	157	2	0	1	-1	-1	2	2	0
162	162	161	163	162	157	157	157	-1	-1	0	-1	0	2	1	-1
162	162	161	161	163	158	158	158	-3	1	-3	-1	2	1	-1	-1
Выборки оригинала (а)								Коэффициенты DCT (б)							
16	11	10	16	24	40	51	61	158	0	-1	0	0	0	0	0
12	12	14	19	26	58	60	55	-2	-1	0	0	0	0	0	0
14	13	16	24	40	57	69	56	-1	-1	0	0	0	0	0	0
14	17	22	29	51	87	80	62	-1	0	0	0	0	0	0	0
18	22	37	56	68	109	103	77	0	0	0	0	0	0	0	0
24	35	55	64	81	104	113	92	0	0	0	0	0	0	0	0
49	64	78	87	103	121	120	101	0	0	0	0	0	0	0	0
72	92	95	98	112	100	103	99	0	0	0	0	0	0	0	0
Таблица квантования (в)								Коэффициенты после квантования (г)							
1264	0	-10	0	0	0	0	0	142	144	147	150	152	153	154	154
-24	-12	0	0	0	0	0	0	149	150	153	155	156	157	156	156
-14	-13	0	0	0	0	0	0	157	158	159	161	161	160	159	158
-14	0	0	0	0	0	0	0	162	162	163	163	162	160	158	157
0	0	0	0	0	0	0	0	162	162	162	162	161	158	156	155
0	0	0	0	0	0	0	0	160	161	161	161	160	158	156	154
0	0	0	0	0	0	0	0	160	160	161	162	161	160	158	157
0	0	0	0	0	0	0	0	160	161	163	164	164	163	161	160
Коэффициенты после обратного квантования (д)								Восстановленные величины отсчетов (е)							
								3	0	-2	-3	-3	-2	-1	-1
								5	-1	0	-1	-3	1	0	0
								7	3	-1	-2	3	4	3	2
								3	1	-2	3	2	1	-1	-2
								3	2	1	0	-1	3	1	0
								-1	0	0	0	0	1	-1	-3
								-2	-2	0	-1	-1	3	1	0
								-2	-1	2	3	1	5	3	2
Погрешности восстановления отсчетов (ж)															

Кодирование коэффициентов преобразования

После квантования коэффициентов ДКП осуществляют следующий этап процедуры сокращения избыточности. Коэффициенты преобразования, как было отмечено выше, группируются в определенной последовательности: в левом верхнем углу таблицы коэффициентов находится постоянная составляющая, вправо идет возрастание горизонтальных частот, а вниз – вертикальных. Группировка коэффициентов квантования имеет большое значение при использовании кода Хаффмана или арифметического кодирования, применяемых для сокращения избыточности передаваемой информации.

Для этого формируется линейная последовательность квантованных коэффициентов ДКП блока путем их считывания в зигзагообразном порядке (Рис. 3).



Рис. 3. Порядок считывания коэффициентов ДКП.

Коэффициенты следуют в последовательности возрастания пространственных частот. Такая последовательность далее кодируется методом Хаффмана.

Схематически этот процесс представлен на Рис.4. В рассмотренном примере блок будет закодирован потоком 01000 0001101 111 111 111 0111. 111 10, занимающий 30 бит или 3,75 байта. Таким образом, на уровне блока удалось достигнуть коэффициента сжатия около 17 (исходный блок содержал 64 байта).

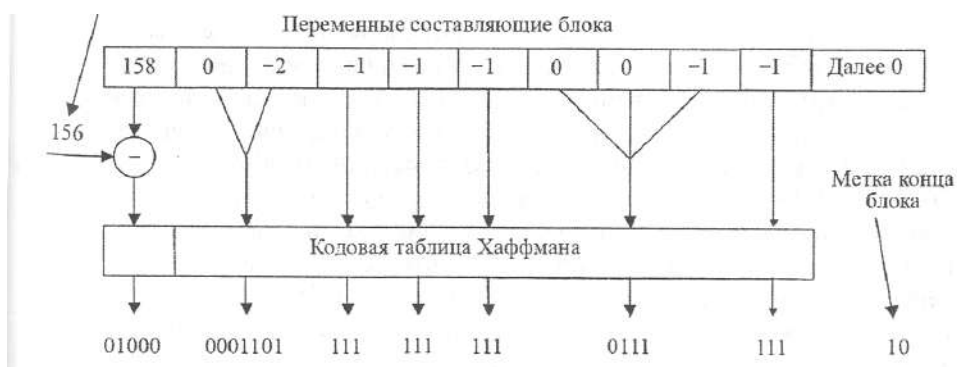


Рис. 4. Кодирование последовательности с применением метода Хаффмана.

Временная избыточность изображения проявляется в относительно малом отличии двух последовательных кадров. Как правило, изображение представляет собой неподвижный задний план с перемещающимися на нем объектами. Можно сократить передаваемый массив информации, передавая содержание одного кадра (опорного), а вместо следующего передавать разностную информацию. На этом принципе основан метод дифференциально-импульсной кодовой модуляции (ДИКМ). В нем используется предсказание кадра на основе одного или нескольких предыдущих и последующих кадров. Отметим, что для точности предсказания в качестве опорного берут не оригинальный предыдущий кадр, а восстановленный в декодере кодера.

Для улучшения результатов предсказания применяется процесс, называемый «компенсацией движения». Изображение в текущем кадре раз-

бывают на блоки и для каждого такого блока ищут его наиболее вероятное положение в предыдущем кадре, сопоставляя его со всеми блоками такого же размера в заданной области поиска (Рис. 5).

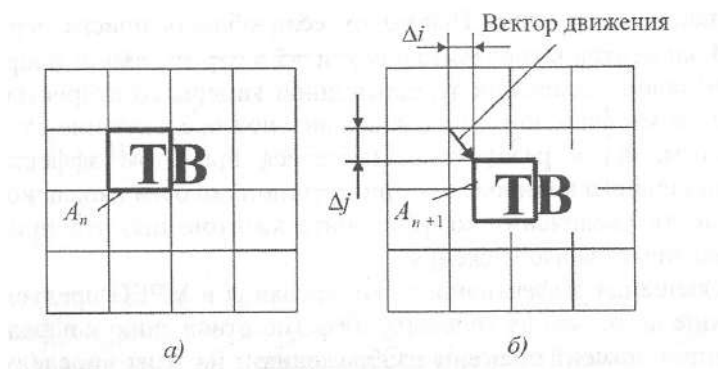


Рис. 5. Процесс компенсации движения.

Этот процесс называется «сопряжением блоков». В большинстве форматов блок отсчетов, называемый «макроблоком», имеет размер 16x16 пикселей. Чем больше размер блока, тем эффективнее сжатие, но труднее найти подходящее сопряжение. В этом методе вычисляют величину и направление перемещения – вектор перемещения и передают его в декодер. В реальных кодерах процесс устранения избыточности происходит следующим образом: **отсчеты сигнала, соответствующие одному видеокадру, группируются в макроблоки 16x16, производится компенсация движения, далее макроблоки разбиваются на блоки отсчетов яркости и цветности размером 8x8 пикселей, для них вычисляются межкадровые разности, и уже они подвергаются ДКП для устранения пространственной избыточности.** При этом удается достичь величины коэффициента сжатия до 100 и более.

Волновое кодирование

Перспективный подход к сжатию изображений основан на разложении изображения на составляющие по разрешающей способности. Как известно, изображение состоит из крупных деталей, составляющих основу

его содержания, и мелкой структуры. Во многих случаях полезно разделить указанные составляющие, чтобы передавать их отдельно, а в приемной части системы объединить эти составляющие в полное изображение.

В последние годы все большую популярность получает новый подход к сжатию изображений, основанный на применении биортогонального вейвлет (волнового) преобразования [4.2].

Рассмотрим сначала одномерный случай. Пусть есть исходный цифровой сигнал $x(n)$, $n = 0, 1, \dots, N - 1$. В результате преобразования Хаара он преобразуется в два цифровых сигнала $x_1(m)$ и $x_2(m)$, $m = 0, 1, \dots, N/2 - 1$ (N предполагается четным), в соответствии с соотношениями

$$x_1(m) = [x(2m+1) + x(2m)]/2,$$

$$x_2(m) = x(2m) - x(2m+1).$$

Отсчеты сигнала $x_1(m)$ получаются путем усреднения пар смежных отсчетов исходного сигнала $x(n)$. Поэтому сигнал $x_1(m)$ содержит информацию с уменьшенной в 2 раза разрешающей способностью.

В то же время сигнал $x_2(m)$, отсчеты которого равны разностям значений смежных отсчетов исходного сигнала, содержит информацию о мелких деталях исходного сигнала. Каждый из сигналов $x_1(m)$ и $x_2(m)$ содержит $N/2$ отсчетов, и вместе они несут всю информацию, имеющуюся в исходном сигнале.

Далее преобразование Хаара может быть применено к сигналу $x_1(m)$ и т.д. Соответствующими обратными преобразованиями могут быть последовательно восстановлены сигналы с более высокими разрешающими способностями, вплоть до исходного сигнала.

Важно отметить, что при выполнении прямого преобразования Хаара (как и прямого вейвлет-преобразования другого типа) количество отсчетов в получаемых сигналах на каждой ступени преобразования уменьшается в 2 раза, а количество самих сигналов возрастает. При этом суммарное количество отсчетов во всех полученных сигналах всегда равно N .

Вейвлет-преобразование изображения осуществляется путем последовательного выполнения вейвлет-преобразований по двум координатам (Рис. 6).

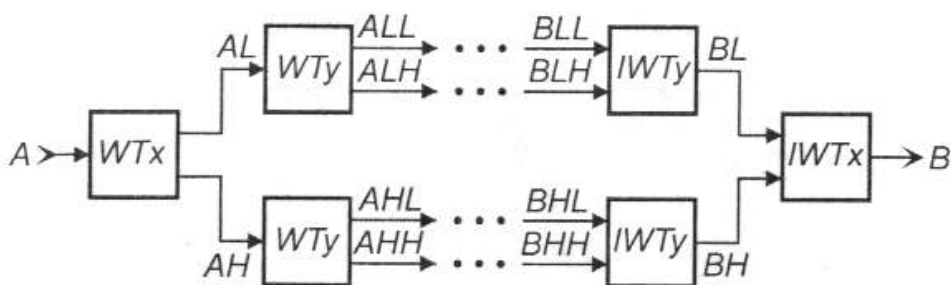


Рис. 6. К выполнению вейвлет-преобразований по двум координатам.

В блоках WT_x и WT_y выполняются вейвлет-преобразования одномерных цифровых сигналов, например, преобразования Хаара. В блоках IWT_x и IWT_y выполняются соответствующие обратные преобразования.

На первом этапе выполняется вейвлет-преобразование по горизонтальной координате x (WT_x). При этом элементы изображения A , расположенные в каждой строке матрицы, последовательно поступают на блок WT_x , причем, одна строка обрабатывается за другой. В результате формируются два изображения: AL и AH . В изображении AL разрешающая способность по горизонтали уменьшена в два раза. Изображение AH содержит информацию о деталях изображения, имеющих малые размеры по координате x .

Затем каждое из изображений AL и AH подвергается вейвлет-преобразованию по вертикальной координате y . При этом на блоки WT_y последовательно поступают элементы изображения, расположенные в столбцах соответствующих матриц. В результате получают четыре матрицы. Матрица ALL соответствует изображению, подобному исходному, но с уменьшенными в два раза разрешающими способностями по обеим координатам. Матрица ALH содержит детали исходного изображения, имеющие относительно большие размеры по горизонтали, но с минимальными размерами по вертикали. Матрица AHL содержит детали изображения, крупноразмерные по вертикали, но с минимальными размерами по гори-

зонтали. Наконец, матрица АНН содержит детали изображения, имеющие малые размеры по обеим координатам.

Разложение на поддиапазоны по разрешающей способности позволяет анализировать или передавать изображение с разными степенями детальности. Для получения наиболее грубого представления об изображении достаточно использовать только информацию, содержащуюся в матрице ALL. Добавление других поддиапазонов увеличивает точность представления изображения.

Вейвлет-преобразование является эффективным средством сжатия изображений. Как правило, для представления данных, содержащихся в матрицах ALH, AHL, АНН может использоваться меньшее число двоичных разрядов, т.е. более грубое квантование, чем для исходного изображения. Это обусловлено тем, что сигналы малоразмерных деталей имеют меньший размах. Данные из всех матриц после квантования объединяются в общий поток данных. В приемной части восстанавливается исходное количество двоичных разрядов.

Важным преимуществом вейвлет-преобразования перед ДПФ и ДКП является раздельное выполнение преобразований по двум координатам. Общее число вычислительных операций при вейвлет-преобразовании изображения, содержащего $N \times N$ элементов, пропорционально N^2 , т.е. существенно меньше, чем для ДПФ и ДКП, даже в случаях применения для их реализации быстрых алгоритмов.

Векторное кодирование (квантование)

При векторном квантовании квантуется (кодируется) группа из N -отсчетов цифрового сигнала, называемая « N -мерным вектором». Множество всех встречающихся в сигнале N -мерных векторов разбивается на L подмножеств так, что входящие в каждое подмножества векторы мало отличаются друг от друга. В каждом подмножестве выбирается один эталонный вектор, представляющий все векторы этого подмножества. Все эталонные векторы записываются в кодовую книгу, и каждому из них присваивается определенное кодовое слово.

Процедура кодирования заключается в том, что для каждого N -мерного вектора в кодовой книге находится наиболее близкий к нему эталонный вектор, код которого поступает на выход кодера. Таким образом, для каждой группы из N отсчетов входного сигнала $x(n)$ передается одно кодовое слово.

Кодовая книга может изменяться в зависимости от свойств кодируемого сигнала. Построение кодовой книги является составной частью процесса кодирования, а ее содержание должно пересылаться в приемную часть системы вместе с кодовыми словами. Наиболее известным алгоритмом построения кодовой книги для кодирования изображений является алгоритм LBG. Задачей, решаемой с помощью этого и подобных ему алгоритмов, является построение кодовой книги минимального объема, позволяющая закодировать некоторое изображение, не превышая при этом установленный предел вносимых при кодировании искажений.

Векторное квантование относится к методам сжатия с потерями. Одним из достоинств векторного квантования является простота декодера, в котором выполняется только операция считывания эталонного вектора из кодовой книги.

В то же время, осуществляемый в кодере поиск эталонного вектора, наиболее близкого к кодируемому вектору, требует выполнения большого объема вычислений.

Фрактальное кодирование

Фрактальное кодирование изображений сходно по сущности с векторным квантованием, при котором в качестве элементов кодовой книги используются блоки, вырезанные из самого исходного изображения.

Фракталами называются рисунки, обладающие свойством самоподобия. При этом часть рисунка подобна всему рисунку в целом, но в меньшем масштабе. В этой части есть подобная ей часть еще меньших размеров и т.д. Пример фрактала показан на Рис.7.

При фрактальном кодировании используется свойство подобия деталей разного масштаба, встречающееся в реальных изображениях. Допус-

каются преобразования блоков кодируемого изображения, позволяющие добиться подобия этих блоков эталонным блокам (повороты, зеркальные отражения). Как и при векторном квантовании, кодирование занимает намного больше времени и вычислительных ресурсов, чем декодирование.

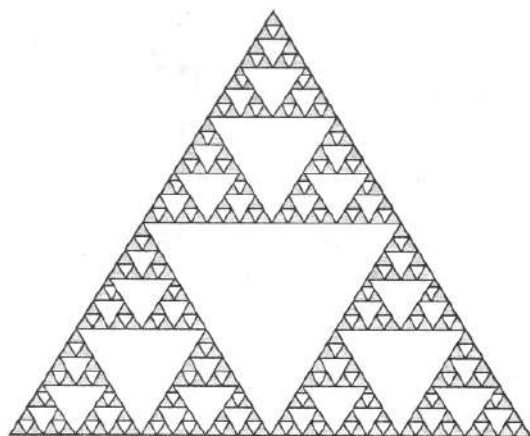


Рис. 7. Пример формирования фрактала.

Векторное квантование и фрактальное кодирование могут использоваться для кодирования звуковых сигналов и изображений, обеспечивая значительное сжатие информации.

Однако большой объем вычислений, требуемый при кодировании, пока что препятствует практическому применению этих методов в системах цифрового телевидения.

4.2. СЖАТИЕ АУДИОДАНЫХ

Из-за повышенной чувствительности уха к искажениям, сжатие звуковых сигналов оказывается более сложной задачей, чем видеокомпрессия. В то же время некоторые психофизиологические особенности слухового восприятия позволяют даже при существенной компрессии (6:1 и более) обеспечить звучание выходного сигнала, субъективно неотличимое от источника [4.1].

Как отмечалось, частотный диапазон восприятия простирается от 20 Гц до примерно 20 кГц, причем, область наибольшей чувствительности лежит между 1 кГц и 5 кГц.

Как и во всякой системе с преобразованием из временной в частотную область, в слуховой системе имеется некоторая неопределенность в разделении двух событий: несовершенное разделение по частоте приводит к тому, что ухо не в состоянии различить звуки с близкими частотами. Этот эффект называется «частотным маскированием». Кривая чувствительности слуха в отсутствие громких звуков показана на Рис. 1,а.

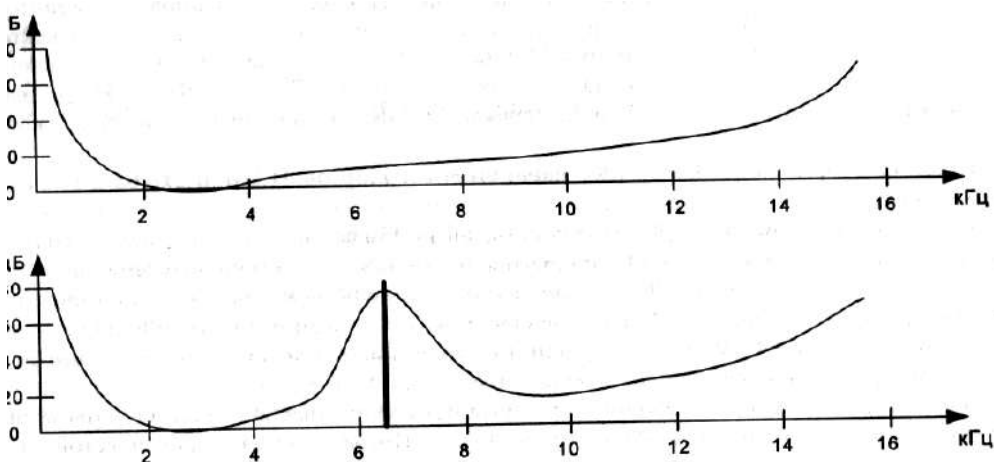


Рис. 1. Кривая слышимости человеческого слуха
а) в отсутствие громких звуков; б) в присутствии тонального звука.

В присутствии тонального звука кривая слышимости принимает вид, показанный на Рис. 1б. Граница восприятия вблизи маскирующего тона называется «порогом маскирования». Заметим, что кривая поднимается выше со стороны высоких частот, чем со стороны низких частот.

В результате длительных исследований удалось определить ширину и расположение частотных полос, в пределах которых действует эффект маскирования (Рис.2). Эти полосы получили название критических, и в полосе слухового восприятия их насчитывается 25. В области низких частот ширина полосы менее 100 Гц, в районе 2 кГц она равна 300 и возрастает до 4 кГц в области высоких частот.

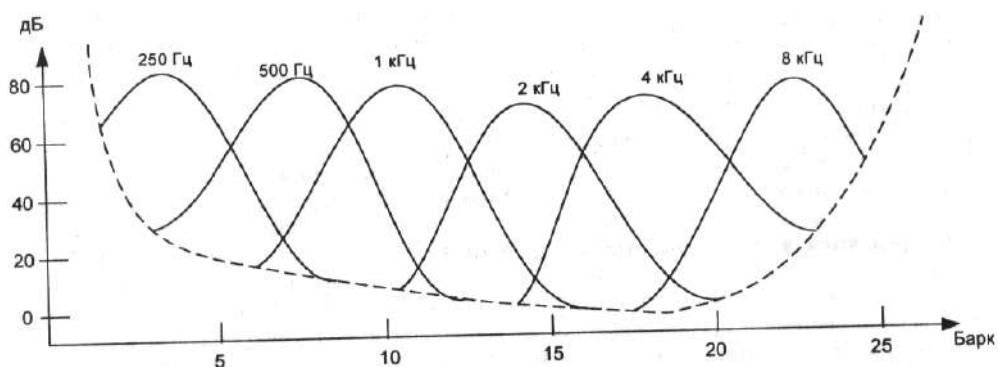


Рис. 2. Распределение критических полос.

Использование эффекта маскирования позволяет существенно сократить объем звукоданных, сохраняя приемлемое качество звучания. Принцип здесь очень простой: «Если какая-то составляющая не слышна, то и передавать ее не надо». На практике это означает, что в области маскирования можно уменьшить число битов на отсчет до такой степени, чтобы шум квантования все еще оставался ниже порога маскирования. Таким образом, для работы звукового кодера необходимо знать пороги маскирования при различных комбинациях воздействующих сигналов. Для вычисления этих порогов в кодер вводится узел психоакустической модели (ПАМ) звука.

Полосное кодирование и блок фильтров

Наилучшим методом кодирования звука оказывается полосное кодирование. Группа отсчетов входного звукового сигнала, называемая «кадром», поступает на блок фильтров, который содержит, как правило, 32 полосовых фильтра. Учитывая вышесказанное, хорошо бы иметь в блоке фильтров полосы пропускания, по возможности совпадающие с критическими. Однако практическая реализация цифрового блока фильтров с неравными полосами сложна и оправдана только в устройствах самого высокого класса. Обычно используются квадратурно-зеркальные фильтры (КЗФ) с равными полосами пропускания, охватывающие с небольшим взаимным перекрытием всю полосу слышимых частот (Рис. 3).

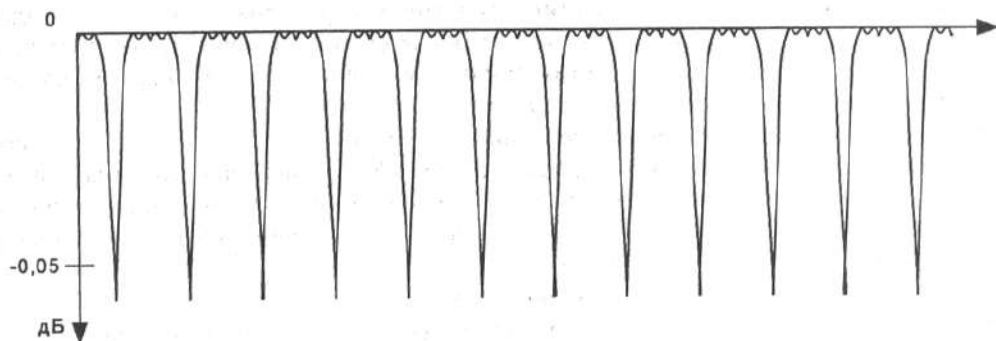


Рис. 3. Равномерное разбиение звуковых полос.

При частоте дискретизации 48 кГц полоса пропускания секции фильтра составляет 750 Гц. Каждая секция фильтра позволяет проводить расщепление полосы пропускания на две равные части, не увеличивая при этом объема данных в каждой половине полосы, т.е. с одновременной понижающей дискретизацией. Расщепление на $N = 2^m$ полос производится каскадным включением m -секций, содержащих, соответственно, 1, 2, 4... 2^{m-1} фильтров (Рис. 4).

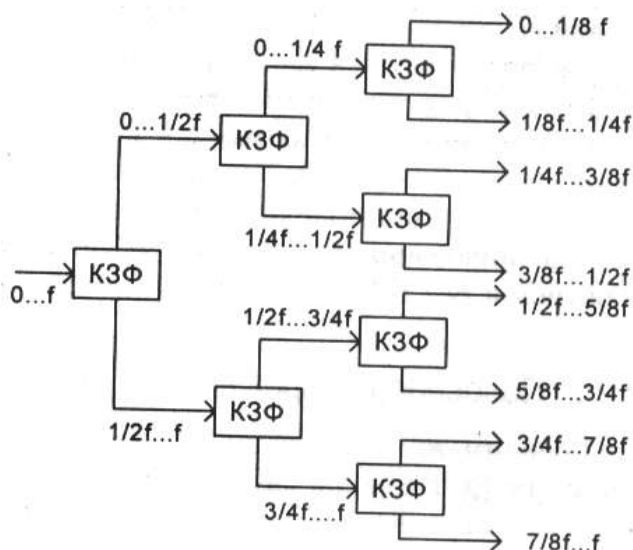


Рис. 4. Структура КЗФ.

На выходе каждого фильтра оказывается та часть входного сигнала, которая попадает в полосу пропускания данного фильтра. Далее в каждой полосе с помощью ПАМ анализируется спектральный состав сигнала и оценивается, какую часть сигнала следует передавать без сокращений, а какая лежит ниже порога маскирования и может быть переквантована на меньшее число битов. Поскольку в реальных звуковых сигналах максимальная энергия обычно сосредоточена в нескольких частотных полосах, может оказаться, что сигналы в других полосах не содержат различных звуков и могут вообще не передаваться. Наличие, например, сильного сигнала в одной полосе означает, что несколько вышележащих полос будут маскироваться и могут кодироваться меньшим числом битов. Для сохранения максимального динамического диапазона определяется максимальный отсчет в кадре и вычисляется масштабирующий множитель, который приводит этот отсчет к верхнему уровню квантования. Эта операция сродни аналоговому компандированию. На этот же множитель умножаются и все остальные отсчеты. Масштабирующий множитель передается к декодеру вместе с кодированными данными для коррекции коэффициента передачи последнего. После масштабирования производится оценка порога маскирования, и осуществляется перераспределение общего числа битов между всеми полосами.

Все вышеописанные операции не сокращали заметно объем данных, они были как бы подготовительным этапом к собственно сжатию звуко-данных. Как и при компрессии цифровых видеосигналов, основное сжатие происходит в квантова-теле. Исходя из принятых ПАМ решений о переквантовании отсчетов в отдельных частотных полосах, квантователь изменяет шаг квантования таким образом, чтобы приблизить шум квантования в данной полосе к вычисленному порогу маскирования. При этом на отсчет может понадобиться вместо 16..20 всего 4 или 5 битов!

Принятие решения о передаваемых компонентах сигнала в каждой частотной полосе происходит независимо от других и выполняется устройством динамического распределения битов. Сигналы на выходе частотных полос объединяются в единый цифровой поток с помощью мультиплексора.

Возможны три стратегии распределения битов.

В системе с прямой адаптацией кодер производит все расчеты и посылает результаты декодеру. Преимущество данного способа в том, что алгоритм распределения битов может обновляться и изменяться, не затрагивая работы декодера. Однако для пересылки дополнительных данных декодеру расходуется заметная часть общего запаса битов.

Система с обратной адаптацией осуществляет одинаковые расчеты и в кодере, и в декодере, поэтому нет необходимости пересылать декодеру дополнительные данные. Однако сложность и стоимость декодера значительно выше, чем в предыдущем варианте, и любое изменение алгоритма требует обновления или переделки декодера.

Компромиссная система с прямой и обратной адаптацией разделяет функции расчета распределения битов между кодером и декодером таким образом, что кодер производит наиболее сложные вычисления и посылает декодеру только ключевые параметры. В такой системе кодер не может быть существенно изменен, но настройка некоторых параметров допустима.

5. СТАНДАРТЫ СЖАТИЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИГНАЛОВ

5.1. СТАНДАРТЫ СЖАТИЯ НЕПОДВИЖНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ JPEG

Один из наиболее эффективных методов сжатия неподвижных изображений изложен в стандарте **JPEG** (Joint Photographic Expert Group).

Он обладает исключительно высоким коэффициентом сжатия при сохранении высокого качества изображения [5.2]. Среди известных программных реализаций алгоритма JPEG можно назвать файлы JFIF и JPEG-TIFF. В методе JPEG используют пространственную корреляцию сигналов отдельных элементов изображения, а также некоторые свойства зрительного анализатора.

Последовательность операций при кодировании, поясняемая структурной схемой на Рис. 1, включает:

- преобразование изображения RGB в пространство сигналов яркости и цветности;
- разбиение изображения на блоки 8x8 пикселей;
- выполнение быстрого двумерного ДКП (БДКП) в каждом блоке;
- квантование полученных коэффициентов ДКП с использованием таблицы коэффициентов квантования;
- энтропийное кодирование (методом Хаффмана или арифметическим кодированием) квантованных коэффициентов ДКП каждого блока изображения с формированием и использованием таблицы кодирования (таблицы кодов).

В результате кодирования исходное изображение преобразуется в сжатые видеоданные, записываемые в файл.

Последовательность операций при декодировании включает:

- декодирование энтропийного кода;
- деквантование коэффициентов ДКП для каждого блока 8x8 пикселей;
- обратное БДКП для каждого блока;
- объединение блоков в декодированное изображение.

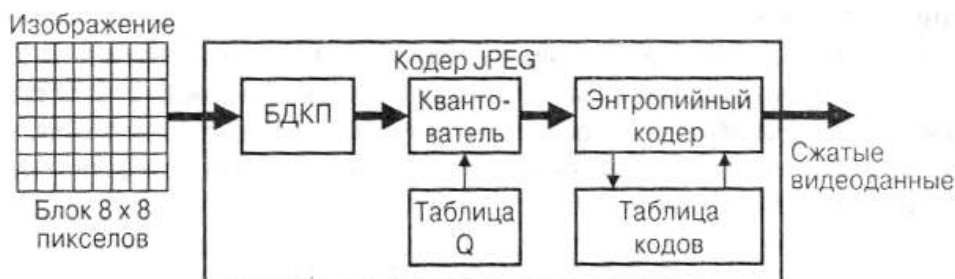


Рис. 1. Структурная схема кодирования по стандарту JPEG.

При декодировании энтропийного кода и при деквантовании используются соответствующие таблицы, которые считываются из файла со сжатыми видеоданными.

В стандарте JPEG предусмотрены 4 режима кодирования:

- последовательный, на основе ДКП;
- прогрессивный, на основе ДКП;
- без потерь;
- иерархический.

Самой крупной единицей кодирования во всех режимах является изображение, которое надо сжать. Изображение содержит только один кадр в последовательном и прогрессивном режимах, и этот кадр идентичен самому изображению. В иерархическом режиме изображение разделяется на несколько кадров.

Следующий уровень разбиения данных – скан, который содержит часть информации изображения. Разделение на сканы осуществляется по-разному в разных режимах.

В режиме последовательного кодирования на основе ДКП последовательно кодируются и декодируются все блоки изображения, которые составляют один скан.

Изображение может содержать одну или несколько составляющих. Полутоновое монохромное (черно-белое) изображение содержит одну составляющую. Цветное изображение содержит несколько составляющих, например, яркостную Y и две цветоразностные C_r и C_b . Для изображения, содержащего несколько составляющих, возможны варианты кодирования без перемежения и с перемежением. При кодировании без перемежения сначала кодируется первая составляющая, образуя первый скан, затем вторая составляющая, образуя второй скан, и т.д. При кодировании с перемежением блоки всех составляющих образуют один скан и кодируются и записываются в выходной поток данных поочередно. Например, в случае формата дискретизации 4:2:0, сначала кодируются 4 блока Y , образующие матрицу 2×2 , затем соответствующий им один блок C_b , затем — один блок C_r , затем следующие 4 блока Y и т.д.

Прогрессивный режим сжатия предполагает наличие более одного скана и другой порядок воспроизведения декодируемого изображения. Декодирование первого скана каждой составляющей изображения должно обеспечить воспроизведение всего изображения с каким-то начальным, относительно невысоким качеством. Декодирование каждого последующего скана должно давать изображение со все более и более высоким качеством. Такой вариант может быть полезен для быстрого просмотра и поиска изображений в базах данных, в Интернете и других подобных применениях

Используются два способа получения постепенного повышения качества декодируемого изображения. Первый способ состоит в том, что в данном скане из каждого блока изображения кодируется только определенный диапазон коэффициентов из последовательности, полученной зигзагообразным считыванием. Этот способ называется «спектральной селекцией», так как каждый диапазон обычно содержит коэффициенты, занимающие нижнюю или верхнюю часть частотного спектра блока 8×8 пикселей, т.е. является спектральным диапазоном. Второй способ состоит в том, что в первом скане изображения кодируют наиболее значимые биты коэффициентов всех блоков. Каждый следующий скан дает повыше-

ние точности коэффициентов ДКП на один бит. Такой способ называется «последовательным приближением».

Режим JPEG без потерь информации основан на использовании кодирования с предсказанием по соседним элементам изображения. Все операции в этом режиме полностью обратимы, но достигаемое сжатие невелико.

В иерархическом режиме изображение кодируется как последовательность кадров. Первый кадр каждой составляющей является неразностным (обычным). За каждым неразностным кадром могут следовать один или несколько разностных кадров. Каждый разностный кадр содержит кодированную разность действительного изображения этого кадра и опорного изображения, реконструированного по предыдущим кадрам. Кодирование разностей может быть выполнено с использованием только процессов на основе ДКП, только процессов без потерь или процессов на основе ДКП с заключительным процессом без потерь.

Иерархический режим обеспечивает воспроизведение с постепенным повышением качества, как и прогрессивный режим. Декодирование каждого следующего кадра дает изображение, все более близкое к несжатому оригиналу. По сравнению с прогрессивным режимом, иерархический режим обладает важным свойством, которое может быть полезно в ряде применений. Последующие кадры каждой составляющей могут давать увеличение пространственного разрешения изображения. При сжатии выполняется последовательное прореживание исходного изображения, в результате чего получается последовательность вторичных изображений с последовательно уменьшающимся числом элементов.

Первый (неразностный) кадр получается путем кодирования вторичного изображения с наименьшим пространственным разрешением. Опорное изображение для получения следующего за ним разностного кадра получается путем увеличения с помощью интерполяции числа элементов в первом кадре. Опорное изображение для каждого следующего разностного кадра получается путем интерполяции дополнительных элементов в изображении, полученном из всех уже закодированных кадров. Метод

JPEG реализуется, как правило, программными средствами на компьютерах. Основные области его применения: архивирование изображений на магнитных и оптических дисках, передача неподвижных изображений по каналам связи, запись в запоминающее устройство(ЗУ) отснятых кадров в электронных фотокамерах и др.

Дальнейшим развитием стандарта JPEG является стандарт сжатия статических изображений JPEG-2000, базирующийся на дискретном вейвлет-преобразовании. Стандарт JPEG-2000 обеспечивает эффективное кодирование, возможность сжатия без потерь, прогрессивное представление с пошаговым увеличением разрешения, достаточно высокую устойчивость к ошибкам в канале связи, возможность избирательного доступа к отдельным частям изображения, кодирование в реальном времени. В отличие от рассмотренных вариантов кодирования с использованием ДКП, вейвлет-преобразование применяется к полному изображению.

5.2. СТАНДАРТ СЖАТИЯ MPEG-1

Аббревиатура MPEG (Motion Pictures Experts Group) переводится как группа экспертов по движущимся изображениям. Эта группа была сформирована в 1988г. под эгидой Объединенного технического комитета по информационным технологиям Международной организации стандартизации и Международной электротехнической комиссии для выработки международного стандарта цифрового сжатия движущихся изображений и звуковых сигналов.

Стандарт MPEG-1 был принят в 1993 г. Как и последующие стандарты этого семейства, MPEG-1 не определяет схему и конструкцию кодера и декодера, он лишь описывает средства, используемые для обработки сигнала, определяет синтаксис (правила построения последовательности символов) совместимого цифрового потока и дает примеры реализации декодера. Состав и построение кодера оставлены на усмотрение разработчика. Это может быть аппаратное или программное устройство любой сложности, дающее на выходе синтаксически правильный цифро-

вой поток и позволяющее получить на выходе эталонного декодера желаемый эффект. Таким образом, никакие ограничения не накладываются на технологию, алгоритмы работы, сложность построения кодера и его будущие усовершенствования. В отношении декодера существует одно жесткое ограничение: он должен декодировать любой цифровой поток, совместимый со стандартом MPEG-1.

При разработке стандарта были приняты следующие ограничения, определившие его область применения:

- размер изображения по горизонтали – не более 768 пикс.;
- размер изображения по вертикали не более 576 строк;
- число макроблоков – не более 396;
- частота кадров – не более 30 Гц.;
- развертка прогрессивная;
- скорость цифрового потока – не более 1,856 Мбит/с.

На первый взгляд, может показаться, что нет особых препятствий к использованию MPEG-1 для кодирования сигналов вещательного телевидения – число строк и элементов в строке даже выше, чем требуется для изображения стандартной четкости (720 x 576 или 720 x 480 пикселей, в зависимости от стандарта разложения). Ограничивающим параметром оказывается, как ни странно, число макроблоков в видеокадре. Для обработки ТСЧ-изображения надо иметь $(720:16) \times (576:16) = 1620$ макроблоков/кадр, а стандарт предусматривает только 396, что соответствует формату разложения не выше CIF (352 x 288 пикс.). Второе препятствие – отсутствие чересстрочной развертки, принятой сегодня во всех телевизионных системах стандартного качества.

В стандарте MPEG-1 используется большая часть современных инструментов цифровой компрессии, рассмотренных нами ранее: предсказание, внутрикадровое и межкадровое кодирование, ДКП, компенсация движения, адаптивное квантование, энтропийное кодирование [5.1]. Определены три типа видеокадров:

- **I-видеокадры** (от intra – внутри) кодируются без какой-либо связи с другими видеокадрами (внутрикадровое кодирование);

- **Р-видеокадры** (от predicted – предсказанные) формируются методом предсказания вперед по предыдущим видеокадрам. Первый Р-кадр предсказывается по I-кадру, второй и последующие – по предыдущему Р-кадру;
- **В-видеокадры** формируются методом предсказания «вперед» или «назад» (bidirectional – двунаправленный). Польза В-кадров проявляется при рассмотрении задней границы движущегося объекта. При его движении фон открывается все больше, и для передачи этого участка фонового изображения выгоднее воспользоваться данными более позднего кадра (Рис.2). Кодер рассчитывает как прямое, так и обратное предсказание и посылает декодеру данные, имеющие наименьший объем.



Рис. 2. Предсказание участка изображения из более позднего кадра.

Если на вход кодера поступает компонентный сигнал 4:2:2, стандартное разрешение 720 x 576 (480) должно быть приведено в соответствие с возможностями MPEG-1. Требуется понижающая дискретизация отсчетов яркости и цветности. Разрядность квантования входного сигнала предусмотрена не более 8 бит, что приводит при поступлении на вход кодера MPEG-1 10-битового потока к потере двух младших битов.

Алгоритм работает следующим образом. Видеокадр разбивается на макроблоки размером 16 x 16 отсчетов, каждый из которых содержит по 4 блока отсчетов яркости размером 8 x 8 пикселей и по одному блоку отсчетов сигналов C_r и C_b (с учетом понижающей дискретизации). При кодировании макроблока в составе I-кадра вычисляются коэффициенты ДКП,

затем они квантуются с использованием таблицы квантования, имеющейся в памяти кодера и декодера. Кодер может изменить элементы таблицы, тогда он сообщает об этом декодеру и посылает новые делители.

Если кодируется макроблок из состава предсказанного кадра, находится сопряженный блок из опорного кадра, его значения поэлементно вычитаются из элементов кодируемого блока, и уже для этих разностей вычисляются коэффициенты ДКП и производится их квантование. Таблица квантования для макроблоков из Р и В-кадров, применяемая по умолчанию, содержит число 16 во всех позициях, но также может быть изменена кодером. Отметим, что при поиске сопряженных блоков используются только отсчеты яркости. Полученные при этом векторы перемещения применяются и при кодировании блоков отсчетов цветоразностных сигналов.

Важным звеном алгоритма кодирования остается обеспечение постоянства выходной скорости цифрового потока. Отсчеты сигнала от источника поступают с постоянной скоростью, однако на выходе квантователя скорость поступления битов может варьироваться в широких пределах. Она зависит от типа видеокadra (понятно, что I-кадр требует значительно больше битов, чем Р и В-кадры), от его содержания (кадр с однородными участками требует меньше битов, чем кадр с выраженной мелкозернистой структурой). Попытка кодировать их одинаковым числом битов приведет к изменению качества изображения от кадра к кадру, а это крайне неприятно для зрителя. Для выравнивания скорости потока в кодере и декодере используется буферная память. Буфер может заполняться со стороны квантователя неравными порциями, а считываться в сторону канала с постоянной скоростью. Но и здесь не все так просто. Быстрая смена сюжетов и связанное с этим увеличение доли I-кадров может привести к переполнению буфера. Простое увеличение размера буфера вызывает возрастание задержки сигнала в кодере, что в некоторых случаях мешает телезрителям (беседа двух телеведущих в разных студиях).

Для сохранения приемлемого качества изображения при постоянной скорости потока необходимо, во-первых, регулировать шкалу квантования и, во-вторых, адаптивно распределять имеющийся ресурс битов между раз-

ными типами кадров с учетом их сложности. Эти задачи решаются в коде-ре специальным устройством – контроллером битов. Адаптивное управле-ние процессом квантования осуществляется умножением всех элементов матрицы на масштабирующий множитель величиной от 8 до 1/4, общий для всех отсчетов макроблока, который также сообщается декодеру. Вели-чина множителя больше 1 означает увеличение доли битов, выделяемой данному макроблоку или кадру, меньше 1- соответствующее уменьшение.

Перераспределение ресурса между I, P и B-кадрами производится кодером на основе оценки соотношения битов в предыдущих кадрах.

Упрощенная структурная схема кодера MPEG-1, реализующего опи-санный алгоритм, приведена на Рис.3.

Незатененными на рисунке оставлены элементы структурной схе-мы, участвующие в обработке I-кадров, слабым затенением отмечены участки схемы, обрабатывающие P-кадры, густым затенением – блоки, ответственные за обработку B-кадров.

Кодер работает следующим образом. В режиме I-кадров осуществ-ляется только пространственное кодирование. Коэффициенты ДКП кван-туются с переменной длиной шага, зависящей от состояния буфера, коди-руются кодом Хаффмана и направляются в буфер, откуда считываются с постоянной скоростью.

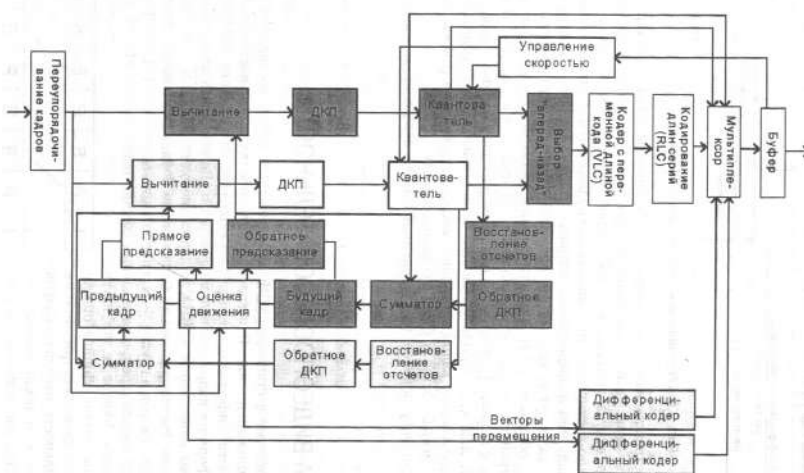


Рис. 3. Упрощенная структурная схема кодера MPEG-1.

В режиме с предсказанием вперед ДКП подвергается не весь текущий кадр, а только разность между ним и предыдущим, опорным кадром, для чего последний в кодере восстанавливается путем выполнения операций, обратных кодированию – восстановления отсчетов, обратного ДКП и восстановления движения по векторам перемещения. В режиме двунаправленного предсказания формируются одновременно два опорных кадра – предыдущий и предшествующий, для чего используются две независимые схемы формирования. Кодер сравнивает предсказанные кадры с текущим, кодирует разности и решает, какое из предсказаний требует меньше битов и будет послано декодеру. Алгоритм декодирования понятен из схемы декодера (Рис. 4).



Рис. 4. Алгоритм декодирования декодера.

СТРУКТУРА ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Видеопоследовательностью в стандарте MPEG называется любая последовательность видеок кадров произвольной длины. На Рис.5 приведена структура видеопоследовательности MPEG-1.

В ее заголовке передается информация о скорости цифрового потока, разрешающей способности изображения, формате цветности, формате кадра, частоте кадров и т.п.

Видеопоследовательность подразделяется на группы видеок кадров (ГВК), содержащие один I-кадр и, возможно, несколько Р и В-кадров. Расстояние между ближайшими Р-кадрами обычно обозначается через М, общее число кадров в группе - N, а группа записывается как (М, N). Ти-

пичная длина ГВК от 6 до 20 видеокадров. Для вещания обычно используется $M = 3$, $N = 12$.



Рис. 5. Алгоритм декодирования декодера.

ГВК всегда начинается с I-кадра, и все предсказанные видеокадры внутри группы опираются, как правило, на кадры внутри этой же группы. Последовательность передачи кадров ГВК должна отличаться от последовательности кадров в самой ГВК (Рис.6), чтобы декодер на приеме мог восстановить предсказанные кадры. Удобно начинать новую ГВК в момент смены сцены, когда имеющаяся в кодере информация о предыдущих видеокадрах утрачивает ценность и нужно формировать новый I-кадр.

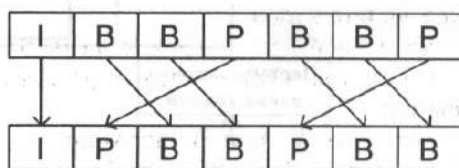


Рис. 6. Переупорядочение видеокадров в ГВК при передаче.

Следующей по рангу структурной единицей видеопоследовательности является видеокадр. Заголовок видеокадра содержит информацию о его типе и структуре, векторах перемещения. Видеокадры делятся на слайсы (дословно – дольки, ломтики), так называется группа последовательных макроблоков в видеокадре, объединяемых общей шкалой квантования. Слайс представляет собой минимальную единицу видеопоследовательности в борьбе с ошибками. Если декодер обнаруживает ошибку, он

игнорирует данный слайс и сдвигается к началу следующего. Чем больше слайсов в видеокадре, тем эффективнее борьба с ошибками (но ниже – степень компрессии).

Наконец, макроблок и блок – низовые структуры иерархии, отвечающие за кодирование и компенсацию движения. Эти процессы мы уже подробно рассматривали выше.

Уровни обработки звукоданных

Сжатие звукоданных в стандарте MPEG-1 базируется на принципах полосного кодирования и отличается от сжатия видеоданных:

- отсутствуют аналоги I, P и B-кадров;
- не используется двунаправленное кодирование, звуковые кадры всегда передаются в своей естественной последовательности, кадр содержит одинаковое количество данных.

В зависимости от используемого алгоритма определены три Уровня (Layer) обработки, обозначаемых латинскими цифрами I, II, III, которые различаются степенью сжатия и сложностью кодека.

Важнейшим свойством MPEG-1 является полная обратная совместимость всех трех уровней. Это означает, что каждый декодер может декодировать сигналы не только своего, но и нижележащих уровней.

В основу алгоритма Уровня I положен разработанный компанией “Philips” для записи на компакт-кассеты формат DCC (Digital Compact Cassette). Кодирование первого уровня применяется там, где не очень важна степень компрессии и решающими факторами являются сложность и стоимость кодера и декодера. Кодер Уровня I обеспечивает высококачественный звук при скорости цифрового потока 384 кбит/с на стереопрограмму.

Уровень II требует более сложного кодека, но обеспечивает лучшее сжатие. «Прозрачность» канала достигается уже при скорости 256 кбит/с. Он допускает до 8 кодирований/ декодирований без заметного ухудшения качества звука. В основу алгоритма положен популярный в Европе формат “Musicam”.

Самый сложный Уровень III включает все основные инструменты сжатия: полосное кодирование, дополнительное ДКП, энтропийное кодирование, усовершенствованную ПАМ и т.п. Ценой усложнения кодера и декодера он обеспечивает высокую степень компрессии – считается, что «прозрачный» канал формируется на скорости 128 кбит/с, хотя высококачественная передача возможна и на более низких скоростях.

В стандарте рекомендованы две психоакустические модели: более простая – Модель 1, и сложная, но и более высококачественная Модель 2. Они отличаются размерами оконных функций и алгоритмом обработки отсчетов. Обе модели могут использоваться для всех трех уровней, но Модель 2 имеет специальную модификацию для Уровня III.

MPEG-1 оказался первым международным стандартом цифрового сжатия звуковых сигналов, и это обусловило его широкое применение во многих областях: вещании, звукозаписи, связи и мультимедийных приложениях. Наиболее широко используется Уровень II, который вошел составной частью в европейские стандарты спутникового, кабельного и эфирного цифрового ТВ вещания, звукового вещания, записи на DVD.

Уровень III (его еще называют MP-3) нашел широкое применение в цифровых сетях с интегральным обслуживанием (ISDN) и в сети Интернет, подавляющее большинство музыкальных файлов в сети которого записаны именно в этом стандарте. MPEG-1 нормирует для всех трех уровней следующие номиналы скоростей цифрового потока: 32, 48, 56, 64, 96, 112, 192, 256, 384 и 448 кбит/с. Частота дискретизации может составлять 32, 44,1 или 48 кГц, число уровней квантования входного сигнала – от 16 до 24. Стандартным входным сигналом для кодера MPEG-1 принят цифровой сигнал AES/EBU. Предусматриваются следующие режимы работы звукового кодера:

- одиночный канал (моно);
- двойной канал (стерео или два моноканала);
- joint stereo (сигнал с частичным разделением правого и левого каналов).

Оценка относительной сложности кодера и декодера, коэффициента компрессии и минимальной временной задержки для различных уровней приведена в Таблице 1.

Заметим, что реальная задержка сигнала в кодере примерно втрое выше указанной.

Таблица 1.

Сравнительный анализ устройств.

Уровень	Сложность		Сжатие	Задержка, мс
	кодер	декодер		
I	1,5...3	1	4:1	19
II	2...4	1,25	6:1	35
III	>7,5	2,5	12:1	59

АЛГОРИТМЫ СЖАТИЯ ЗВУКОДАНЫХ КОДЕРАМИ ПЕРВОГО И ВТОРОГО УРОВНЕЙ

Рассмотрим более подробно работу кодера первого уровня (Рис. 7).

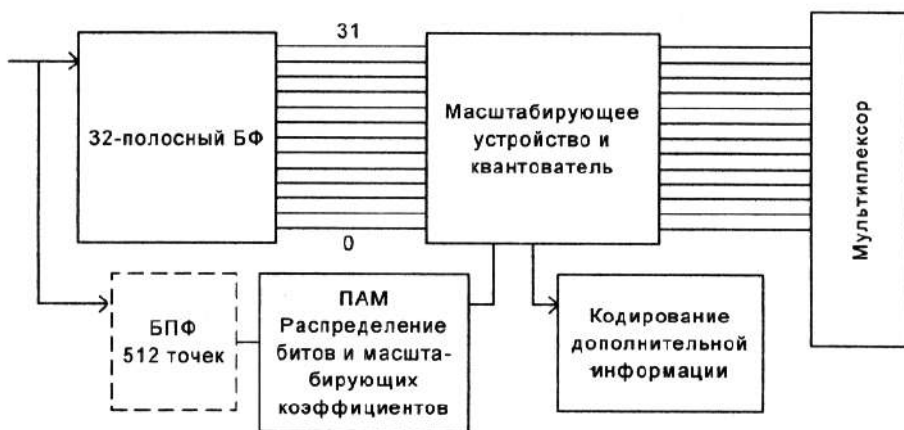


Рис. 7. Кодер 1-ого уровня.

Пунктиром показан модуль БПФ, добавляемый на втором уровне.

Блок фильтров (БФ) обрабатывает одновременно 384 отсчета звуко-
данных и распределяет их с соответствующей субдискретизацией в 32 по-
лосы, по 12 отсчетов в каждой полосе с частотой дискретизации $48/32 = 1,5$ кГц. Длительность кадра при частоте дискретизации 48 кГц состав-
ляет 8 мс. Упрощенная ПАМ оценивает только частотное маскирование

по наличию и «мгновенному» уровню компонентов сигнала в каждой полосе. По результатам оценки для каждой полосы назначается как можно более грубое квантование, но так, чтобы шум квантования не превышал порога маскирования. Масштабирующие множители имеют разрядность 6 бит и перекрывают динамический диапазон 120 дБ с шагом 2 дБ ($2^6 = 64 = 120/2$). В цифровом потоке передаются также 32 кода распределения битов. Они имеют разрядность 4 бита и указывают на длину кодового слова отсчета в данной полосе после переквантования.

В декодере отсчеты каждой частотной полосы выделяются демультимплексором и поступают на перемножитель, который восстанавливает их первоначальный динамический диапазон. Перед этим восстанавливается исходная разрядность отсчетов – отброшенные в квантователе младшие разряды заменяются нулями. Коды распределения битов помогают демультимплексору разделить в последовательном потоке кодовые слова, принадлежащие разным отсчетам и передаваемые кодом с переменной длиной слова. Затем отсчеты всех 32 каналов подаются на синтезирующий БФ, который проводит повышающую дискретизацию и расставляет отсчеты должным образом во времени, восстанавливая исходную форму сигнала.

В кодере второго уровня устранены основные недостатки базовой модели полосного кодирования, связанные с несоответствием критических полос слуха и реальных полос БФ, из-за чего в низкочастотных участках диапазона эффект маскирования практически не использовался. Величина кадра увеличена втрое, до 24 мс при дискретизации 48 кГц, одновременно обрабатываются уже 1152 отсчета (3 субкадра по 384 отсчета). В качестве входного сигнала для ПАМ используются не полосные сигналы с выхода БФ, а спектральные коэффициенты, полученные в результате 512-точечного преобразования Фурье входного сигнала кодера. Благодаря увеличению и временной длительности кадра и точности спектрального анализа эффективность работы ПАМ возрастает.

На втором уровне применен более сложный алгоритм распределения битов. Полосы с номерами от 0 до 10 обрабатываются с 4-разрядным

кодом распределения (выбор любой из 15 шкал квантования), для полос с номерами от 11 до 22 выбор сокращается до 3 разрядов (выбор одной из 7 шкал), полосы с номерами от 23 до 26 предоставляют выбор одной из 3 шкал (2-битовый код), а полосы с номерами от 27 до 31 (выше 20 кГц) не передаются. Если шкалы квантования, выбранные для всех блоков кадра, оказываются одинаковыми, то номер шкалы передается только один раз.

Еще одно существенное отличие алгоритма второго уровня в том, что не все масштабирующие множители передаются по каналу связи. Если различие множителей трех последовательных субкадров превышает 2 дБ не более, чем в течение 10% времени, передается только один набор множителей. Если в данной полосе происходят быстрые изменения уровня звука, передаются два или все три набора масштабирующих множителей. Соответственно, декодер должен запоминать номера выбранных шкал квантования и масштабирующие множители и применять их при необходимости к последующему субкадру.

АЛГОРИТМ СЖАТИЯ ЗВУКОДАНЫХ КОДЕРАМИ ТРЕТЬЕГО УРОВНЯ

Кодер Уровня III использует усовершенствованный алгоритм кодирования с дополнительным ДКП. Основной недостаток кодеров второго уровня – неэффективная обработка быстро изменяющихся переходов и скачков уровня звука – устраняется введением двух видов блоков ДКП – «длинного» с 18 отсчетами и «короткого» с 6 отсчетами. Выбор режима осуществляется адаптивно путем переключения оконных функций в каждой из 32 частотных полос. Длинные блоки обеспечивают лучшее частотное разрешение сигнала со стандартными характеристиками, в то время как короткие блоки улучшают обработку быстрых переходов. В одном кадре могут быть как длинные, так и короткие блоки, однако общее число коэффициентов ДКП не изменяется, так как вместо одного длинного передаются три коротких блока.

Структурная схема кодера показана на Рис. 8.

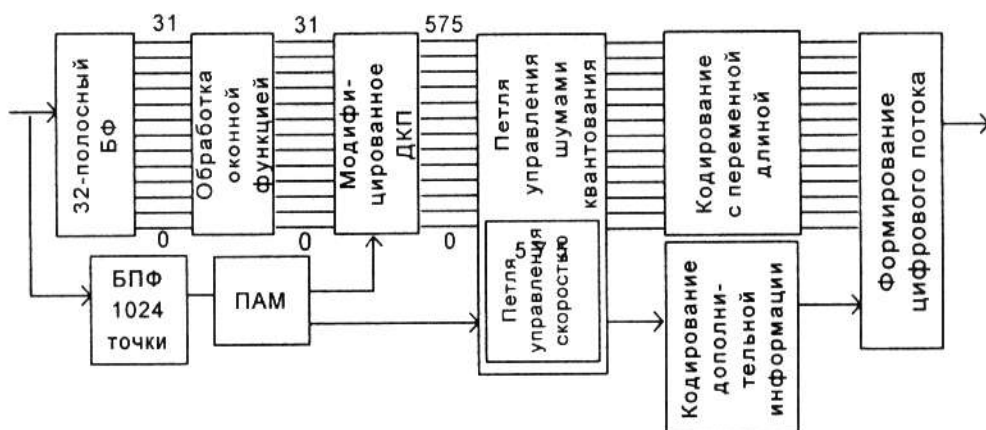


Рис. 8. Структурная схема звукового кодера третьего уровня.

При кодировании применяются также следующие усовершенствования:

- неравномерное квантование.
- в отличие от кодеров первого и второго уровней, на третьем уровне масштабирующие множители присваиваются не каждой из 32 частотных полос БФ, а полосам масштабирования – участкам спектра, не связанного с этими полосами и примерно соответствующего критическим полосам.
- энтропийное кодирование квантованных коэффициентов кодом Хаффмана.

Улучшение частотного разрешения при введении дополнительного ДКП влечет за собой значительное ухудшение временного разрешения, проявляющееся в виде пред-эхо. В кодере имеются средства для борьбы с этим явлением:

- ПАМ модифицирована для обнаружения условий возникновения пред-эхо.
- имеется запас неиспользованных битов, из которого кодер может занять на короткое время необходимые ему биты для снижения шумов квантования.
- кодер может переключаться в режим коротких блоков.

Существенное отличие кодера третьего уровня от кодеров нижних уровней – сложный адаптивный алгоритм распределения битов. Он включает две вложенные одна в другую итерационные петли: внутреннюю –

петлю скорости потока, и внешнюю – петлю управления шумами квантования. Расчет параметров кодирования начинается со значения масштабирующего множителя, равного 1. Если в первый момент скорость потока на выходе кодера Хаффмана превышает заданную, увеличивается шаг квантования до тех пор, пока скорость не войдет в нужные пределы. Далее рассчитывается шум квантования в данной частотной полосе и сравнивается с порогом маскирования, сообщенным ПАМ. Масштабирующий множитель изменяется таким образом, чтобы сблизить эти значения. Однако новое значение масштабирующего множителя означает изменение шага квантования и, следовательно, скорости потока, а потому внутренняя петля должна каждый раз отрабатывать и вычислять новое значение коэффициента усиления и шага квантования. Если итерационный процесс во внутренней петле всегда сходится, то во внешней петле он может расходиться. Итерационный процесс заканчивается в одном из трех случаев:

1. Шумы квантования во всех полосах масштабирования не превышают допустимых.
2. Следующая итерация приведет к возрастанию усиления в одной из полос выше допустимого.
3. Следующая итерация требует увеличения усиления во всех полосах масштабирования.

В реальных кодерах накладывается еще и временное ограничение. Кодер третьего уровня более полно обрабатывает стереосигнал в формате “joint stereo”. Если кодеры нижележащих уровней работают только в режиме кодирования по интенсивности, когда левый и правый каналы в полосах выше 2 кГц кодируются как один сигнал (но с независимыми масштабирующими множителями), кодер третьего уровня может работать и в режиме «сумма-разность», обеспечивая более высокую степень сжатия разностного канала.

ФОРМИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ПОТОКОВ ВИДЕО И ЗВУКА

Цифровой сигнал непосредственно с выхода кодера MPEG-1 называется «элементарным потоком» (ЭП) и представляет собой бесконечную

последовательность видео или звукоданных в том порядке, как они появляются на выходе в процессе кодирования. Он не содержит необходимой информации для идентификации потока и для его синхронизации с другими потоками, не может непосредственно использоваться для организации вещания или других служб.

Для дальнейшего использования элементарные потоки переформируются в пакетированные элементарные потоки (ПЭП), в которых данные разделены на пакеты удобного размера с заголовками, содержащими необходимую информацию о потоках и синхронизации. В зависимости от приложений, длина пакета ПЭП может составлять от единиц до 64 килобайт. Обычно пакет содержит одну единицу воспроизведения данных определенного типа. Единица воспроизведения видеопотока – один видеокадр, звукопотока – один звуковой кадр.

Для формирования ТВ-программы полученные ПЭП видео, звука и вспомогательные данные необходимо объединить в единый цифровой поток. В системной части стандарта MPEG-1 для этого формируется системный поток, который представляет собой сборку ПЭП, относящихся к одной программе и объединенных общей тактовой синхронизацией. Это могут быть видеопрограмма с несколькими звуковыми каналами или пакет звуковых программ. Такой поток состоит из пакетов переменной длины, имеет изменяющуюся во времени скорость, не содержит средств защиты от ошибок и предназначен для использования в средах с малой вероятностью ошибки, например, для записи на DVD и CD-ROM диски, где переменная скорость не вызывает технических трудностей.

5.3. СТАНДАРТ СЖАТИЯ MPEG-2

MPEG-2 был принят как международный стандарт в 1996г. и дополнен в 1997г. Коротко его можно охарактеризовать как MPEG-1 со значительными улучшениями, включающими обработку чересстрочных изображений, набор уровней и профилей, масштабируемый синтаксис,

системный уровень с программным и транспортным потоками, новые средства кодирования звука и охватывающего более широкий круг применений, включая вещательное телевидение. Была поставлена задача обеспечить совместимость MPEG-2 с MPEG-1. На подготовительном этапе в качестве основы для MPEG-2 тестировались 39 алгоритмов цифрового сжатия, в том числе и существенно отличные от MPEG-1, но предпочтение было отдано последнему, не в последнюю очередь благодаря удобству достижения совместимости.

Кодер MPEG-2 при равной скорости потока примерно на 50% сложнее MPEG-1. Успех MPEG-2 в значительной мере определил прекращение работ над стандартом MPEG-3, предназначенным для систем ТВЧ. Оказалось, что синтаксис MPEG-2 пригоден для высоких разрешений, больших скоростей и полных компонентных сигналов без прореживания, а потому может использоваться и для ТВЧ.

Стандарт MPEG-2 содержит 9 частей, описывающих различные компоненты цифрового потока и средства поддержки.

Особенности алгоритма обработки видеоданных

Существенное отличие алгоритма обработки видео в MPEG-2 от MPEG-1 заключается в возможности обработки чересстрочных изображений. В MPEG-1 для кодирования таких изображений приходилось предварительно объединять два поля в один кадр и только после этого подавать сигнал на вход кодера. Однако при наличии движения эта процедура приводила к заметным искажениям. В MPEG-2 введена концепция полевого и кадрового кодирования [5.2].

При кодировании телевизионного изображения, передаваемого с прогрессивной разверткой, каждый кадр состоит из одного поля и разбивается на макроблоки.

В случае чересстрочной развертки каждый кадр состоит из двух полей. Первое поле содержит нечетные строки кадра, а второе поле – четные строки (Рис. 1).

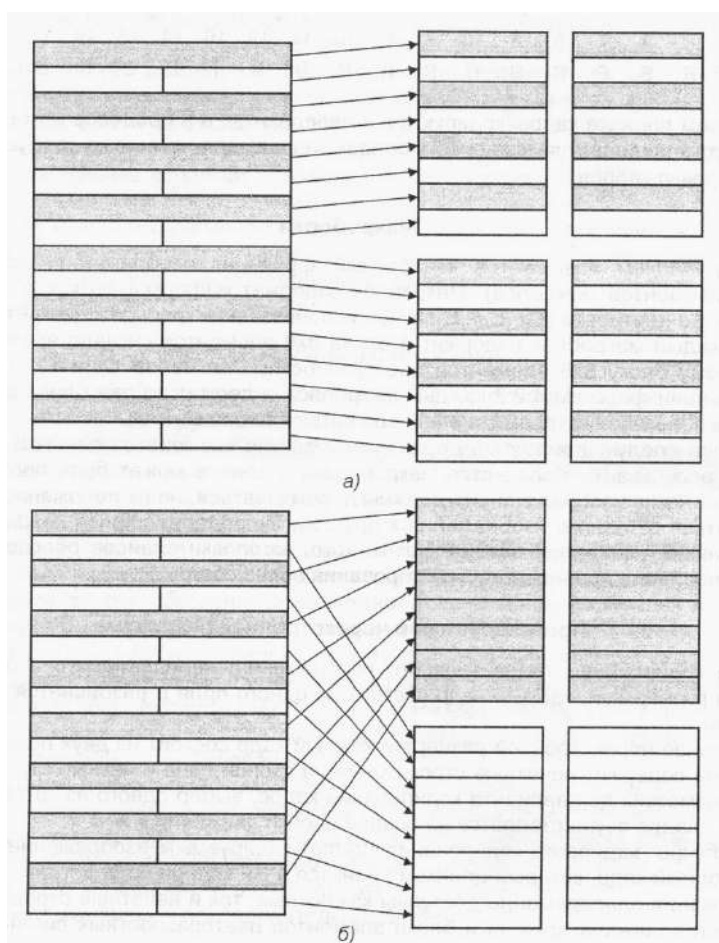


Рис.1. Формирование блоков при чересстрочной развертке в случаях кадрового (а) и полевого (б) режимов.

При этом возможны два варианта кодирования кадра, выбор одного из которых для данного кадра осуществляется на основе оценки движения в нем.

В случае кадрового кодирования кодируемым изображением является полный кадр, который целиком хранится в ЗУ кодера, вследствие чего для кодирования одновременно доступны как четные, так и нечетные строки. Блоки элементов сигнала яркости и блоки элементов цветоразностных сигналов для формата 4:2:2 выделяются из макроблока, как это показано на Рис.1, а, где заштрихованными показаны нечетные строки, а незаштрихованными – четные. В случае полевого кодирования кодируе-

мым изображением является каждое поле. Первое поле кадра может использоваться для предсказания макроблоков второго поля того же кадра. При этом в каждый блок элементов сигнала яркости или элементов цветоразностных сигналов для формата 4:2:2 входят элементы из одного поля, как это показано на Рис.1, б. Блоки элементов цветоразностных сигналов для формата 4:2:0 образуются так же, как при кадровом кодировании.

Полевое ДКП более эффективно при существенном различии между полями, например, при наличии движения по вертикали. Кадровое ДКП позволяет лучше передать мелкие детали изображения.

Обработка чересстрочных изображений вносит существенные отличия и в процесс предсказания. Кадровое предсказание, как и в MPEG-1, оценивает наилучшее сопряжение макроблоков 16 x 16 пикс. в текущем и опорном кадрах.

Полевое ищет сопряжение для блока 16 x 16 пикс., взятого из текущего поля, в двух предыдущих полях и выбирает лучший результат. Как и при ДКП, полевое кодирование может использовать только полевое предсказание, а кадровое – допускается применение кадрового предсказания или полевого, в последнем случае ищется сопряжение отдельно верхнего и нижнего полей макроблока в каждом из двух полей опорного кадра и выбирается лучший результат.

Более высокую точность компенсации движения обеспечивает разбиение макроблока на два поля. При этом определяются два вектора перемещения для верхнего и нижнего полей макроблока размерностью 16 x 8 пикс. и передаются декодеру, который использует их для более точного восстановления изображения.

MPEG-2 ввел новый режим компенсации движения для эффективного устранения временной избыточности между полями, названный «Двухступенчатая компенсация с уточнением векторов». В данном режиме ищутся вектор перемещения для области изображения 16 x 8 пикс. из одного поля и дополнительный вектор приращения (принимаяющий значения минус 1, 0, 1 по осям x и y) для той же области, но в поле другой четности. В декодере вектор приращения используется для уточнения отсчетов предсказанного блока.

МРЕG-2 допускает значительную гибкость и в формировании I-, P-, B-кадров. Кодированный I-видеокадр может состоять из I-кадра с прогрессивным разложением, или пары I-полей, или I-поля и предсказанного из него P-поля. Аналогично P-видеокадр может содержать P-кадр, или два P-поля, B-видеокадр – B-кадр или пару B-полей.

Для обработки чересстрочных изображений МРЕG-2 предлагает альтернативный вариант сканирования коэффициентов ДКП, оптимизированный с точки зрения кодирования длин серий (Рис. 2).

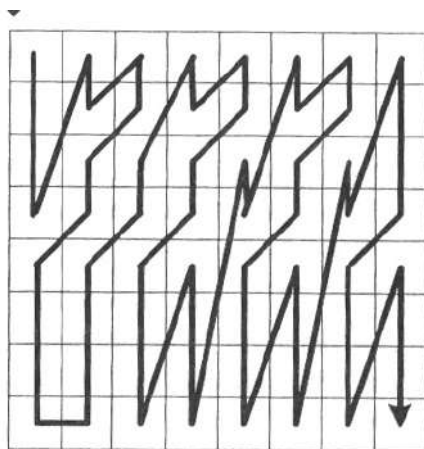


Рис. 2. Сканирование коэффициентов ДКП при чересстрочном разложении.

Отметим еще несколько отличий в кодировании видеоданных.

- МРЕG-2 в большинстве случаев использует в качестве сигнала источника компонентный сигнал 4:2:0, но расположение отсчетов в поле изображения несколько отличается от МРЕG-1.

- в МРЕG-2 длина слайса не может быть более одной строки (в МРЕG-1 длина слайса не ограничивалась).

- МРЕG-1 допускает квантование постоянной составляющей ДКП только с разрядностью 8 бит, в МРЕG-2 в некоторых случаях допускается 9- или 10-битовое квантование.

- для предотвращения потери макроблоков, кодированных с внутри-кадровым предсказанием, применяется маскирование – подстановка вместо

утерянного макроблока ближайшего, схожего по параметрам. Для этого в потоке передается управляющий код «пропущенного макроблока».

- предусмотрена передача информации режима панорамирования (pan&scan), указывающей декодеру, какую часть изображения форматом 16:9 отображать на экране с форматом 4:3. Информация посылается каждым кадром и позволяет смещать изображение с точностью до 1/16 пикс.

Кодер видеoinформации

Структурная схема кодера видеoinформации (Рис. 3) отображает основные операции, выполняемые при кодировании и обеспечивающие получение выходного потока данных с требуемыми параметрами.

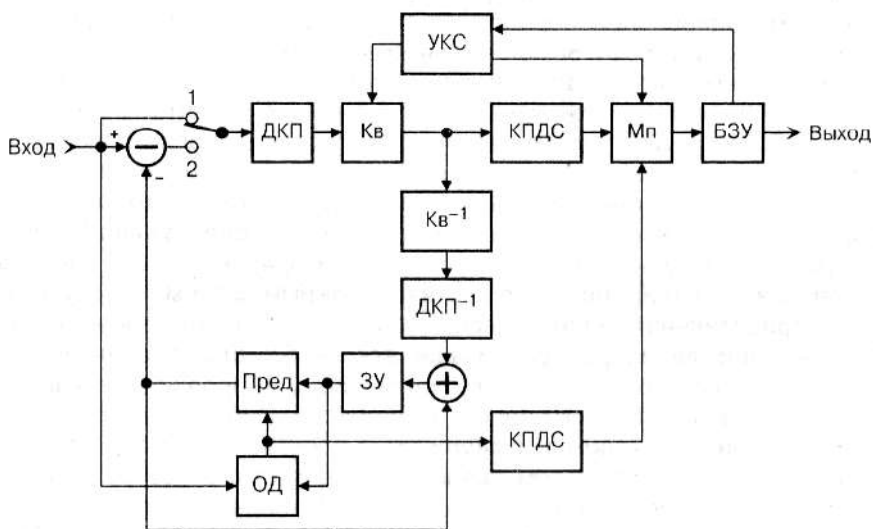


Рис. 3. Кодер видеoinформации.

где

ЗУ – запоминающее устройство, **Пред** – блок, выполняющий формирование предсказанного кадра, **ОД**– блок оценки движения и формирования векторов движения, **КПДС**-блок, в котором выполняется кодирование с переменной длиной кодового слова; **Мп** – мультиплексор; **БЗУ** – буферное запоминающее устройство; **УКС** – блок управления коэффициентом сжатия изображения.

В кодере реализуются два режима кодирования: внутрикадровое кодирование (переключатель в положении 1) и межкадровое кодирование с предсказанием и компенсацией движения (переключатель в положении 2).

Все макроблоки I-кадров кодируются в режиме внутрикадрового кодирования. Метод в основном аналогичен JPEG: разложение на блоки 8х8 пикселей, поблочное ДКП, квантование полученных коэффициентов, считывание в зигзагообразном порядке, кодирование с переменной длиной кодовых слов.

Макроблоки P и B-кадров могут кодироваться как внутрикадровым методом, так и межкадровым, основанным на предсказании и компенсации движения. При межкадровом кодировании передаются кодированные ошибки предсказания. Изображение, по которому выполняется предсказание, формируется из кодированных, а затем декодированных данных предыдущего I или P- кадра. В деквантователе данные умножаются на коэффициенты квантования, затем выполняется обратное ДКП так же, как это делается в декодере приемной части системы, после чего декодированное изображение записывается в ЗУ. Таким образом, для предсказания используются изображения, содержащие ошибки, внесенные квантователем. Эти ошибки попадают в предсказанные изображения, а при формировании разности истинного и предсказанного изображений снова попадают в кодер, но уже с противоположным знаком. В результате получается отрицательная обратная связь, которая позволяет избежать накопления ошибок квантования. Для реализации всех возможных вариантов предсказания ЗУ должно содержать несколько (как минимум 4) предыдущих кадров.

При формировании предсказанного макроблока используется оценка и компенсация движения методом соответствия блоков (Block Matching). Оценка движения осуществляется путем сравнения кодируемого изображения (кадра или поля), поступающего на вход кодера, с ранее переданным изображением, находящимся в ЗУ и используемым для предсказания (опорным изображением).

Структурная схема видеodeкодера приведена на Рис. 4.

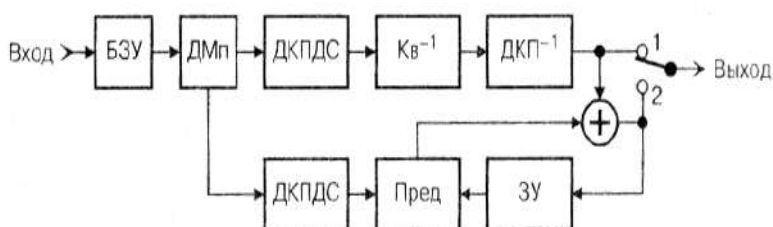


Рис. 4. Структурная схема видеodeкодера.

БЗУ на входе декодера выполняет функцию согласования постоянной скорости передачи двоичных символов во входном потоке данных с процессами в декодере, при которых данные из БЗУ считываются неравномерно во времени.

Так же, как и в кодере, в декодере имеются два режима работы. При приеме I-кадров и передаваемых с внутрикадровым кодированием макроблоков Р-кадров и В-кадров на выходе блока обратного ДКП формируются блоки изображения. Переключатель на структурной схеме при этом находится в положении 1, и сигнал с блока обратного ДКП направляется на выход. При приеме макроблоков Р-кадров и В-кадров, кодируемых в межкадровом режиме, переключатель находится в положении 2. В этом случае формирование выходного сигнала происходит путем поэлементного сложения поступающих с блока обратного ДКП значений разностей с предсказанным макроблоком, формируемым из элементов ранее декодированных изображений с использованием декодированных векторов движения.

Рассмотрим перечень характерных искажений изображений, которые могут возникнуть в результате кодирования по стандарту MPEG-2 при больших степенях сжатия.

Искажения, создаваемые внутрикадровым кодированием:

- заметность границ блоков (блокинг-эффект). Так как соседние блоки кодируются и декодируются независимо друг от друга, то при больших степенях сжатия после квантования и деквантования в них могут получаться заметно различающиеся коэффициенты ДКП, соответствующие

постоянным и низкочастотным составляющим. В результате изображения в соседних блоках могут сильно отличаться друг от друга по яркости, цвету, характеру деталей и текстуры.

- размытие изображения. Наблюдается при большом коэффициенте сжатия изображения. Обусловлено ограничением либо полным занулением коэффициентов ДКП, соответствующих высоким пространственным частотам, в результате чего мелкие детали изображения становятся размытыми или полностью пропадают.

- появление окантовок на резких переходах яркости изображения. Этот эффект обусловлен значительными искажениями либо полным подавлением высокочастотных составляющих пространственного спектра.

- размытие цветов. Имеет ту же причину, что и эффект окантовки на границах, но проявляется на участках изображения с резкими скачками в сигнале яркости.

- эффект ступенек. Возникает как результат неправильного восстановления или передачи краев изображений внутри блока. Эффект проявляется, как правило, при восстановлении изображения в увеличенном масштабе.

Искажения, создаваемые межкадровым кодированием:

- ложные границы. Наблюдаются при компенсации движения. Этот эффект является прямым следствием межкадрового кодирования видеосигнала.

- эффект «комаров». Проявляется как флуктуации яркости или цветности в блоке на границе между движущимся объектом и фоном. Эффект возникает вследствие изменения параметров квантования разности действительного и предсказанного изображений от кадра к кадру.

- зернистый шум в стационарной области. Проявляется как медленно движущиеся мерцающие шумы низкой интенсивности в областях, в которых имеется лишь малое движение, либо движение отсутствует полностью.

- появление неправильных цветов в макроблоке по отношению к его исходным цветам и к цветам окружающей области.

- появление следов за движущимися объектами, которые могут сохраняться сравнительно долго.

Какие же степени сжатия реально достижимы при использовании MPEG-2? В соответствии с Рекомендацией 601, при дискретизации 4:2:2 получается скорость передачи двоичных символов 216 Мбит/с. При переходе к формату 4:2:0, который используется для телевизионного вещания, скорость передачи двоичных символов сокращается до величины 162 Мбит/с, относительно которой и будем определять степень сжатия.

На практике для получения студийного качества принятого изображения можно сжимать видеoinформацию до скорости передачи 9 Мбит/с, т.е. в 18 раз. Для качества изображения, сравнимого с обычным изображением по системе PAL – до 4...5 Мбит/с, т.е. в 30–40 раз. Качество изображения, сопоставимое с получаемым при воспроизведении видеозаписей стандарта VHS, достигается при сжатии до уровня около 1,5 Мбит/с, т.е. более чем в 100 раз.

Уровни и профили стандарта MPEG-2

MPEG-2 охватывает весьма широкий диапазон сложности кодирования и качества изображения – от простых I-кадров до сложных ГВК, от низкого разрешения до ТВЧ. В процессе разработки стало ясно, что построить декодер, удовлетворяющий одновременно всем требованиям стандарта, возможно, но неэкономично, так как он окажется весьма сложным, дорогим и в то же время будет обладать большой избыточностью по отношению к более простым приложениям. Разработчики стандарта разделили все средства и инструменты обработки видеосигналов на несколько Профилей, поддерживающих обратную совместимость и различающихся использованием тех или иных элементов синтаксиса. Как правило, каждый Профиль добавляет один или несколько инструментов к имеющимся у нижележащего Профиля.

В стандарте приняты пять основных и один дополнительный, профессиональный Профиль 4:2:2, введенный позднее. Внутри каждого Профиля выделены Уровни, определяющие допустимые пределы изменения основных параметров цифрового потока. В Таблице 1 показаны различ-

ные варианты телевизионных систем и методов кодирования телевизионных сигналов, предусмотренные стандартом MPEG-2.

Таблица 1.

Профили стандарта MPEG-2.

Уровень	Профиль				
	Простой (Simple)	Основной (Main)	Масштабирование по С/Ш (SNR Scalable)	Пространственный (Spatially Scalable)	Высокий (High)
High 1920x1152	–	80 Мбит/с	–	–	100Мбит/с
High-1440 1440x1152	–	60 Мбит/с	–	60 Мбит/с	80 Мбит/с
Main 720x576	15 Мбит/с	15 Мбит/с	15 Мбит/с	–	20 Мбит/с
Low 352x280	–	4 Мбит/с	4 Мбит/с	–	–
Кодирование компонентов	4:2:0	4:2:0	4:2:0	4:2:0	4:2:0 или 4:2:2
В-кадры	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть
Масштабируемость	Нет	Нет	по С/Ш	По пространственному разрешению и по С/Ш	По пространственному разрешению и по С/Ш

Четыре строки таблицы соответствуют четырем уровням пространственного разрешения:

- Low (352x280 элементов) – уровень телевидения пониженной четкости, используемый в видеотелефонах и технике телеконференций;
- Main (720x576 элементов) – уровень телевидения обычного разрешения;
- High-1440 (1440x1152 элементов) – уровень телевидения высокого разрешения с форматом экрана 4:3;
- High (1920x1152 элементов) – уровень телевидения высокого разрешения с форматом экрана 16:9.

Вертикальные столбцы таблицы соответствуют Профилям. С переходом на более высокие Профили, т.е. при продвижении по Таблице на-

право увеличивается количество используемых методов кодирования, появляются новые свойства телевизионной системы, но, естественно, усложняются аппаратура и алгоритмы обработки сигналов.

Как видно из Таблицы, на главном уровне, соответствующем телевидению обычного разрешения, скорость передачи двоичных символов в канале связи достигает 15 Мбит/с.

На более высоких уровнях главного Профиля, соответствующих телевидению высокой четкости, скорость передачи двоичных символов в канале связи возрастает до 60 или 80 Мбит/с. Следует особо подчеркнуть, что для всех уровней разрешения данного Профиля используются один и тот же набор методов кодирования. В этом заключается совместимость разных уровней. На более высоких уровнях кодеры и декодеры должны иметь большее быстродействие и больший объем ЗУ. Аппаратура более высоких уровней разрешения может работать на более низких.

Простой Профиль отличается от главного отсутствием В-кадров, что дает упрощение аппаратуры, но приводит к ухудшению качества изображения при той же скорости передачи символов. Данный Профиль может использоваться для записи изображений на магнитные или лазерные диски и для других целей.

Несколько особняком, вне иерархии, стоит не приведенный в таблице Профиль «Профессиональный 4:2:2», предназначенный для обеспечения совместимости с цифровым студийным оборудованием видеопроизводства. В этом формате работают, например, перевозимые комплекты цифровых систем сбора новостей, передающие сигнал через спутники для последующей записи и монтажа. Профиль должен обеспечивать возможность многократного MPEG кодирования-декодирования сигнала. Его основными свойствами являются структура дискретизации «4:2:2», увеличенное число строк – 608 в отличие от 576, и возможность работы с повышенными скоростями – до 50 Мбит/с вместо 15 Мбит/с, обеспечиваемых Основным Профилем. Последнее требование связано с более короткими группами видеок кадров, используемыми при видеомонтаже.

Важной особенностью стандарта MPEG-2 является масштабируемость, которая определяется как возможность получения изображения из

части полного потока видеоданных. Последний в случае наличия масштабируемости состоит из двух или более слоев. Базовый слой дает возможность получить изображение с некоторыми начальными параметрами качества. Дополнительные или улучшающие слои потока данных позволяют получить изображение улучшенного качества. Стандарт MPEG-2 предусматривает возможность организации потоков видеоданных как с масштабируемостью, так и без нее. Каждый вид масштабируемости, взятый отдельно, предполагает наличие в потоке данных двух уровней. В случае использования одновременно двух видов масштабируемости число уровней в потоке данных может быть до трех.

Стандартом MPEG-2 предусмотрены следующие виды масштабируемости:

- по пространственному разрешению. Заключается в получении от одного источника видеoinформации двух ТВ-сигналов с разными параметрами по разрешающей способности, например, сигналов ТВ обычной четкости и ТВ высокой четкости. Базовый слой потока данных содержит информацию, достаточную для воспроизведения изображения обычной четкости, а дополнительный позволяет дополнить воспроизводимое изображение до изображения высокой четкости. Важно отметить, что объем этих дополнительных данных меньше, чем полный объем данных об изображении высокой четкости, так как часть информации передается в базовом слое.

Пользователи, имеющие декодеры, способные декодировать оба слоя потока данных, и, следовательно, более сложные и дорогие, будут получать на экранах своих приемников изображение высокой четкости. Пользователи, имеющие более простые и дешевые декодеры для декодирования только базового слоя, также смогут смотреть эти передачи, но в виде изображения обычной четкости.

- масштабируемость по отношению сигнал/шум дает возможность получать от одного источника видеoinформации изображения с двумя уровнями отношения сигнал/шум, и, следовательно, с двумя уровнями качества. Под шумом понимаются ошибки, вносимые квантованием и кодированием. Базовый слой потока данных может содержать изображение с

большей степенью сжатия и, следовательно, менее качественное. Дополнительный при этом будет содержать данные, позволяющие при их добавлении к данным базового слоя получить изображение с меньшей степенью сжатия, т.е. более качественное.

- масштабируемость по времени позволяет получать от одного источника видеoinформации телевизионные изображения с двумя уровнями разрешающей способности по времени. Например, базовый слой может содержать обычный ТВ-сигнал с частотой кадров 25 Гц и чересстрочной разверткой, а дополнительный – данные, позволяющие при их добавлении к данным базового слоя получить телевизионное изображение с частотой кадров 50 Гц и прогрессивной разверткой.

- масштабируемость по разделению данных позволяет использовать для передачи параллельно два канала связи. По одному из них, более помехозащищенному, передается базовый слой, содержащий наиболее критичную к ошибкам информацию – заголовки, векторы движения, коэффициенты ДКП, соответствующие низким пространственным частотам. По менее помехозащищенному каналу передаются менее критичные к ошибкам данные, например, коэффициенты ДКП, соответствующие высоким пространственным частотам.

Этот вид масштабируемости хорошо сочетается с предыдущими тремя видами, при использовании каждого из которых базовый слой потока данных может передаваться по более помехозащищенному каналу связи, а дополнительный слой – по менее помехозащищенному. Тогда при хороших условиях приема пользователь, имеющий декодер для обоих слоев, сможет видеть изображение наивысшего качества, а при их ухудшении сможет принимать менее качественное изображение.

Следует отметить, что масштабируемость, заложенная в стандарте, пока редко встречается в практических реализациях цифровых телевизионных систем, однако она является важной предпосылкой их дальнейшего развития. Подход, основанный на масштабируемости, в последние годы стал характерным не только для цифрового телевидения, но и для многих других телекоммуникационных и информационных технологий.

Передача киноматериала в каналах с компрессией

Еще на заре кинематографии для демонстрации кинофильмов была выбрана частота кадров 24 Гц, и все современные кинофильмы снимаются для демонстрации именно с такой частотой (на самом деле в кинотеатре для уменьшения мерцания каждый кадр проецируется дважды). Частота кадров в существующих телевизионных системах не соответствует этой величине, что вызывает определенные технические затруднения. В системе 625/50 просто увеличивают скорость движения киноленты, синхронизируя ее с половиной частоты кадровой развертки. Каждый кинокадр при этом передается двумя полями изображения, как и при работе с другими источниками. Так как между полями нет движения, кодер тратит на передачу второго поля очень мало битов. Платой за относительную простоту решения становится сокращение на 4% времени просмотра и изменение на такую же величину высоты воспроизводимых звуков.

Сложнее обстоит дело в телевизионной системе 525/59.94, где соотношение между частотой полей и частотой кинокадров не удается представить целым числом. В этом случае в телевидении применяется понижение 3:2, при котором один кинокадр демонстрируется на протяжении трех, а следующий – двух полей ТВ-изображения. Ясно, что одно из пяти полей – третье поле в кадре – избыточно, и его можно вообще не передавать. Многие кодеры и декодеры MPEG-2 поддерживают специальный режим передачи киноматериала, при котором кодер передает вместо 30 только 24 кадра в секунду. Декодеру передается сигнал о режиме телекино, он объединяет каждую пару полей в кадр, рассчитывает компенсацию движения между кадрами и записывает кадры в память. Далее декодер восстанавливает поля чересстрочного изображения путем считывания кадров через строку и выдает их на экран, одно – дважды, следующее – трижды и так далее с интервалом 1/60 с. Этот режим позволяет заметно снизить скорость цифрового потока при передаче киноматериалов.

Реализация цифрового многопрограммного звука

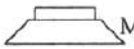

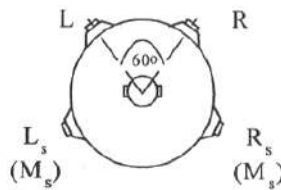
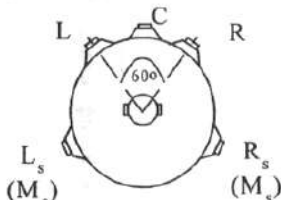
В MPEG-2 полностью используется трехуровневая система, разработанная в MPEG-1 [5.1]. Различия между стандартами начинаются при переходе от двухканального звука, принятого за основу в MPEG-1 к многоканальному (surround – панорамный), поддерживаемому в MPEG-2.

MPEG-2 предусматривает различные режимы передачи многоканального звука (см. Таблицу 2), в том числе пятиканальный формат, семиканальный звук с двумя дополнительными фронтальными динамиками, применяемыми в кинотеатрах. В числителе дроби указывается число фронтальных каналов, в знаменателе – число каналов, излучаемых сзади.

Таблица 2.

Иерархия многоканальных звуковых систем.

Иерархия многоканальных звуковых систем согласно Рекомендации BS.775

Система	Каналы	Обозначение	Расположение динамиков
Моно	M	1/0	
Моно + моно	M	1/1	
Двухканальная стерео	L/R	2/0	
Двухканальная стерео + 1 окружающий	L/R/Ms	2/1	
Двухканальная стерео + 2 окружающих	L/R/Ls/Rs	2/2	
Трехканальная стерео	L/C/R	3/0	
Трехканальная стерео + 1 окружающий	L/C/R/Ms	3/1	
Трехканальная стерео + 2 окружающих	L/C/R/Ls/Rs	3/2	

Одной из разновидностей многоканального звука является многоязычное звуковое сопровождение. Оно может осуществляться либо передачей отдельного цифрового потока для каждого языка, либо добавлением нескольких (до 7) языковых каналов 64 кбит/с к многоканальному потоку 384 кбит/с. Возможна передача дополнительных звуковых каналов для людей с ухудшенным зрением и слухом (с описанием сцены в первом случае и отдельным каналом диалогов во втором).

Как же обеспечивается совместимость этих сложных многокомпонентных сигналов с относительно простым декодером MPEG-1? В кодере MPEG-2 сначала с помощью матрицы формируются комбинированный двухканальный сигнал, совместимый со стереосигналом MPEG-1, и набор вспомогательных сигналов, не совместимых с ним и служащих для восстановления многоканального сигнала в декодере MPEG-2 (Рис.5,а). При кодировании двухканальный сигнал укладывается в структуру ПЭП звука, совместимого с MPEG-1, и может прочитываться соответствующим декодером. Остальные компоненты после кодирования размещаются в других структурных единицах цифрового потока и доступны только декодеру MPEG-2.

Учитывая широкое распространение в мире системы Dolby Pro Logic (продано более 40 млн. декодеров) и совместимость ее с обычным стереоканалом, разработчики звукового стандарта MPEG-2 заложили в алгоритм формирование стереосигнала в таком виде, как его формирует указанная система (Рис. 5).

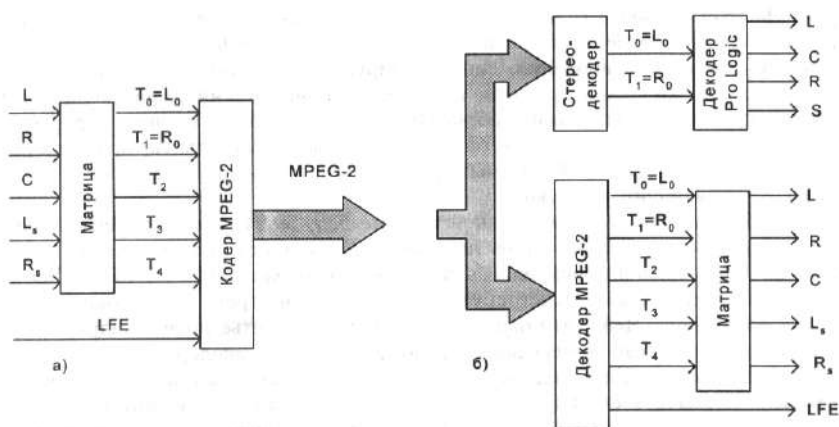


Рис. 5. Методы декодирования звука в MPEG-2.

Владельцы декодера Dolby Pro Logic могут теперь получить многоканальный сигнал двумя способами: либо непосредственно с выхода декодера MPEG-2, либо подав комбинированный стереосигнал с выхода более простого декодера MPEG-1 на вход декодера Pro Logic, который выделит из него многоканальный сигнал (Рис. 5,6).

Система улучшенного кодирования звука AAC

Одной из лучших современных систем сжатия звука признана система AAC (Advanced Audio Coding – усовершенствованная система кодирования звука). В отличие от других методов сжатия звукоданных, принятых в MPEG-2, она не обладает свойством обратной совместимости. По своей эффективности AAC вдвое превосходит Уровень II и в 1,4 раза Уровень III стандарта MPEG-1. Высококачественное воспроизведение звука достигается уже при скорости цифрового потока 96 кбит/с. В стандарте поддерживается широкий набор параметров и возможностей: частоты дискретизации от 8 до 96 кГц, моно- и стереосигналы, три профиля: Основной, Упрощенный и Масштабируемый. Одновременно может быть описано до 16 звуковых программ, состоящих из большого числа сигналов звука и данных (до 48 основных, 15 низкочастотных, 15 многоязычных каналов, 15 потоков данных).

Как и самый сложный из предшествующих, Уровень III из MPEG-1/2, AAC использует все средства цифрового сжатия – полосное кодирование, неравномерное квантование, кодирование кодом Хаффмана, итерационные алгоритмы распределения битов, но улучшает алгоритм Уровня III во многих деталях и использует новые эффективные средства кодирования для улучшения качества звучания при очень низких скоростях.

Основные улучшения можно свести к следующим моментам:

- улучшено разрешение по частоте благодаря использованию 1024 частотных полос по сравнению с 576 в алгоритме Уровня III (32x18). При этом короткие блоки имеют длину всего 256 отсчетов, что обеспечивает эффективную обработку быстрых изменений звукового сигнала. Переключение производится по результатам анализа поведения входного сигнала во времени.

- в Основном Профиле применена оптимальная схема предсказания назад, обеспечивающая более высокую эффективность отработки изменений основного тона.

- применен более гибкий алгоритм кодирования в режиме joint stereo, как в режиме кодирования по интенсивности, так и в режиме «сумма-разность».

- применен улучшенный код Хаффмана, кодирование четверками частотных линий применяется очень часто, что дополнительно сокращает расход битов.

В кодеке Простого профиля отсутствует предсказание. Более сложный Масштабируемый профиль использует для анализа 4-полосный КЗФ, за которым следует модифицированное ДКП с высокой разрешающей способностью по частоте. Модуль управления коэффициентом усиления на выходе фильтра позволяет независимо регулировать сигналы в каждой полосе для предотвращения пред-эхо.

Стандарт сжатия звуковой информации Dolby AC-3

Стандарт AC-3 (или Dolby AC-3) предназначен для кодирования высококачественного звукового сопровождения в цифровом телевидении и мультимедиа. В частности, он используется в цифровой системе телевизионного вещания ATSC, принятой в США и ряде других стран. Стандарт AC-3 позволяет кодировать звуковые сигналы до 5 каналов и один дополнительный сигнал низкочастотных звуковых эффектов (принято обозначение 5.1-канальный звук).

Стандарт AC-3 позволяет объединять звуковые каналы, согласовывать источники звуковых сигналов и звуковоспроизводящую аппаратуру с разными количествами каналов, сжимать динамический диапазон звука и оптимизировать настройку громкости, и дает еще много возможностей для получения наилучшего качества звука при высокой степени сжатия.

В зависимости от параметров исходных звуковых сигналов и заданной степени сжатия скорость передачи двоичных символов в выходном потоке данных может быть от 32 до 640 кбит/с. Для 5.1-канального звука типичная скорость передачи 384 кбит/с., а степень сжатия составляет 13,5.

Поток данных с кодера АС-3 может быть в качестве элементарного потока включен в состав транспортного потока MPEG-2. Поэтому стандарт АС-3 может использоваться в системах цифрового телевидения для сжатия звуковой информации вместо методов, описанных в MPEG-2.

Системный уровень MPEG-2

Перейдем к рассмотрению системной части стандарта MPEG-2, которая описывает форматы мультиплексированных потоков данных, объединяющих сжатые видеоданные и данные звукового сопровождения от одного или нескольких источников, а также включающих другие виды информации.

Стандартом предусмотрено два вида таких мультиплексированных потоков: транспортный поток ТП и программный поток ПП.

Видеосигналы, т.е. яркостный и цветоразностные сигналы данной телевизионной программы, а также сигналы одного или нескольких каналов звукового сопровождения данной программы, преобразуются в цифровую форму в АЦП и кодируются. В блоках, называемых пакетизаторами, данные разделяются на пакеты: блоки данных, начинающиеся с заголовков определенной структуры. Получающиеся потоки называются пакетизированными элементарными потоками ПЭП. В каждом пакете ПЭП объединены данные, относящиеся к структурной единице входного сигнала, например, к телевизионному кадру или к кадру сжатого звукового сигнала. Длина пакета ПЭП может достигать до 64 кбит. Передача данных в пакетах позволяет использовать различные каналы связи, в том числе асинхронные, объединять в одном потоке несколько элементарных потоков, обеспечивать защиту от ошибок при передаче и от несанкционированного доступа.

Заголовок пакета ПЭП содержит стартовый код, идентификатор, определяющий вид информации в этом пакете и способ кодирования, значение длины пакета, сведения о скремблировании, о типе временных меток и другую информацию.

ПЭП может содержать временные метки двух типов: DTS (Decoding Time Stamp – метка времени декодирования) и PTS (Presentation Time

Stamp – метка времени воспроизведения). Наличие двух видов меток необходимо для правильной привязки к шкале времени операций декодирования и воспроизведения видеокадров в приемниках, так как, как объяснялось ранее, порядок кадров при кодировании изменяется.

Пакетизированные элементарные потоки нескольких телевизионных программ, а также передаваемых дополнительных данных и сигналов управления объединяются в единый ТП. При этом данные перераспределяются в пакеты ТП, имеющие фиксированную длину 188 байт и определенную структуру заголовка, занимающего 4 байта.

После заголовка передаются данные соответствующего ПЭП (нагрузка пакета). В части пакетов после заголовка может следовать поле адаптации, в котором передаются метки времени, служебные данные или данные пользователя. Каждый пакет может содержать данные только одного элементарного потока. Пакеты с данными разных элементарных потоков передаются в транспортном потоке в произвольном порядке. Заголовки пакетов ПЭП упаковываются в пакеты ТП наравне с другой информацией, однако начало заголовка пакета ПЭП должно располагаться в начале области данных пакета ТП. Транспортный поток может содержать и всего один элементарный поток, но фиксированная длина пакетов ТП сохраняется. Вся информация, необходимая декодеру для обработки, организована в виде таблиц программно-зависимой информации – PSI.

Специальные пакеты, типа PAT (Program Association Table), несут информацию о том, какие значения идентификаторов соответствуют каждой из передаваемых в транспортном потоке программ. Для каждой программы передаются пакеты, типа PMT (Program Map Table), данные в которых определяют идентификаторы относящихся к этой программе элементарных потоков. Если программа платная, то для нее передаются пакеты с информацией условного доступа.

В особых пакетах в среднем 10 раз в секунду передаются метки времени PCR, содержащие значения моментов времени по часам в передающей части системы. По этим меткам в декодирующей аппаратуре восстанавливаются тактовые частоты каждого отдельного элементарного потока, которые между собой, вообще говоря, не синхронизированы, хотя и

имеют стандартное значение 27 МГц. Если транспортный поток содержит несколько несинхронизированных между собой элементарных потоков, то для каждого из них передаются свои PCR.

Программный поток MPEG-2 аналогичен системному уровню стандарта MPEG-1 и содержит пакетизированные элементарные потоки одной телевизионной программы или нескольких программ, имеющих общую временную базу, т.е. взаимно синхронизированных. Длины пакетов программного потока могут быть различными. Структурные схемы формирования и приема программного потока похожи на приведенные выше схемы для транспортного потока. Программный поток может быть преобразован в транспортный поток, и наоборот.

Транспортный поток рекомендуется использовать при передаче по каналам связи с помехами, а программный поток – при отсутствии помех, например, при записи на лазерные диски.

Мультиплексирование

Гибкость мультиплексирования ТП представляет возможность построения многопрограммной системы вещания, связанную с вводом в ТП, формируемый мультиплексором из программ, кодированных локальными кодерами, «постороннего» транспортного потока, поступившего по линии связи и имеющего другую временную базу (режим ремultipлексирования). Современные мультиплексоры легко справляются с такой задачей, позволяя при этом выбрать из компонентов пришедшего ТП желаемые, а при необходимости помогает изменить PID-идентификаторы пакетов этих компонент, режим скремблирования и другие параметры.

Еще одна возможность гибкого изменения параметров сжатого сигнала – статистическое мультиплексирование, заключающееся в динамическом перераспределении ресурса битов между кодерами в многопрограммном цифровом потоке с учетом конкретных особенностей изображения в каждой программе таким образом, чтобы качество всех программ оставалось возможно более высоким.

Система работает следующим образом. Управляющий контроллер статистического мультиплексора получает от всех кодеров информацию о

сложности обрабатываемого в данный момент изображения, оценивает ее и выделяет каждому кодеру ресурс битов, пропорциональный потребности. Если в пакете программ присутствуют, например, фильмы, детские, спортивные, развлекательные программы, в разные моменты времени в зависимости от наличия движения, детальности изображения, цветовой насыщенности они требуют разной скорости выходного потока для сохранения примерно одинакового субъективного качества изображения и, что еще важнее, пики скорости наступают в разные моменты времени, так что суммарная скорость может быть заметно снижена. Исследования показали, что без ухудшения качества можно выиграть примерно 30% пропускной способности канала. Это означает, что вместо 6-ти программ в спутниковом стволе можно передать 8.

5.4. СТАНДАРТ СЖАТИЯ MPEG-4.

Следующим после MPEG-2 проектом группы MPEG стал стандарт MPEG-4. Большинство документов, входящих в стандарт MPEG-4, были приняты в конце 1998 гг. начале 1999 годов. В 1999 году появилась вторая версия MPEG-4 [5.2].

Стандарт MPEG-4 охватывает следующие области:

- цифровое телевидение и видеосвязь;
- интерактивную графику, синтез изображений;
- интерактивные мультимедийные приложения, в том числе передаваемые через Интернет.

Стандарт MPEG-4 позволяет передавать и записывать в различные ЗУ видео и звуковую информацию с очень большими коэффициентами сжатия. Первоначально он создавался для передачи движущихся изображений и звука по узкополосным каналам связи, что необходимо как в системах видеосвязи при использовании обычных телефонных сетей и относительно низкоскоростных цифровых каналов (64 кбит/с), так и для передачи через Интернет. В настоящее время MPEG-4 получил широкое распространение как средство записи кинофильмов и видеопрограмм на

лазерные диски. Кроме того, новый стандарт обеспечивает интерактивность, т.е. возможность для пользователя управлять процессом передачи ему информации путем запросов, выбора вариантов и других действий. Возможности MPEG-4 используются в телевизионном вещании, особенно в интерактивном телевидении.

Объекты и сцены

Важнейшей особенностью MPEG-4 является объектно-ориентированный подход, сущность которого заключается в том, что передаваемое изображение со звуковым сопровождением представляется как совокупность видео- и аудиообъектов.

Видеообъектами (VO – Visual object) могут быть изображения людей и предметов, перемещающихся перед неподвижным фоном, и сам неподвижный фон. Обычное телевизионное изображение может быть единым видеообъектом. Аудиообъектами (АО) могут быть голоса людей, музыка, другие звуки. Связанные видео- и аудиообъекты, например, изображение человека и его голос, образуют аудиовизуальный объект (AVOs). Видео- и аудиообъекты составляют сцену. MPEG-4 содержит специальный язык для описания сцен – BIFS (Binary Format for Scenes – двоичный формат для сцен).

Описание сцены имеет иерархическую структуру. На Рис. 1. приведен пример структуры описания сцены из популярного мультфильма, в которой Винни-Пух и Пятачок обсуждают план добывания меда у дерева с пчелиным дуплом.

Верхним уровнем структуры является сцена в целом. Она содержит неподвижный фон, образованный изображениями земли, травы, дерева и т.д. В сцене присутствуют два говорящих персонажа, каждый из которых является аудиовизуальным объектом, включающим видеообъект – движущееся изображение персонажа, и аудиообъект – голос этого персонажа. Кроме того, в сцене присутствует пчелиный рой, который также является AVOs объектом, включающим видеообъект – изображение непрерывно движущихся пчел, и аудиообъект – звуки, издаваемые ими.

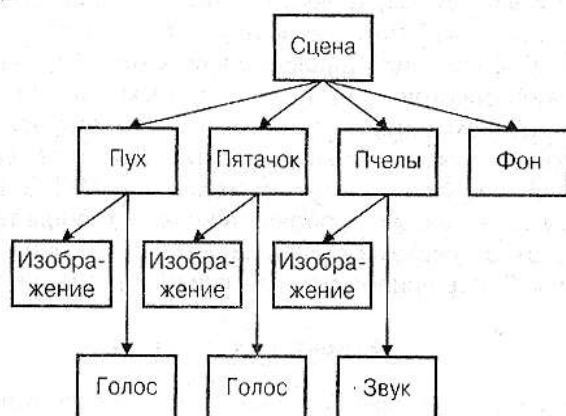


Рис. 1. Описание каждой сцены.

Описание каждой сцены включает данные о координатах объектов в пространстве и об их привязке ко времени. Видеообъекты могут размещаться в разных планах сцены, так что видеообъекты, находящиеся в более близких к зрителю планах сцены, перекрывают при движении видеообъекты, находящиеся в более дальних планах.

Сцена, представляемая пользователю, может содержать все объекты, информация о которых поступает в принимаемом потоке данных или только часть этих объектов. Состав сцены может определяться поставщиком мультимедийной продукции, например, в зависимости от суммы денег, заплаченных пользователем. В интерактивном режиме пользователь может влиять на развитие сцены, подавая соответствующие команды.

Кодирование видеообъектов

Видеообъекты, составляющие сцену, кодируются по отдельности. Кодированные видеоданные всех видеообъектов объединяются в последовательность визуальных объектов (VS). Видеообъект может иметь несколько слоев или уровней, каждому из которых соответствует элементарный поток видеоданных. Наличие нескольких слоев обеспечивает возможность масштабируемости. Базовый слой дает изображение видеообъекта с базовым качеством. Дополнительные слои позволяют полу-

чать изображение с улучшенным пространственным разрешением, меньшими искажениями из-за сжатия и т.д.

Изменяющееся во времени изображение видеообъекта передается в виде последовательности его неподвижных изображений в дискретные моменты времени. Эти неподвижные изображения называются «плоскостями видеообъекта» (VOP – Visual Object Plane). Если видеообъектом является обычное телевизионное изображение, то плоскостями этого видеообъекта могут быть обычные кадры. VOP объединяются в группы (GOV). VOP, как и кадры в MPEG-2, могут кодироваться независимо от других VOP (I-VOP) или с предсказанием и компенсацией движения (P-VOP и B -VOP).

В отличие от MPEG-1,2, в которых применяется фиксированный алгоритм кодирования, в MPEG-4 используется целый набор методов кодирования, включающий как алгоритмы, сходные с применяемым в MPEG-1 ,2, так и принципиально новые методы кодирования, основанные на понятии видео-объекта. Выбор того или иного метода кодирования в конкретном случае определяется типом видеообъекта и требуемым коэффициентом сжатия информации. MPEG-4 позволяет эффективно сжимать как натуральные, так и синтетические изображения и объединять их при воспроизведении.

Обобщенная структурная схема видеокодера MPEG-4 для натуральных изображений приведена на Рис. 2.

На схеме показаны блоки Кодер формы и Кодер-текстур, сумматор, вычитающее устройство, и переключатель Выбор, с помощью которого осуществляется подключение одного из блоков предсказания в зависимости от используемого метода кодирования. Данная схема является упрощенной и не показывает многие блоки и связи.

На вход кодера поступают исходные видеоданные, например, цифровой телевизионный сигнал. На выходе кодера формируется элементарный поток видеоданных.

Кратко рассмотрим основные методы кодирования натуральных изображений.

- видеообъекты, представляющие собой прямоугольные изображения (например, обычные ТВ-кадры), кодируются методом, аналогичным

применяемому в MPEG-1,2. Метод включает предсказание с оценкой и компенсацией движения для макроблоков 16x16 пикселей и ДКП ошибки предсказания в блоках 8x8 пикселей. Для определенности будем считать, что предсказание в этом случае выполняется в блоке Пред1. Связь выхода блока ОД с мультиплексором и средства управления коэффициентом сжатия на рисунке не показаны.

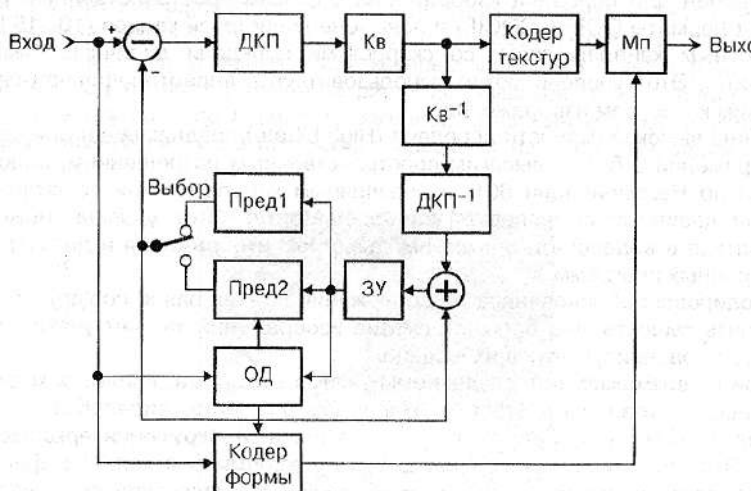


Рис. 2. Структурная схема видеокодера MPEG-4.

Этот вид кодирования имеет два уровня по скорости передачи двоичных символов в выходном потоке данных.

Уровень очень низкой скорости передачи VLBV (Very Low Bitrate Video) предназначен для передачи изображений с низким пространственным разрешением и пониженной частотой кадров (10...15 Гц) по узкополосным каналам связи со скоростями передачи двоичных символов 5...64 кбит/с. Этот уровень может использоваться в видеотелефонной связи с невысоким качеством изображения.

Уровень высокой скорости передачи (High bitrate) предназначен для передачи изображений с более высоким пространственным разрешением, вплоть до формата по Рекомендации 601, по различным каналам связи со скоростями передачи двоичных символов 64 кбит/с...10 Мбит/с. Этот уровень может использоваться в видеосвязи с высоким качеством изображения и для передачи телевизионных программ.

- кодирование, основанное на содержании, позволяет получить существенно большее сжатие изображений за счет учета свойств видеообъектов, присутствующих в сцене.

Одной из возможностей, создаваемых этими методами, является кодирование видеообъектов сложной формы. Например, в качестве видеообъекта может быть взята область изображения, отличающаяся от окружения яркостью или цветом. Эта область может перемещаться и деформироваться. При формировании предсказанного изображения с компенсацией движения смещаются не прямоугольные макроблоки, а выделенные области, которые к тому же могут изменять свою форму. При этом ошибка предсказания оказывается значительно меньше, и объем информации, содержащейся в разности предсказанного и настоящего изображений очередного кадра, существенно уменьшается. В коде, показанном на Рис. 2, такой вариант предсказания выполняется в блоке Пред 2.

Форма видеообъекта описывается матрицей. При бинарном кодировании элементы матрицы, соответствующие элементам изображения, входящим в видеообъект, приравниваются единице, а соответствующие элементам изображения, находящимся вне видеообъекта, – нулю. При градиционном кодировании элементы матрицы принимают большее число значений, что позволяет описывать такие свойства объекта, как прозрачность. Элементы указанной матрицы определяются и кодируются в Коде формы, после чего они включаются через мультиплексор Мп в выходной поток данных.

Данные о форме видеообъекта занимают значительно больше двоичных символов, чем простой вектор движения. Тем не менее, общий выигрыш в уменьшении объема передаваемой информации, по сравнению с MPEG-1,2, оказывается существенным.

- для сжатия изображений неподвижного фона и текстур протяженных объектов используется метод кодирования, основанный на вейвлет-преобразовании. Этот метод обеспечивает высокие степени сжатия и многоступенчатую масштабируемость по пространственному разрешению.

- неизменяющийся или почти неизменяющийся задний план изображения может передаваться как так называемый «спрайт». Полное изображение спрайта передается один раз. Затем передаются только 8 парамет-

ров глобального движения, описывающих панорамирование, т.е. перемещение камеры относительно заднего плана.

Перейдем к методам кодирования синтетических видеообъектов, создаваемых с использованием средств машинной графики. Такие видеообъекты могут кодироваться рассмотренными выше методами для натуральных изображений. Однако значительно эффективнее использовать их параметрическое описание.

В стандарте MPEG-4 используется модель человеческого лица, построенная на основе сетки из треугольных ячеек, которые заполняются текстурой (мелкая структура изображения). Пример «сеточной модели лица» показан на Рис. 3. Имеется также трехмерная модель человеческого тела в виде трехмерной сетки. Двумерные изображения человека получаются путем построения проекции трехмерной модели на нужную плоскость.

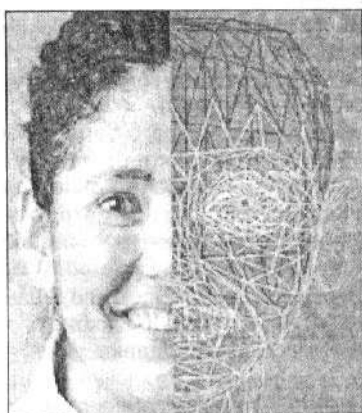


Рис. 3. «Сеточная» модель лица.

Форма, текстура и выражение лица в статике описываются параметрами FDP (Facial Definition Parameters), а в динамике – параметрами FAP (Facial Animation Parameters).

Для тела в статике задаются параметры BDP (Body Definition Parameters), а в динамике – BAP (Body Animation Parameters). Статические параметры FDP и BDP передаются в начале сеанса связи. Для воспроизведения мимики лица и движений тела собеседника в процессе разговора передаются динамические параметры FAP и BAP.

Синтетические изображения лица и тела человека могут использоваться в системах видеосвязи вместо настоящих изображений собеседника. Передача параметров модели требует существенно меньшей скорости передачи двоичных символов, чем передача реального изображения.

В некоторых случаях можно в приемной части системы получить информацию об изменениях изображения объекта на основе другой информации. Такой случай характерен для передачи изображения лица говорящего человека. Движения рта и мимика во многом определяются произносимыми словами и могут быть синтезированы на основе принятого звукового сигнала, содержащего голос собеседника. При этом требуемая для осуществления видеосвязи скорость передачи двоичных символов еще уменьшается.

Помимо лица и тела могут синтезироваться произвольные двумерные изображения также в виде сеток с треугольными ячейками, заполняемыми текстурой.

Стандартом MPEG-4 обеспечивается многоуровневая масштабируемость по пространственному разрешению, по времени и по качеству изображения. В стандарте предусмотрены средства, обеспечивающие работоспособность системы передачи видеoinформации при наличии помех и ошибок в канале связи.

Кодирование аудиообъектов

Кодирование звуковой информации также может осуществляться разными способами, дающими различные объемы передаваемых данных и различное качество звука на выходе системы.

- кодирование всех видов звука с обеспечением высокого и среднего качества выполняется методом, основанным на методе AAC стандарта MPEG-2. При этом обеспечивается передача до 8 каналов звука при скорости передачи двоичных символов 16...64 кбит/с на канал.

- кодирование музыки и других звуков с более низкими скоростями выходного потока по методу TwinVQ (Взвешенное векторное квантование с перемежением в области преобразования). Как и в методе AAC, в этом методе выполняются разложение на частотные поддиапазоны и ДКП в каждом из них. Отличие TwinVQ от AAC состоит в векторном квантовании спектраль-

ных составляющих звукового сигнала. В результате скорость передачи двоичных символов в выходном потоке данных составляет от 6 до 24 кбит/с.

- для передачи речи с высоким и средним качеством используется метод кодирования CELP (кодирование возбуждений с линейным предсказанием), который обеспечивает скорости передачи 6...24 кбит/с при частотах дискретизации 8 кГц или 16 кГц.

- параметрическое кодирование речи по методу HVXC (кодирование возбуждений гармоническими векторами), которое обеспечивает сжатие при сохранении разборчивости до скоростей 2...4 кбит/с и даже до 1,2 кбит/с при частоте дискретизации 8 кГц.

- самые низкие скорости передачи 0,2...1,2 кбит/с достигаются для искусственно синтезированной речи. Для этого в MPEG-4 имеется интерфейс преобразования текста в речь TTSI, который позволяет передавать описание речи в виде последовательности фонем (звукосочетаний) с указаниями особенностей их произнесения (ударения, длительности и т.д.). По этим данным в декодере синтезируется речь, которая синхронизируется с анимацией изображения лица.

- музыка также может передаваться в виде описания и синтезироваться в декодере. Для описания звучания музыкальных инструментов в MPEG-4 дан специальный язык SAOL (язык структурированного звукового оркестра). Каждый инструмент представляется как небольшой набор средств обработки сигналов, позволяющий создавать специфический для данного инструмента звук. Описания музыкальных инструментов загружаются в декодер из принимаемого потока данных и могут храниться в нем для последующего использования.

Для описания собственно музыки передается описание оркестровки, т.е. команды и данные, по которым осуществляется синтез звуков, соответствующих разным инструментам. Оркестровка описывается с помощью особого языка SASL (язык структурированной звуковой оркестровки).

Отметим, что для синтезированных речи и музыки в MPEG-4 задаются именно языки их описания, а не сами алгоритмы синтеза, которые могут быть различными.

Кодирование аудиообъектов также обладает свойством масштабируемости. Например, на базовом уровне может использоваться метод ко-

дирования CELP, а дополнительный уровень обеспечивает качество звука, соответствующее кодированию по MPEG-2 AAC.

Более сложный и дорогой декодер может декодировать базовый и дополнительные слои потока данных и позволяет получать более высокое качество воспроизводимого звука, чем более простой и дешевый декодер, воспринимающий только базовый слой.

Передача данных

Структурная схема формирования передаваемых потоков данных в стандарте MPEG-4 приведена на Рис. 4. Элементарные потоки ES с видео- и аудиокодеров поступают на уровень синхронизации (SL) и в блоках SL преобразуются в пакетизированные SL-потоки, в которые введены метки времени и данные о тактовых частотах. Это позволяет привязать к единой шкале времени различные видео и аудиообъекты.

Далее пакетизированные SL-потоки поступают на уровень DMIF (интегрированная система доставки мультимедиа). Это – протокол, обеспечивающий управление потоками данных для мультимедиа. Как всякий протокол передачи данных (например, протоколы, используемые в Интернет), DMIF обеспечивает посылку запросов от пользователя к источнику информации и пересылку запрошенных данных пользователю. Кроме того, DMIF дает пользователю средства управления в виде интерфейса пользователя, позволяя подавать команды для выбора информации (например, фильма) и формируя сообщения о получении доступа к этой информации или о возникших при этом трудностях.

DMIF охватывает три основные сферы применения MPEG-4: передачу по интерактивным сетям (Интернет), передачу по обычным вещательным каналам и запись видеопрограмм на компакт-диски.

На уровне DMIF возможно объединение в блоках FlexMux пакетизированных SL-потоков во FlexMux потоки. Эта операция является необязательной, так как под управлением DMIF могут передаваться и пакетизированные SL-потоки.

Затем данные переходят на уровень TransMux, где FlexMux или SL потоки объединяются и преобразуются в транспортный поток. В стандар-

те MPEG-4 этот поток не определен. В качестве его может использоваться, например, транспортный поток MPEG-2.

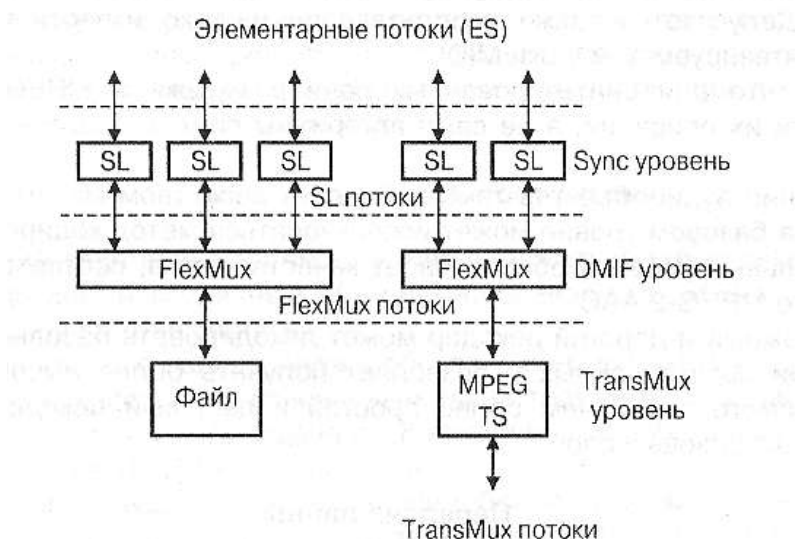


Рис. 4. Формирование транспортного потока MPEG-4.

До сих пор речь шла о потоке, который несет данные от источников видеопрограмм к зрителям. Для реализации интерактивного телевидения и различных видов мультимедийного сервиса необходима передача информации от зрителя на головную станцию системы. Для этого передается восходящий поток данных, скорость передачи двоичных символов в котором обычно значительно меньше, чем в нисходящем потоке.

Декодирование и воспроизведение

Структурная схема декодирующей части системы по стандарту MPEG-4 приведена на Рис.5. На схеме показаны демультимплексор дМп, буферные ЗУ, декодеры дКд и блок объединения БОб.

На вход поступает транспортный поток TransMux Stream, из которого в демультимплексоре выделяются элементарные потоки, данные каждого из которых записываются в соответствующее БЗУ1. Назначение БЗУ1 – накапливать неравномерно поступающие по каналу связи данные и по мере надобности передавать их на декодер. Далее выполняется декодирование элементарных потоков. Получаемые при этом данные видео- и

аудиообъектов записываются в БЗУ2. ЭП, относящиеся к одному объекту, могут декодироваться совместно.

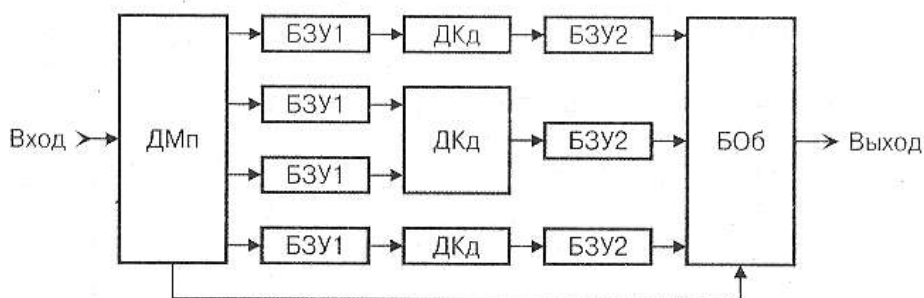


Рис. 5. Декодер MPEG-4.

Данные отдельных объектов считываются из соответствующих БЗУ2 и из них в блоке объединения формируются цифровые сигналы изображения и звука, поступающие далее на воспроизводящие устройства. При этом обеспечивается синхронизация всех видео- и аудиообъектов.

Типы объектов, профили и уровни MPEG-4

Понятия уровня и профиля имелись в MPEG-2. Помимо этого, в MPEG-4 появилось понятие типа объекта. Предусмотрены следующие типы видеообъектов:

- простой – прямоугольный видеообъект, при кодировании которого используются VOP I- и P-типов;
- простой масштабируемый, в котором добавлена возможность масштабирования по пространственному и временному разрешениям;
- базовый, в котором по сравнению с простым добавляется возможность использования VOP B-типа;
- основной, в котором по сравнению с базовым добавляются градиционное кодирование формы, спрайты, чересстрочная развертка;
- N-битовый, в котором по сравнению с базовым добавляется возможность задавать число двоичных разрядов в пределах от 4 до 12;
- неподвижная масштабируемая текстура, кодируемая с использованием вейвлет-преобразования;

- анимируемая двумерная сетка, с помощью которой может представляться натуральное изображение с последующим его изменением (анимацией) путем перемещения узлов сетки;
- базовая анимированная текстура, обеспечивающая возможность анимации неподвижных изображений;
- примитивное лицо, дающее средства анимации человеческого лица.
- Профили в MPEG-4 различаются по составу используемых типов объектов, по возможному числу видеообъектов в сцене и по максимальной скорости передачи двоичных символов в выходном потоке данных. Различные профили предназначены для разных областей применения. Уровни, как и в MPEG-2, определяются количеством элементов изображения в сцене.

Для звуковой информации в первой версии MPEG-4 предусмотрено 15 типов объектов, различающихся используемым методом кодирования и наличием масштабируемости.

Профили кодирования звука различаются составом доступных для них типов аудиообъектов. Речевой профиль может использовать объекты типов CELP, HVXC и TTSI. Масштабируемый профиль, помимо этого, использует объекты типов AAC и TwinVQ. Синтетический профиль использует только типы объектов, включающие синтезированные звуки. Основной профиль объединяет возможности трех предыдущих.

Во второй версии MPEG-4 введены дополнительные профили как для изображений, так и для звуков, а также графические профили, профили описания сцены и профиль дескрипторов (средство описания признаков мультимедийного контента) объектов.

Отметим, что одна из основных идей, заложенных в MPEG-4, идея разбиения кадра на сцену и объекты, которые кодируются отдельно, а приемнику передается информация об изменении каждого из объектов, пока не реализована.

Механизм такого многослойного кодирования актуален, в первую очередь, для систем интерактивного телевидения, в котором объекты могут, на компьютерный манер, использоваться для управления событиями. В настоящее время в сетях цифрового вещания широко используется техно-

логия компрессии H.264/AVC, стандартизированная в 10-ой части стандарта MPEG-4, используемая для сжатия объектов прямоугольной формы.

Но даже, если не принимать во внимание этот нюанс, то говорить о существовании горизонтального рынка, предполагающего, что в рамках одного проекта можно использовать оборудование разных производителей, не ожидая системных подвохов, пока рано. Он также предполагает примерно одинаковое качество работы декодеров, в том числе бытовых. Эти условия уже давно соблюдаются в отношении аппаратуры с MPEG-2, но не всегда для оборудования с MPEG-4.

Параллельно с MPEG-4 развиваются и другие стандарты – VC-1 (Video Codec), Windows Media, MediaFlo и AVS. VC-1 – это разработка Microsoft. Он появился несколько лет назад одновременно с H.264 и поначалу рассматривался как его серьезный конкурент. Все ведущие производители поспешили анонсировать разработку кодеров обоих форматов. Но, в итоге, европейский рынок отдал предпочтение MPEG-4, и VC-1 используется только в некоторых сетях IPTV. Разработка AVS инициирована правительством Китая. Этот стандарт описывает не только методы видео- и аудиокомпрессии, но также и систему контроля копирования контента. Несмотря на различное происхождение стандартов, причина их появления одна – нежелание оплачивать лицензию за использование MPEG стандарта.

MPEG-7 и метаданные

Глобальный информационный взрыв поднял вопрос: а есть ли вообще смысл в возможности получения доступа ко всей информации, какая только существует на планете, если Вы не знаете, где находится именно та информация, которая нужна лично Вам. На самом деле Интернет и «Всемирная паутина» WWW обеспечивают в этом смысле превосходный сервис. Было бы совершенно невозможно найти требуемые данные, если бы не такие системы поиска по заданному тексту, как Yahoo и т.п. И действительно, наиболее посещаемые сайты в Интернет – сайты с текстовыми поисковыми системами.

В условиях все большей «цифровизации» телевидения вполне логичными кажутся прогнозы о «постепенном взрыве» объемов аудиовизуальной информации в новом веке, подобно тому, как это происходило с текстовой информацией и неподвижными изображениями в течение последних нескольких лет. Но как будет работать видеоэквивалент подобной Yahoo-системы? Ведь общепринятого описания телевизионного материала пока что просто не существует. Невозможно, скажем, послать запрос «Рик, Эльза и самолет» и получить кадр с таким содержанием. Так же как невозможно запросить «ми бемоль, ми бемоль, ми бемоль, до» и получить от поисковой системы ответ «Бетховен, Симфония №5, до минор».

Поэтому группа MPEG запустила проект, нацеленный на решение поставленных выше задач. Новый член семейства MPEG, названный «интерфейсом описания мультимедийного контента» или MPEG-7, определяет стандартный набор дескрипторов, которые могут быть использованы для описания различных типов мультимедийной информации. Таким образом, становится возможным проиндексировать и вести поиск тех аудиовидеоматериалов, для которых будут указаны соответствующие им данные MPEG-7. Такие материалы могут включать неподвижные изображения, графику, трехмерные модели, аудиоинформацию, речь, видео, а также информацию о том, как все эти элементы объединяются в мультимедийную презентацию (так называемый «сценарий»). Специальные виды информации могут включать данные по мимическим выражениям и персональные характеристики.

MPEG-7 строится на базе MPEG-4, который, как мы уже видели, обеспечивает средства кодирования аудио-видеоматериалов в виде объектов с определенными пространственно-временными соотношениями.

Область применения стандарта включает образование, журналистику, культуру (музеи, картинные галереи), архивы кино, телевидение и радио, дистанционное зондирование, телемедицину и многие другие отрасли.

6. МИКШИРОВАНИЕ, КОМБИНИРОВАНИЕ И МЕТОДЫ ХРАНЕНИЯ ТЕЛЕИНФОРМАЦИИ

6.1. МИКШИРОВАНИЕ ТЕЛЕВИОННЫХ СИГНАЛОВ

Телевизионная программа, содержащая единственную, непрерывно снимаемую одной и той же камерой сцену, была бы невероятно скучна, какой бы сложной ни была эта сцена. Любая телевизионная программа состоит из последовательности различных изображений, сменяющих друг друга по мере переключения камер и, соответственно, смены снимаемых ими сцен [6.2]. Стилистически такая техника ведет свое происхождение от кинематографа, в котором отдельные фрагменты фильма соединялись вместе (фактически соединялись клеем). В телевидении данный эффект обеспечивается электронным образом путем переключения с одной камеры на другую. Чтобы переключение проходило успешно, оно должно происходить во время прохождения гасящих кадровых импульсов. Это выглядит прямой аналогией с кинематографом, где фрагменты пленки должны нарезаться по границам кадров, чтобы стык оставался невидимым. На первый взгляд, это условие кажется незначительным, но на самом деле оно налагает требования как на процедуру самого переключения, так и на характеристики выбираемых источников видеосигналов, что более важно. Кадровые гасящие импульсы в переключаемых сигналах должны приходиться на одни и те же моменты времени. Это наиболее существенное требование, из которого следует, что любые источники видеосигналов, подключаемые к системе (аналоговой или цифровой), должны быть синхронизированы между собой. Выполнение изложенных требований обычно достигается путем подачи на каждый видеоисточник некоторого опорного сигнала с синхронизирующей информацией, обычно называемого “color black”.

Процесс смены одного съемочного плана другим называется видео-переходом. В том случае, когда используется записанный ранее видеоматериал, процесс формирования переходов называется монтажом. В настоящее время специализированные видеомикшеры заменяются монтажным программным обеспечением, работающим на персональных компьютерах.

Существует всего четыре типа монтажных стыков или переходов:

- прямой переход;
- микширование или наплыв;
- введение/выведение;
- вытеснение (шторка).

Каждый тип перехода, имея свой, отличный от других, визуальный характер, часто несет в себе и какой-то свой смысл. Видеомикшер, или программное обеспечение для монтажа на компьютере, дает возможность комбинирования различных типов переходов, придавая сюжету дополнительную драматичность или, наоборот, комедийный характер.

Прямой переход – наиболее простой тип перехода, состоящий в мгновенной смене одного съемочного плана другим. Технически прямой переход является простым переключением между источниками. Условия, необходимые для его осуществления, рассматривались выше.

Наплыв или микширование наплывом – переход, в котором один съемочный план плавно сменяет другой. При этом переходе одно изображение начинает слабеть, а другое, поначалу невидимое, становится постепенно все более заметным. На половине перехода оба изображения видны одновременно приблизительно в одинаковую силу. Технически наплыв достигается умножением значений сигнала первого источника для всех пикселей на один коэффициент, а соответствующих значений второго источника – на другой, равный разности между единицей и первым коэффициентом. Если мы обозначим первый и второй съемочные планы через P и Q , то выход представится в виде $\{aP + (1-a)Q\}$. При этом коэффициент a должен плавно меняться во времени от 1 (изображение составле-

но только из Р) до 0 (изображение составлено только из Q). При компьютерном монтаже соответствующие вычисления выполняются программным образом. При использовании видеомикшеров умножение осуществляется с помощью специальных электронных схем.

Выведение – постепенный переход от изображения к темному экрану. **Введение** – постепенный переход от темного экрана к изображению. Обычно эти переходы используются в профессиональном телевидении в начале или в конце программы для того, чтобы показать, что между отдельными съемочными планами прошел какой-то промежуток времени. Как вы уже могли бы догадаться, введение/выведение могут рассматриваться как наплыв, с той разницей, что вместо одного из съемочных планов берется сигнал черного поля.

Переход типа «**вытеснение шторкой**» или просто «шторка» – переход, при котором один съемочный план постепенно замещает другой. Он похож на наплыв тем, что, в отличие от прямого перехода, тоже не происходит мгновенно. Отличие же от наплыва состоит в том, что в случае шторки второе изображение как бы постепенно приоткрывается из-под первого, которое, в свою очередь, как бы стирается с поверхности экрана. Шторки формируются с помощью счетчиков долей строк и долей кадров, генерирующих линейные по времени функции, показывающие, какая доля строки пройдена от ее начала и, соответственно, какая доля поля пройдена. Сигналы счетчиков подаются на цифровой компаратор, на другой вход которого подается заданный меняющийся по времени сигнал, определяющий форму и скорость перемещения шторки. По мере постепенного изменения указанного сигнала компаратор будет переключаться из одного состояния в другое. По ходу сканирования экрана по вертикали и горизонтали положение точек переключения на строке будет меняться. Если теперь сигнал с выхода компаратора, принимающий дискретные значения 0 и 1, подать в качестве коэффициента a на блок наплыва, рассмотренный выше, а выходной сигнал с этого блока сформировать как:

$$aP + (1-a)Q = \text{выходной сигнал},$$

то результатом будет резкий переход от одного сигнала к другому, видимая на экране граница которого будет меняться в зависимости от предварительных установок на входе компаратора. Получение более сложных конфигураций шторок возможно при суммировании и неаддитивной комбинации сигналов счетчиков строк и кадров.

Рассмотрим теперь несколько эффектов, применяемых при трансляции программ.

Расщепленный экран – это эффект, представляющий собой по существу «замороженную» шторку, используется в профессиональных видеомикшерах при производстве новостных программ и позволяет, например, установить над головами дикторов неподвижный кадр из репортажа с места событий, пока они читают вступление к сюжету.

Постеризация – эффект, позволяющий придать изображению сильную степень драматизма. Вы можете увидеть его в различных музыкальных программах и другой видеопродукции, насыщенной спецэффектами. Этот эффект представляет собой искажение изображения, получаемое за счет более грубого квантования, и достигается путем уменьшения разрядности в видеоданных до уровня ниже нормального, т.е. ниже 8 или 10 бит, предусмотренных для сигнала яркости.

Цветовая рирпроекция (хромакей) является одним из наиболее мощных инструментов, позволяющих сочетать снятое камерой естественное видеоизображение и сгенерированный на компьютере задний план или анимацию.

6.2. КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА И АНИМАЦИЯ

Компьютерные видеостандарты

Видеосистема персонального компьютера в типичной SVGA-конфигурации представлена на Рис. 1.

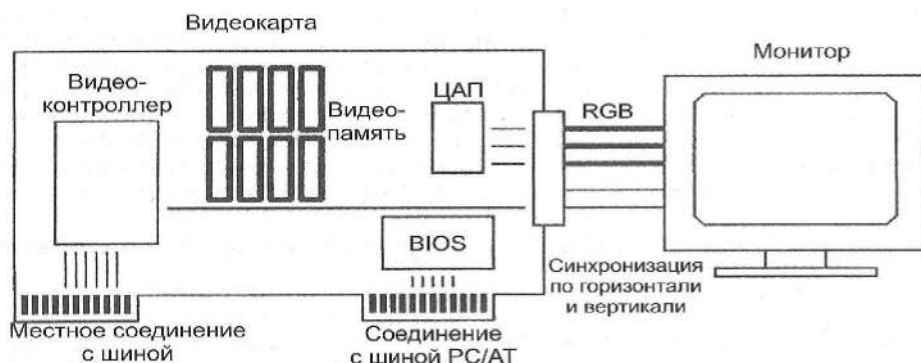


Рис. 1. Видеосистема персонального компьютера.

Наиболее важным фактором в данном случае является наличие прямого соединения между выходами цифро-аналоговых преобразователей и входами монитора для передачи аналоговых сигналов красного, зеленого и синего цветов. Таким образом, компьютер не должен осуществлять кодирование сигнала цветности. В этом нет никакой необходимости, поскольку обеспечение требуемой полосы передачи в данном случае не представляет проблемы. Из-за отсутствия перекрестных искажений сигналы остаются более «чистыми». Видеокарта компьютера содержит чип видеоконтроллера, оперативную видеопамять (RAM), базовую систему ввода-вывода (BIOS) и цифро-аналоговые преобразователи. Контроллер преобразовывает изображения, хранящиеся в видеопамяти (VRAM), в сигналы, имеющие форму, подходящую для передачи на цифро-аналоговые преобразователи для дальнейшего отображения на мониторе. На контроллер тоже возлагаются задачи синхронизации и общие функции по поддержанию работы системы. В первом приближении объем видеопамяти определяет разрешение и число доступных цветовых оттенков. Чип базовой системы ввода-вывода (BIOS) поддерживает связь между центральным процессором компьютера и видеосистемой через шину PCI. Видеопамять является частью памяти компьютера, к которой одновременно могут адресоваться как центральный процессор, так и BIOS видеокарты. Практически совершенное телевизионное изображение можно получить при отношении сигнал/шум около 50 дБ. В терминах цифрового сигнала

это означает необходимость трех 8-битовых чисел на каждый пиксел. В компьютерных технологиях такое изображение называется “TrueColor”. Ему соответствуют 16.8 миллионов (2 в степени 24) отличных друг от друга цветовых оттенков (для простоты говорится о 16 миллионах цветов, отображаемых в “TrueColor”. Компьютер также передает на монитор сигналы синхронизации. Чересстрочная развертка, являющаяся нормой в телевидении, в большей части компьютерных видеостандартов не рассматривается вовсе. Более того, сигналы вертикальной и горизонтальной синхронизации в компьютерной технике, как правило, полностью разделены.

Компьютерная графика и анимация

Бесспорно, роль современных компьютеров в графике и анимации чрезвычайно велика. Они могут использоваться просто как средства рисования, с их помощью можно создавать и запоминать целые последовательности индивидуальных изображений и показывать их в виде окончательно сформированного анимационного клипа. При достаточной мощности компьютера это можно делать в реальном времени, в противном случае необходимо записывать каждый кадр на ленту или на диск. Компьютер может использоваться для создания промежуточных изображений (промежуточных фаз) между ключевыми фазами, нарисованными художником, обеспечивая тем самым плавность движений на экране. На компьютере можно сгенерировать целый мир – несуществующий искусственный мир в трехмерном пространстве, объединяющий вместе сложные движения, синтезированные источники света, тени и текстуру поверхности. Современные компьютеры позволяют создавать анимацию, выходящую за рамки того, что априори достижимо силами человека-художника в течение нескольких человеческих жизней (из которых, по крайней мере, одна должна уйти на проведение математических операций).

Существует два основных типа анимации и два основных типа графики. Все вместе их можно рассматривать как четыре компоненты матрицы возможностей, каждая из которых требует различных программных средств и различных аппаратных ресурсов.

Анимация	В реальном времени	Не в реальном времени (покадровая)
двумерная (2D) графика	*	*
трехмерная (3D) графика	*	*

Типы анимации

Известно, что если перед глазами в достаточно быстром темпе появляется последовательность незначительно отличающихся друг от друга изображений, то возникает впечатление подвижного изображения. Кинокамера представляет реальное непрерывное движение через последовательность мгновенных неподвижных снимков, на основе которых в зрительном аппарате человека восстанавливается непрерывное изображение. Анимация (мультипликация) продвинулась еще на шаг дальше. Здесь последовательность неподвижных изображений возникает уже в самом начале процесса. При быстром просмотре такой последовательности также возникает ощущение непрерывности движения. Ниже мы рассмотрим анимацию, которая выполняется на настольных компьютерах. К счастью, настольные компьютеры нового поколения обеспечивают превосходную графику, конкурирующую по четкости с телевизионными изображениями вещательного качества. Но эту графику надо еще уметь передать на другие носители, а это не такой простой процесс. Основной источник проблем совместимости – различие в числе строк и кадров в компьютерных и телевизионных стандартах. Системы анимации в реальном времени способны воспроизводить индивидуальные кадры в темпе, обеспечивающем их восприятие в виде непрерывного движущегося изображения. Отсюда следуют вполне определенные требования на аппаратные средства, поскольку одного только большого объема оперативной памяти и высокого быстродействия процессора может оказаться недостаточно. Так, нормальная скорость доступа к жесткому диску может оказаться слишком малой с точки зрения обеспечения абсолютно стабильного темпа выдачи кадров. При работе с системами покадровой анимации только сам аниматор, в соответствии со своими желаниями, определяет, насколько высоким будет качество изображения на выходе. Компьютер в данном случае ничего не диктует. Художник может тратить на генерацию изображения столько

времени, сколько считает нужным, и записывать его на носитель кадр за кадром. Покадровая анимация позволяет добиться прекрасных результатов с использованием даже не самых мощных машин. Само воспроизведение, конечно, должно вестись уже с других аппаратов, а не с настольных компьютеров. Впрочем, в будущем все эти различия должны исчезнуть. Ведь единственное, что ограничивает сегодня использование анимации в реальном времени на персональных компьютерах – это аппаратные ограничения. Однако придет время, когда анимация в реальном времени с фотографическим качеством станет обычной для всех персональных компьютеров.

Программное обеспечение

Программа для компьютерной анимации самого простого типа использует способность компьютера генерировать и хранить изображения. В этом случае компьютер используется для рисования и раскрашивания индивидуальных кадров с применением типичных средств рисования: масштабирование, вращение, вырезание и вставки в комбинации со средствами нанесения текстуры, масками и т.д., что в итоге дает возможность генерации серии кадров, пригодных для анимации. Каждый законченный кадр записывается на жесткий диск или на видеоленту для дальнейшего использования. Анимационные системы такого типа называются двумерными. Это – плоский мир, создаваемый скорее художником, чем техническим специалистом, поскольку именно от художника зависит, как будет восприниматься изобретенный им мир и как будет воспроизводиться его глубина. Такая технология представляет собой компьютеризированную версию старой технологии ручной мультипликации. В отличие от двумерной, трехмерная (3D) программа анимации обеспечивает восприятие глубины за счет того, что программа сама производит необходимые вычисления для отображения перспективы, нанесения теней и т.д. Роль аниматора в данном случае скорее концептуальная, чем художественная. Она включает определение объектов изображения и их траекторий в пространстве кадра. В отличие от двумерной технологии, большая часть огромного объема работы по созданию трехмерного изображения в 3D анимации ложится именно на компьютер.

Двумерные (2D) системы

Основу систем двумерной графики и анимации составляют функции рисования и раскрашивания. Кроме них в систему включаются средства обработки фотографических изображений, обеспечивающие художнику-графику или аниматору очень широкие возможности, например, манипуляции с положением частей изображения. Такие функции относятся к пространственным трансформациям. Тринадцать важными типами пространственных трансформаций изображения являются перенос, вращение и увеличение/уменьшение. Математические операции, лежащие в основе этих функций, проиллюстрированы на Рис. 2.

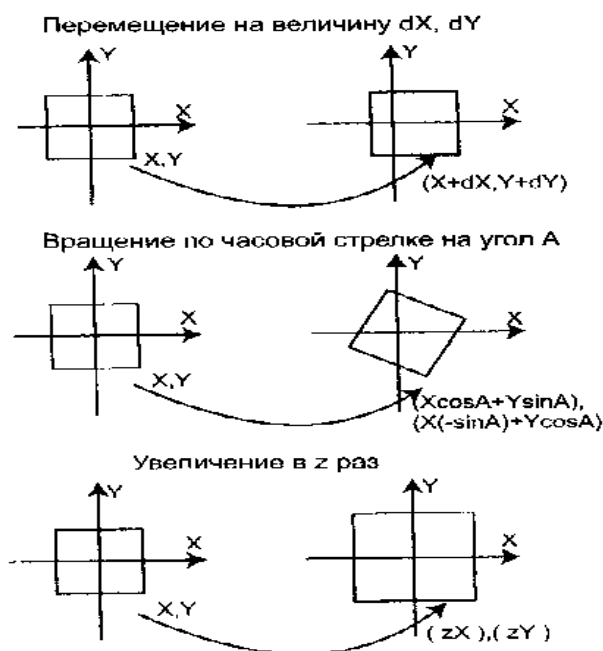


Рис. 2. Типы пространственных трансформаций.

В каждом таком случае предполагается некоторый центр, вокруг которого осуществляется трансформация. Если такого центра на самом деле нет, можно ввести в вычисления некоторый произвольный центр. Трудности при осуществлении пространственных трансформаций связаны с тем, что точные координаты вычисляемых точек не совпадают с дискретным расположением пикселей в растре. Одно из возможных решений

проблемы – округление координаты точки до положения ближайшего пикселя. Но в этом случае возможны слишком сильные искажения, особенно при передаче изображений небольших объектов. Более совершенная технология включает интерполяцию точных положений путем осреднения значений сигнала в трансформированном и ближайшем к нему пикселе и отображение результата. Идеальной была бы такая технология, которая сначала как бы повышала степень дискретизации, затем проводила бы пространственную трансформацию, а затем – обратную «субдискретизацию» к исходному числу пикселей.

Все, без исключения, коммерческие программы рисования на компьютере допускают выбор какой-либо зоны изображения, вырезание ее и помещение в буфер для последующих пространственных трансформаций – переноса, вращения и увеличения/ уменьшения. На Рис. 3 показаны возможные примеры использования функций рисования в 2D-анимации.

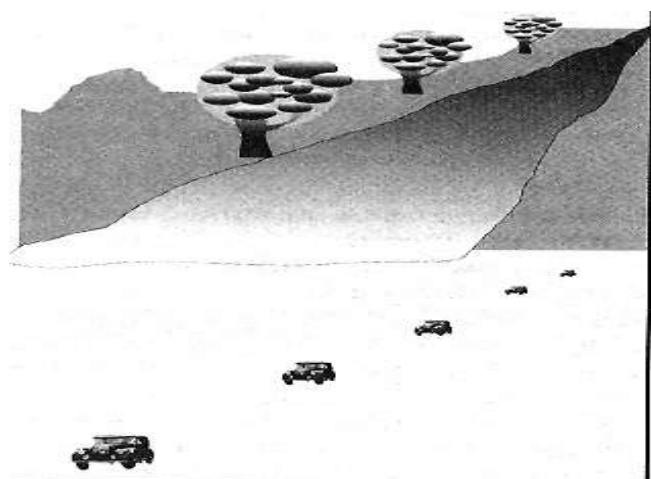


Рис. 3. Пример 2D-анимации.

В верхней части иллюстрации помещено изображения заднего плана. Изображение автомобиля было отсканировано с фотографии и вырезано с использованием гибких средств редактирования. Путем масштабирования размера изображения и переноса, повторяемых несколько раз, был сделан ряд ключевых кадров, показывающих, как отсканированное изображение может быть наложено поверх заднего плана.

Отметим, что для получения качественного движения в кадре необходимо было бы иметь серию кадров, в которой соседние изображения были бы гораздо ближе друг к другу, чем показано на рисунке. На самом деле, генерацию кадров, находящихся между ключевыми, также можно было бы возложить на компьютер. Процедура наложения одного изображения поверх другого называется композитингом.

Рассматривая обработку видеосигналов, мы уже видели, как два изображения могут использоваться одновременно для получения другого результирующего изображения. Говоря «телевизионным» языком, для этого используется такой процесс, как «прорезка», при котором в исходном изображении электронным образом «прорезается отверстие» и заполняется сигналом от видеоисточника или генератора титров. В компьютерной области используют такие термины, как «композитинг» или «маскирование», но суть процесса остается той же самой.

Трехмерная (3D) графика и анимация

Трехмерная (3D) графика и анимация дают возможность наблюдать с любой точки зрения и под любым углом, созданные на компьютере объекты в трехмерном пространстве как реальные реального мира. При работе с трехмерной графикой на первом месте стоит методология описания объектов, основанная на использовании численного моделирования окружающей среды и самих этих объектов. Модель окружающей среды называется «трехмерным искусственным окружением» 3Da.e. Каждый объект в пространстве 3Da.e. имеет высоту, ширину и глубину, т.е. описывается тремя измерениями в трехмерной декартовой системе координат. Горизонтальный размер обозначается через x , вертикальный – через y , глубина – через z . Центр системы координат обозначается тройкой $(0,0,0)$. Положение любой точки в пространстве по отношению к центру системы координат однозначно задается тройкой чисел x,y,z . В таком пространстве любой объект (внешняя его поверхность) набирается из множества многоугольников (полигонов), каждый из которых имеет заданное число вершин, определяемых в свою очередь тремя координатами. Обратите внимание, что с помощью многоугольников набираются любые,

даже криволинейные объекты. В силу различных практических причин в таком трехмерном пространстве чаще всего задаются две системы координат. Одна из них определяет уже описанное нами трехмерное пространство. Координаты в этой системе называются «мировыми координатами». Вторая система – система координат наблюдателя или камерная система координат (связанная с видеокамерой). Причина такого усложнения состоит в том, что целью программ трехмерной графики или анимации является создание и манипулирование изображениями, т.е. тем, что видит зритель или наблюдатель. Отсюда следует, что лучше описывать окружающее пространство с «точки зрения» снимающей его воображаемой камеры, находящейся в месте расположения «наблюдателя». Таким образом, возникает необходимость ввести камерную систему координат. Однако не все описания в трехмерном пространстве было бы удобно вести в системе координат, связанной с камерой. В таких случаях используется мировая система координат. Уже отмечалось, что при анализе пространственных преобразований можно вводить произвольные (ложные) центры, меняя положение точки, вокруг которой происходит вращение. То же самое можно делать и в трехмерных системах для получения эффекта перехода от одной системы координат к другой. Как мы уже видели ранее, перемещение и вращение на плоскости описываются математическими операциями сложения и умножения. Поэтому нет ничего удивительного в том, что преобразования в трехмерном пространстве включают те же операции, но только объем требуемых вычислений становится больше. Записанные в одну длинную строку, эти вычисления могли бы выглядеть очень запутанными. Поэтому с целью более удобного определения операций пространственных преобразований используется математический аппарат матриц. Поступательное перемещение осуществляется с помощью сложения матриц:

$$[x,y,z] + [dx,dy,dz] = [x+dx, y+dy, z+dz]$$

Вращение осуществляется с помощью последовательного умножения на три типовые матрицы вращения. Вращение вокруг оси x («крен») осуществляется путем умножения на следующую матрицу размера 3×3 :

$$\begin{pmatrix} \cos A & \sin A & 0 \\ -\sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Аналогия с приведенными выше формулами для осуществления эффекта вращения на экране совершенно очевидна. Обратите только внимание, что положительному направлению вращения, как принято в математике, соответствует направление вращения против часовой стрелки. Вращение вокруг оси y («рыскание») осуществляется путем умножения на матрицу:

$$\begin{pmatrix} \cos A & 0 & \sin A \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A & 0 & \cos A \end{pmatrix}$$

Вращение вокруг оси z («тангаж») осуществляется путем умножения на матрицу:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & \sin A \\ 0 & -\sin A & \cos A \end{pmatrix}$$

Увеличение всего тела в размерах достигается путем умножения каждой координатной тройки на один и тот же масштабный коэффициент.

Генерация изображений в трехмерной графике

Итак, мы задали систему координат, определяющую трехмерное окружение – иерархическую структуру, внутри которой мы можем строить объекты (тела). Объекты строятся на основе многоугольников, каждый из которых определяется своими вершинами, которые задаются координатными тройками. Возьмем простой пример – куб. Куб состоит из шести многоугольников, положение каждого из которых определяется положением четырех вершин, а положение каждой вершины – тремя координатами. Имея рассмотренный выше аппарат матричных преобразований, мы можем манипулировать положением и ориентацией тел в этом трехмерном пространстве. Ирония, однако, состоит в том, что после генерации

трехмерной математической модели система трехмерной графики должна будет снова «свернуть» результат к двум измерениям, т.к. все изображения надо отображать на плоском экране. Таким образом, финальная стадия манипуляций в трехмерном искусственном окружении (3Da.e.) включает нахождение «экранных» координат каждой точки по заданной тройке ее координатных чисел в пространстве. Для получения двумерного изображения можно использовать различные преобразования координат. В большинстве систем выбрано преобразование, называемое «перспективным преобразованием». Суть его состоит в том, что в пространстве задается некая «фокальная точка», а между этой точкой и наблюдаемой сценой помещается плоскость. От каждой точки в 3Da.e. (или в наблюдаемой части этого пространства) проводится прямая линия, соединяющая ее с фокальной точкой. Пересечение этой линии с плоскостью определяет проекцию точки в трехмерном пространстве на плоскость. При выполнении такой процедуры для каждой точки сцены и при соединении точек в изображении сцены на плоскости в том же порядке, в котором они соединены в пространстве, получается окончательное двумерное изображение трехмерного пространственного окружения. Перспективное преобразование оказывается еще одним преобразованием относительно центра камерной системы координат.

Моделирование освещения

Этот созданный Нами виртуальный мир имеет исключительно академический интерес, т.к. без освещения, а мы его еще не ввели, мы не в состоянии будем увидеть ни одно из тел, набранное из многоугольников. В качестве искусственных источников освещения наиболее целесообразно рассматривать так называемые «точечные» источники. Предполагается, что в случае точечного источника свет испускается из бесконечно малой области пространства и равномерно распространяется во всех направлениях по прямым линиям. Чем более долгий путь проходят лучи от источника до объекта, тем меньше света попадает на этот объект. В качестве точечного источника можно рассматривать стандартную лампу накаливания. Представим себе, что стандартная 100-Ваттная лампа подве-

шивается в центре небольшой комнаты с окрашенными в белый цвет стенами. Такая комната будет смотреться очень ярко освещенной, поскольку стены будут отражать относительно большую часть световой энергии, падающей на единицу площади. Теперь представим, что та же самая лампа помещается в центр на этот раз огромной комнаты, стены которой также окрашены в белый цвет. В этом случае комната будет казаться гораздо более темной. Это происходит не потому, что стены стали отражать свет менее эффективно, а потому, что тот же поток световой энергии, испускаемый лампой, будет приходиться уже на гораздо большую площадь стен. Размеры солнечной системы таковы, что даже очень большая комната будет по сравнению с ней микроскопически мала. Таким образом, солнечное освещение будет создавать совершенно другую картину. Можно считать, что солнечные лучи падают на Землю параллельно, поэтому степень освещенности не будет зависеть от расстояния. Величина световой энергии, приходящаяся на единицу площади поверхности объекта (или освещенность E) при освещении его параллельными лучами, является функцией только интенсивности источника света (I) и угла, под которым лучи падают на поверхность (A):

$$E = I \cos A$$

В случае освещения объекта точечным источником в вышеприведенном выражении должно быть учтено распределение заданной световой энергии по всей освещаемой площади в зависимости от расстояния до источника света. В этом случае освещенность будет определяться выражением:

$$E = I \cos A / r^2$$

где r – расстояние от точечного источника света до объекта. Как видно, освещенность падает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Итак, теперь наш трехмерный мир имеет свой источник или источники света, подчиняющиеся физическим законам. Но мы все еще не можем увидеть ни один из многоугольников, поскольку каждому из них надо приписать еще и яркость. Яркость свечения отражающей поверхности определяется как величина световой энергии, исходящая с этой по-

верхности. Другими словами, это – количество света, отраженного от поверхности. Различные материалы отражают свет по-разному. Яркость следует отличать от освещенности, которая обозначает количество света, падающего на поверхность. Яркость меняется в зависимости от коэффициента отражения R . Для объектов с матовой (не блестящей) поверхностью величина яркости, связанная с отражением от их поверхности так называемого «рассеянного света», определяется как:

$$Y = R E$$

Поскольку каждый объект представляемой сцены способен отражать свет, то любой из объектов будет, соответственно, действовать и как источник света. Лучи от первичного источника, попадая на объект, отражаются от его граней по-разному. Если поверхность матовая, то лучи отражаются под разными углами. Если поверхность блестящая, отражение может происходить в очень узком диапазоне углов. Из-за взаимодействия с поверхностью отраженный свет может окрашиваться в различные цвета. Процесс отслеживания траектории лучей в трехмерном пространстве с учетом отражения и действия объектов как вторичных источников освещения называется «трассировкой лучей». Именно расчеты освещенности занимают большую часть вычислительных ресурсов любой системы трехмерной графики. Совокупность соответствующих вычислений и других операций, необходимых для получения окончательного изображения (например, нанесение теней), составляет процесс, который называется «рендерингом». Этот процесс даже на мощных компьютерах занимает несколько часов.

6.3. СТЕРЕОТЕЛЕВИДЕНИЕ И ПРИНЦИПЫ ЗАПИСИ ТЕЛЕСИГНАЛОВ

3D TV или стереотелевидение

Как упоминалось, стереозрение человека определяется разнесением на некоторое расстояние его глаз, вследствие чего картинки на сетчатках

отличаются из-за разных углов наблюдения. Человеческий мозг как заправский компьютер анализирует разницу между этими двумя картинками и вычисляет расстояние до объектов, то есть делает изображение объемным.

Существует несколько технологий объемной визуализации: стереоскопическое видео (S3D) и многоракурсное – (M3D). В настоящее время наиболее распространены три способа трансляции S3D-каналов.

1. Передача двух каналов видео с уменьшением горизонтального разрешения. В этом случае в один кадр HD-разрешения шириной 1920 пикселей записываются два кадра, один – из левого, второй – из правого каналов. При этом разрешение каждого канала по горизонтали становится 960 пикселей. Достоинство этого формата в том, что для S3D-трансляций можно использовать существующие HD-каналы. Кроме того, при правильной подготовке исходного видеоматериала синхронизация каналов обеспечивается автоматически, а для декодирования потока на приемном конце не требуется более высоких ресурсов. Принять и вывести на 3D-телевизор такой сигнал может любая телевизионная приставка, поддерживающая HD-разрешение. Недостаток способа – в уменьшении разрешения.

2. Трансляция каналов для левого и правого глаза отдельными каналами. Такое вещание также может быть обеспечено существующей инфраструктурой цифровых HD-трансляций. Для синхронизации каналов используются специальные метки времени, присутствующие в каждом потоке. Данная схема обеспечивает полное разрешение изображения, однако для передачи и декодирования требуется удвоение ресурсов. Уменьшить количество передаваемых данных за счет межканального сжатия нет возможности. Достоинством данного подхода является то, что любой из каналов может быть просмотрен как обычный 2D-канал.

3. Еще один способ – увеличенная частота кадров. В этом случае в потоке вместо 25 кадров в секунду передается 50 кадров: 25 для левого и 25 – для правого глаза чередуются в потоке. Это накладывает дополнительные требования на синхронизацию потоков при подготовке. Такой поток требует меньшей скорости передачи за счет использования механизмов межкадровой компрессии, в том числе и между правым и левым каналами. Однако к декодерам предъявляются дополнительные требова-

ния – поддержка более сложного профиля компрессии. Такую трансляцию также нельзя посмотреть на обычном телевизоре.

Видимо, за счет сравнительной простоты в тестовых телевизионных S3D-трансляциях чаще используется первый подход.

После декодирования и перед выводом на устройство визуализации S3D-видео форматируется следующими способами:

1. Чередующее чередование.
2. Чередование по времени.
3. Чередование попиксельно в виде шахматной доски.
4. Макетирование в один кадр с уменьшением разрешения по горизонтали и вертикали.

Различные 3D-дисплеи и телевизоры обычно понимают несколько форматов. Однако для компрессии и передачи не все форматы одинаково удобны. В частности, «шахматная доска» будет компрессироваться сложнее. Поэтому форматирование сигнала рационально осуществляется уже на приемном конце, непосредственно перед выводом на телевизор.

Как же S3D TV воспроизводится? Основная задача для любого стереоизображения – показать левому и правому глазу телезрителя немного разные картинки. Обычно это достигается при помощи специальных очков. Первая конструкция очков изобретена очень давно. В них разделение картинок достигается фильтрацией спектральных составляющих изображения при помощи цветных фильтров. Обычно используются очки с красным и сине-зеленым фильтрами для разных глаз.

Среди других 3D-технологий можно отметить поляризационные очки, каждое из стекол которых пропускает только одну из поляризаций света. Понятно, что могут использоваться как вертикальная и горизонтальная поляризации, так и левая и правая круговые.

Еще одна технология основана на очках с жидкокристаллическими затворами, которые открывают попеременно то один, то другой глаз. Изображение для правого и левого глаза на экране меняется с переключением жидкокристаллических затворов. Очки и экран должны быть синхронизированы по радиоканалу.

Несмотря на широкое распространение 3D-телевизоров с очками, этот способ показа имеет существенный недостаток – необходимость на-

девать очки. Это сложно для людей, использующих очки для коррекции зрения. Однако есть 3D-дисплеи, позволяющие отобразить объемное видео без очков. Наибольшее развитие и воплощение в виде серийно выпускаемых устройств получила технология, использующая оптический линзовый растр для создания 3D-эффекта. Принцип получения 3D-эффекта с использованием лентичкулярных линз поясняется на Рис.1, где изображения от двух камер воспринимаются каждым глазом в отдельности и уже в мозгу человека формируется объемное изображение.

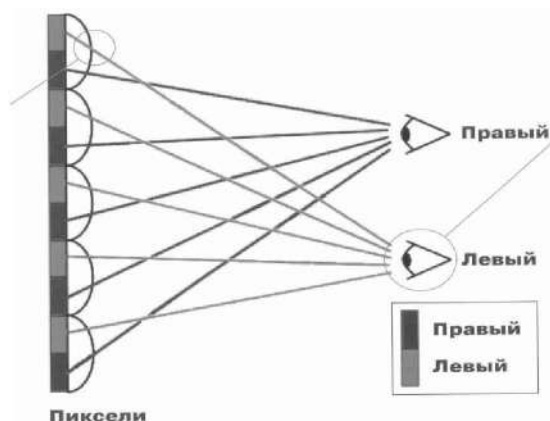


Рис. 1. Формирование объемного изображения

Однако при этом угол зрения весьма ограничен, поэтому для показа объемного изображения с использованием метода линзового растра исходное видео должно: содержать несколько каналов, снятых со смещением по горизонтали (обычно 8–9 шт.). Такой набор видеопотоков позволяет создать перед экраном большое количество зон стереовидения, находясь в которых, зритель может видеть изображение объемным без очков. Причем, у зрителя появляется возможность как бы заглянуть за объекты переднего плана и увидеть скрытые за ними элементы изображения. Видеопотоки такого рода называют multiview(M3D).

У многих известных марок (“Philips”, “Sharp” и др.) есть модели 3D-дисплеев, основанные на принципе линзового растра. Для формирования кодированного многоракурсного изображения требуется более высокое разрешение, чем для каждого из исходных кадров по отдельности: под каждую линзу должны войти элементы всех исходных кадров. Только с

появлением возможности передавать и декодировать видео высокого разрешения количества пикселей стало достаточно, чтобы увеличить качество воспроизводимого стереоэффекта.

Очевидно, что выполнить многоракурсную видеосъемку – задача непростая. Требуется либо специальная камера с большим количеством объективов, либо ряд камер и устройство, обеспечивающее синхронную съемку. Также возникает задача хранения большого количества данных – видеопотоков с каждой камеры. Даже с учетом того, что современные методы цифрового видеосжатия позволяют эффективно учитывать временную и пространственную избыточность, объем данных при многоракурсной видеосъемке возрастет многократно.

Один из эффективных способов решения проблемы большого объема данных состоит в использовании так называемого формата 2D+Z.

Любому обычному (2D) изображению можно сопоставить информацию об удаленности каждого пикселя от наблюдателя (Z-координату). Такое представление изображения называют «формат 2D+Z», а плоскость координат Z – «картой глубины». Карту можно представить в виде монохромного изображения. В карте глубины градациями серого обозначается удаленность точек изображения от наблюдателя. Формат 2D+Z является продолжением концепции представления информации об изображении по компонентам. Как известно, и в аналоговом, и в цифровом телевидении изображение формируется из яркости и двух цветовых составляющих. Добавление еще одного компонента, характеризующего «объемность» изображения, является вполне логичным развитием и хорошо согласуется с принципами совместимости.

Использование формата 2D+Z позволяет осуществить передачу стереоскопического видео с увеличением потока данных всего на 15–20%. Таким образом, удовлетворяется требование приемлемого объема данных.

Однако 2D+Z не многоракурсная серия и даже не стереопара. Чтобы показать объемное изображение, необходимо выполнить расчет серии кадров. Восстановление стереоскопического изображения происходит путем интерполяции исходного изображения с учетом карты глубины. Полученная серия кадров моделирует M3D-видео. Надо отметить, что

достоинством 2D+Z видео является то, что такой видеопоток может быть преобразован и в S3D, то есть позволяет создать универсальное решение.

Однако задача построения карты глубины (Z) требует применения сложных алгоритмов и больших вычислительных ресурсов. До недавнего времени не была решена задача генерации 2D+Z потока в реальном времени. Разработанное компанией “Triaxes Vision” программное обеспечение для сервера видеокомпрессии позволяет выполнить такой расчет.

Принципы магнитной видеозаписи

Магнитная видеозапись и последующее воспроизведение сигналов стали неотъемлемой частью технологии формирования телевизионных программ. Сигнал изображения в процессе магнитной записи преобразуется в пространственную последовательность соответствующим образом намагниченных участков рабочей среды магнитной ленты [6.1]. Под действием переменного тока, протекающего в обмотке записывающей видеоголовки, возникает магнитный поток, концентрируемый в зазоре δ и воздействующий на рабочую среду ленты (Рис.2).

Максимально возможные частоты воспроизводимого сигнала изображения определяются скоростью протяжки ленты $v_{в/л}$ и шириной зазора δ .

$$f_{\text{max}} = (2n+1) v_{в/л} / 2\delta$$

При проектировании видеомагнитофонов рабочий диапазон частот записываемых сигналов выбирают в пределах до первого минимума. Для уменьшения расхода ленты стремятся уменьшить ширину зазора.

Однако это ведет к резкому снижению эффективности головки; имеется и технологический предел уменьшения δ . Следует также учесть, что действующая ширина зазора определяется протяженностью магнитного поля, создаваемого головкой в районе рабочей среды, и она несколько превышает значения δ (см. Рис. 2).

Запись видеосигнала с помощью традиционной схемы ленточного аудиомагнитофона невозможна ввиду двух ограничений: видеосигнал имеет постоянную составляющую и при f_{max} , равном 6 МГц, с учетом

искажений, вносимых в процессе записи, скорость протяжки ленты должна быть до 10... 12 м/с. Это слишком высокая скорость для того, чтобы реализовать способ записи и воспроизведения с линейным перемещением магнитной ленты относительно головок, используемых в магнитофонах для записи и воспроизведения звука, скорость ленты в которых составляет 4,53 см/с и ниже.

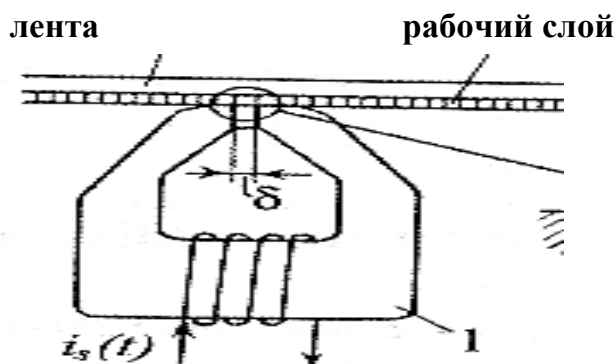


Рис. 2. Видеозапись на магнитную ленту.

Для сохранения постоянной составляющей в видеомагнитофонах используется запись частотно-модулированного сигнала.

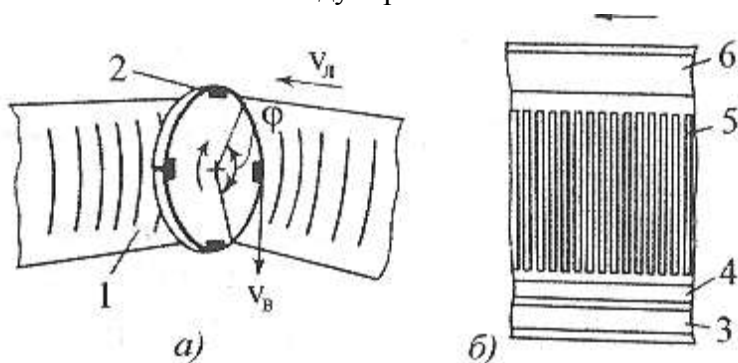


Рис. 3. Принцип поперечной видеозаписи (а) и ее формат (б):

- 1 – лента, 2 – видеоголовка, 3 – сигналы управления,
4 – режиссерская дорожка, 5 – строчки ТВ сигнала,
6 – звуковая дорожка.

Для получения требуемой относительной скорости (лента – видеоголовка) используют построчную запись (воспроизведение) вращающимися

видеоголовками. При этом они перемещаются в направлении, поперечном линейному движению ленты (Рис. 3, а). При этом скорость ленты не превышает скоростей, используемых в звукозаписи. Нетрудно представить, что в этом случае, подобно построению телевизионного раstra, на магнитном носителе формируются строчки (Рис. 3, б).

Строчки записи располагаются поперек или наклонно по отношению к направлению движения ленты. Таким образом, путем выбора соответствующего значения $v_{в/л}$ решается проблема записи/воспроизведения верхних частот сигнала изображения.

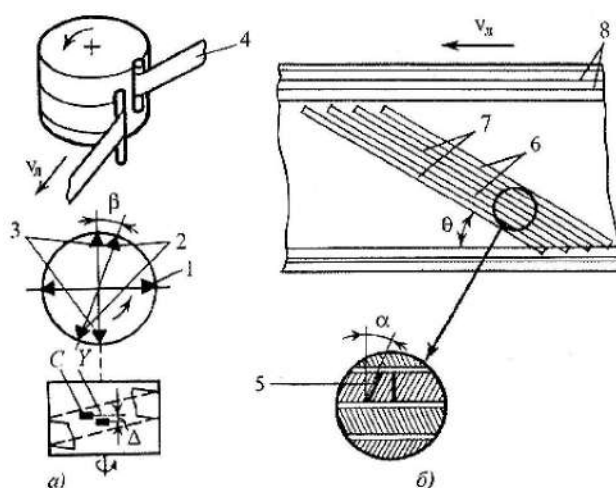
Изложенный подход был положен в основу видеозаписи черно-белого изображения: система вращающихся головок записывает частотно-модулированный видеосигнал на дорожки, проходящие от одного края ленты до другого; частота развертки дорожек при сканировании ленты равна частоте полей.

В принципе, эта же схема может использоваться для записи композитного (цветного) телевизионного сигнала. Однако проблема заключается в передаче сигналов цветности, представляющих собой модулированные по фазе сигналы поднесущей с точно заданной частотой. Любая модуляция скорости головок относительно ленты приводит к изменению частоты в сигнале цветности, снимаемом с головок, а это, в свою очередь, к большой нестабильности цвета на экране, если не использовать дорогие корректоры временных искажений.

Решением этой проблемы стал метод переноса спектра сигнала цветности, так называемый метод «цвет – ниже». В этом случае сигналы яркости и цветности разделяются, после чего сигнал цветности подвергается супергетеродинированию и переносится вниз по частоте в область, находящуюся ниже диапазона, занимаемого частотно-модулированным сигналом яркости. Именно этот «псевдокомпозиционный» сигнал и записывается на ленту.

Техника видеозаписи находится в состоянии постоянного совершенствования и обновления, однако ряд фундаментальных основ заложен в созданных устройствах и стандартизован в виде форматов записи. Формат записи – это система расположения на поверхности рабочего слоя магнитной ленты серии строчек и дорожек, сохраняющих информацию о

записанных телевизионных и других сигналах. Формат записи определяет технологию записи и считывания информации.



Лента, имеющая ширину 12,65 мм, размещается в стандартной кассете, а при прохождении через блок видеоголовок принимает форму Ω -петли со смещением вдоль оси вращения примерно на ширину ленты. Так как видеоголовки вращаются в горизонтальной плоскости, строчки на ленте распола-

гаются наклонно (в формате L “Beta” $\Theta = 4,6841^\circ$). На каждой строчке записывается сигнал изображения, соответствующий одному полю, причем сигналы яркости и цветности записываются разными видеоголовками.

За один оборот диска записывается полный кадр (два поля), так как используются две видеоголовки Y и две C. Для уменьшения проникновения сигналов из канала в канал рабочие зазоры видеоголовок яркости и цветности развернуты на угол $\alpha = 15^\circ$ (Рис. 4,б).

Рассмотрим некоторые характеристики распространенного формата VHS. В таких видеомэгнитофонах используется лента шириной 12,65 мм в стандартной кассете, обеспечивающая трехчасовую запись. Сигнал изображения записывается двумя видеоголовками, расположенными в одной плоскости под углом 180° надиске диаметром 62 мм. Частота вращения диска с видеоголовками – 1500 об/мин. Каждая видеоголовка записывает одно поле изображения; следовательно, за один оборот диска записывается полный телевизионный кадр.

В видеомэгнитофонах формата Betamax используют ленту шириной 12,65 мм. Сигнал изображения записывают двумя видеоголовками. Диаметр диска 74,48 мм, что при частоте вращения 1500 об/мин приводит к возможности расширения полосы частот яркостного канала до 5,2 МГц вместо 4,3 МГц в VHS.

Стремление к сокращению расхода ленты привело к созданию «двухдорожечных» форматов. К ним относится формат V 2000.

Оптическая видеозапись

Развитие оптических дисковых устройств записи и воспроизведения изображений стимулируется рядом их достоинств по сравнению с аналогичными устройствами магнитной записи. К числу их можно отнести более высокую плотность записи, бесконтактный способ считывания, простой доступ к фрагментам записи, простые способы реализации режимов ускоренного и замедленного (до стоп-кадра) воспроизведения изображения, простоту тиражирования и др. Оптическая видеозапись, по сравнению с магнитной, позволяет получить лучшее качество воспроизводимого изображения и звука. Рассмотрим основные особенности оптической видеозаписи.

На оптическом диске информация записывается по спиральной траектории. Оптическая запись и считывание реализованы на базе эффектов, изменяющих состояние падающего света при отражении. Оптическая считывающая головка преобразует отраженный световой пучок в сигнал изображения. Преимущественное использование модуляции отраженного, а не поглощенного пучка вызвано рядом причин, не последнее место среди которых занимает удобство конструкции считывающего устройства; в этом случае оно располагается с одной стороны диска, в оптико-механической защите односторонних дисков нуждается только одна сторона диска, достаточно просто реализуются автоматические фокусировка и слежение за дорожкой в процессе считывания.

Модуляция отраженного пучка света может быть вызвана изменением коэффициента отражения, состояния поляризации или фазы в процессе его взаимодействия с оптическим диском. Модуляцию фазы можно осуществить за счет формирования микрорельефа в материале диска и изменения за этот счет оптической длины пути при распространении света до отражающей поверхности и обратно. В процессе воспроизведения излучение полупроводникового лазера фокусируется при помощи микрообъектива на поверхность, несущую информацию (Рис. 5).

Изменение оптической длины пути осуществляется за счет формирования в процессе записи микроуглублений – питов (продолговатых углублений на поверхности диска), количество и длина которых могут нести информацию о записанных сигналах. Для формирования максимального контраста между лучами 1 и 2 необходимо, чтобы $\Delta\varphi = \pi$. Формирование сигнала на выходе детектора при вращении диска происходит в рассматриваемом случае за счет изменения оптического сигнала на его входе при прохождении границ участков спирали свободных или занятых питами. Сигнал на выходе детектора имеет импульсный характер.

В процессе изготовления диска-оригинала используют стеклянный диск, покрытый тонким слоем фоторезиста. Рельеф на поверхности формируют в два этапа: при экспонировании, сфокусированным лазерным пучком, интенсивность которого модулируется записываемым телевизионным сигналом и при обработке экспонированного диска с помощью кислотного растворителя, который растворяет фоторезист на экспониро-

ванных участках, образуя рельефную структуру. Технология изготовления диска-оригинала весьма сложна и базируется на высоких требованиях к идентичности толщины фоторезиста, диска, параметрам устройства экспонирования и обработки диска, устройству развертки и др.

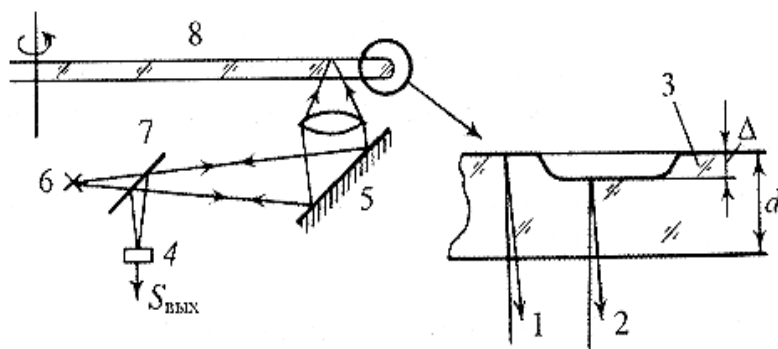


Рис. 5. Принцип оптической записи.

1, 2 – лучи, 3 – алюминиевое покрытие, 4 – детектор, 5 – зеркало, 6 – лазер, 7 – полупрозрачное зеркало, 8 – диск.

При тиражировании на посеребренной поверхности диска-оригинала гальваническим методом наращивается слой никеля – формируется копия, включающая «негатив» поверхностной структуры диска-оригинала, называемая «никелевым оригиналом». Последний используют для тиражирования методом гальванопластики или другими способами. Изготовление рабочего оптического диска завершается нанесением металлического зеркального слоя (алюминий или серебро) и защитного слоя. Два диска склеиваются и образуют герметичный двусторонний видеодиск.

Считывание записанной видеоинформации осуществляется путем регистрации детектором (Рис. 5) отраженного светового потока, фокусируемого с помощью микрообъектива, используемого для фокусировки первичного пучка и направляемого на детектор полупрозрачным зеркалом. Вся рассмотренная оптическая система находится в головке считывания видеопроектирующего устройства.

Для записи/воспроизведения сигналов звукового сопровождения в видеодисковых системах применяют широтно-импульсную модуляцию путем изменения протяженности пиков. Таким образом, расстояние между центрами пиков модулируется телевизионным сигналом, а протяжен-

ность пита – сигналом звукового сопровождения. Детектор излучения видеопроектировщика, наряду с сигналами изображения и звукового сопровождения, выделяет сигналы ошибки радиального слежения за дорожкой и ошибки фокусировки. Эти сигналы используются для управления автоматическими устройствами радиального слежения и фокусировкой микрообъектива.

Новый импульс в развитии устройств оптической записи/воспроизведения связан с созданием цифровых универсальных дисков – DVD. Диски бывают односторонними и двухсторонними; на каждой стороне диска может быть один или два рабочих слоя.

Однослойный односторонний диск представляет собой две склеенные между собой подложки. Одна изготовлена из прозрачного материала и содержит информационный слой, металлизированный пленкой алюминия толщиной около 0,05 мкм. Другая изготовлена из непрозрачной пластмассы. Она обеспечивает необходимую жесткость диска.

Двухсторонний однослойный диск включает две подложки, содержащие информационные слои.

Односторонний двухслойный диск, как и двухсторонний однослойный, имеет информационный слой в каждой подложке, но запись и считывание производятся с одной стороны. Один из информационных слоев (внутренний) металлизирован отражающим материалом, другой (внешний) – изготовлен из полупрозрачного материала. Считывание производится световым пучком, сфокусированным на один (отражающий) или другой (полупрозрачный) слой. После считывания информации с внутреннего слоя лазерный пучок автоматически изменяет фокусировку и считывает информацию с внешнего слоя. Для устранения помех, возникающих при переключении, используют буфер памяти. С целью уменьшения влияния помех, возникающих при считывании, в глубинном слое увеличивают рабочие размеры питов. Естественно, это приводит к уменьшению суммарной емкости глубинного слоя.

Наибольшей емкостью обладает двухсторонний двухслойный диск. Каждая из его подложек содержит два информационных слоя: полупрозрачный и отражающий. Такое усложнение структуры дисков производится с целью увеличения их емкости.

При записи видеопрограмм используют способы сжатия сигналов изображения и звука, в том числе предусмотренные стандартом MPEG-2.

DVD делятся на два типа: диски, предназначенные для однократной записи данных – DVD-R и допускающие многократную перезапись – DVD-RW (ReWriteable). Принципы записи цифровых данных на эти диски основаны на использовании материалов, способных однократно или многократно изменять свою структуру, переходя при воздействии лазерного излучения определенной мощности из кристаллического состояния в аморфное. При этом изменяются оптические свойства отражающей поверхности: при отражении от участка диска с аморфной или кристаллической структурой наблюдается изменение фазы отраженного светового потока, которое фиксируется детектором излучения. Существует ряд новых технологий записи/считывания, в том числе ориентированных на создание устройств хранения видеоинформации в формате HDTV. Одно из направлений связано с использованием лазеров с более короткой длиной волны Blu-Ray (синий лазер). Напомним, что для CD и DVD применяется лазер, работающий в красном диапазоне длин волн. Чтобы поместить на DVD как можно больше данных, был уменьшен физический размер питов, обеспечивающих запись информации в цифровом виде. А для повышения точности считывания (и уменьшения размеров питов) нужно уменьшить длину волны лазера, что и было сделано. Ее величина изменилась с 650 до 405 нм.

Физические же размеры носителя не изменились – это 12-см диск.

В формате HD TV на один слой записываются 15 Гбайт информации, на два – 30, а Blu-Ray хранит 25 (двухчасовой видеофильм в формате HDTV или 13 часов в обычном вещательном формате) и 50 Гбайт, соответственно.

Преимущества формата HDTV перед Blu-Ray очевидны – он основан на спецификации DVD и совместим с форматами CD и DVD.

Планируется, что Blu-Ray будет поддерживать язык Java. Это позволит не только создать более динамическое меню, чем обеспечивает HDTV, но и внести интерактивность. В настоящее время эти диски несовместимы.

Жесткие диски

Внедрение компьютеров во все сферы современной жизни настолько очевидно, что не требует никаких объяснений. Одним из следствий

этого является постепенное смещение цифровых технологий бытовой аудио- и видеозаписи в сторону использования аналогичных компьютерным жестких дисков. Такие диски проигрываются либо на тех же компьютерах с дисковой операционной системой, либо на специальных записывающих устройствах, использующих дисковые технологии.

Технологию использования жестких дисков – винчестеров можно рассматривать как комбинацию ленточной и дисковой технологий. Во многих смыслах она сочетает преимущества обоих подходов, объединяя их вместе в недорогом и надежном устройстве. Запись в таком дисковом ведется на ряд круговых дорожек (треков), подобно записи на CD или на аналоговые грампластинки. Но, в отличие от грампластинок, запись ведется не в форме волнистых дорожек и не так как на CD – в форме последовательности выпуклостей, а в форме последовательностей определенных структур намагничивания поверхности. Это означает, что записывающая и воспроизводящая головка должны быть расположены на некотором поворотном рычаге, который давал бы возможность передвигать головку над поверхностью цилиндра.

При этом необходимо наличие системы сервоуправления, которая бы с большой точностью могла удерживать блок с записывающей/воспроизводящей головкой над заданной дорожкой. Это означает необходимость установки дисковой операционной системы, обеспечивающей форматирование диска, т.е. разметку дорожек на нем перед началом работы и ведением каких-либо записей. Аналогично записи на грампластинку ведется запись на магнитный диск на обе стороны. При выполнении процедуры форматирования соответствующие параметры форматирования записываются непосредственно на формируемый диск, чтобы система сама имела возможность находить дорожки для записи новых данных. Основная часть процесса – разбиение диска на последовательность концентрических круговых дорожек. Следует иметь в виду, что дорожки на магнитном диске не спиральные, как на CD, а круговые. Дорожки разделяются на части, которые называются «секторами».

Сам диск, т.е. магнитный носитель, размещаемый внутри дискового, имеет форму жесткой пластины. Несколько таких пластин, собранные в

один пакет, вращаются на общем шпинделе, при этом все головки, собранные в один блок, синхронно перемещаются относительно пластин (Рис. 6).

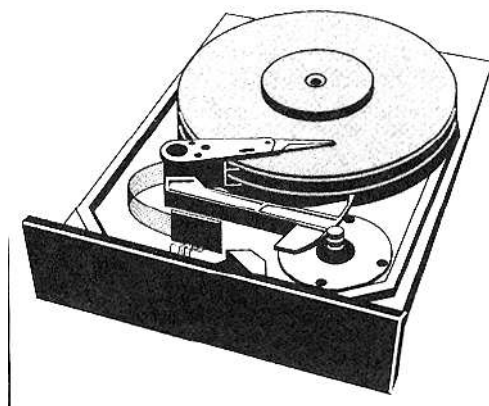


Рис. 6. Конструкция дисковод.

Технология записи/считывания при использовании жесткого диска аналогична знакомой с более ранних времен технологии записи/считывания с дискет. Но есть и существенные различия. Винчестер изготавливается с гораздо более жесткими допусками и вращается раз в десять быстрее. Головки не касаются поверхности диска, а «плавают» над ней, отделенные воздушной подушкой микроскопической толщины. Если даже частица сигаретного дыма попадет между головкой и диском, то головка будет повреждена, а данные будут потеряны. По этой причине дисководы жестких дисков выполняются в виде герметически закрытых устройств.

RAID – сокращение, обозначающее «избыточный массив независимых дисков». В технологиях RAID для хранения и воспроизведения данных используется массив из нескольких совместно работающих жестких дисков. Массив RAID дисков всегда имеет встроенный контроллер, внутри которого спрятана вся «кухня» поддержки работы массива. Благодаря этому компьютер всегда будет «думать», что обращается к обычному дисководу.

Для чего используется технология RAID?

Во-первых, для скорости. Диски, работающие совместно, обеспечивают большую скорость записи/считывания, чем один диск.

Во-вторых, для надежности. Имея в распоряжении только один диск, вы не можете застраховать себя от его разрушения. Каждый, кто хоть раз испытал это на себе, прекрасно знает весь этот кошмар – все эти попытки установки нового диска, переустановки операционной системы и восстановления всех файлов из резервных копий, хранящихся на ленте. При наличии же массива дисков Вы получите систему с резервированием, которая будет продолжать работать даже при полном отказе одного из дисков. Более того, контроллеры RAID-массивов достаточно интеллектуальны для того, чтобы в случае отказа одного из дисков и замены его «свежим», выстроить архитектуру массива заново.

Указанные выше две причины использования RAID-массивов в некоторой степени противоречат друг другу. Поэтому под общим названием RAID объединяется несколько различных схем, для каждой из которых проблема компромисса между скоростью и надежностью решается по-своему.

Медиа – сервер

Посмотрим теперь на телевизионную студию новостей. Несколько лет назад любая такая студия была похожа на улей или муравейник. Со всех сторон пронеслась масса народу: операторы с кассетами – на монтаж, обратно с монтажа, на выдачу в эфир, журналисты с дискетами с огромным числом текстов, дизайнеры канала тоже с дискетами, но уже не с текстами, а с логотипами, картами и прочей графикой. Все в движении, все несут в охапке свой «кусочек» информации. Можно рассматривать такую систему как широкополосную сеть типа «доставки ногами». Теперь вообразите, что вся эта информация – не только тексты, но и изображения, звук, логотипы и графика, расписания, эфирные листы, в общем, все – хранится в одном центре. Более того, представьте себе, что каждый имеет доступ к этому хранилищу: журналист может проверить карту, оператор графики проверить орфографию надписей. И, наконец, режиссер, не сходя с места, наблюдает и контролирует весь этот поток, выбирает, к какому входному каналу лучше всего подключиться, и загружает его в систему автоматического выхода в эфир. Все это и делает медиа-сервер.

Медиа-сервер должен отвечать двум основным критериям: способности хранить большие массивы информации и обеспечивать превосходные сетевые соединения. Нормальный медиа-сервер способен принимать одновременно несколько видеоканалов с полным разрешением или сотни каналов сжатого видео. Он также должен поддерживать многочисленные сетевые протоколы.

Виртуальные студии

Одним из наиболее впечатляющих применений технологий виртуальной реальности в вещательном телевидении стало построение так называемых «виртуальных студий» или «виртуальных декораций». Виртуальные студии являются дальнейшим развитием метода цветовой рипроекции (хромакея), при использовании которого объект снимается на фоне плоской или вогнутой, частично охватывающей сцену поверхности определенного цвета, а после этого с помощью разделения цветов изображение объекта накладывается на другое телевизионное изображение, создавая тем самым впечатление, что ведущий находится где-то за пределами студии. При построении виртуальной студии такая технология идет еще дальше. В этом случае на телевизионные камеры устанавливаются специальные датчики движения, сигналы с которых подаются на высокопроизводительный компьютер, запрограммированный на моделирование и скоростной рендеринг трехмерного искусственного окружения (3Dа.е.). Таким образом, ведущий может двигаться «внутри» этого виртуального окружения параллельно с действиями оператора, который, в свою очередь, может менять фокусное расстояние, двигаться с камерой вперед/назад или вбок. На экране же при этом зритель увидит полностью согласованные между собой пространственные трансформации как в изображении ведущего (вследствие автоматического воспроизведения пространственных соотношений реального мира при съемке), так и в изображении искусственной окружающей обстановки (главным образом благодаря очень высокой скорости просчета трансформаций изображения при смене параметров виртуальной оптической проекции). Потенциальная экономия от такой технологии очевидна, особенно при создании телевизионных художественных постановок.

7. ФОРМИРОВАНИЕ ТЕЛЕСИГНАЛОВ ДЛЯ ПОДАЧИ В КАНАЛ СВЯЗИ

7.1. СИСТЕМЫ АНАЛОГОВОГО ЦВЕТНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Характеристики каналов для передачи сигналов изображения определяются назначением рассматриваемой ТВС. В числе многочисленных видеосистем центральное место занимают системы вещательного телевидения [7.1.1.].

Сети телевизионного вещания обеспечивают передачу сигналов изображения, звукового сопровождения и вспомогательных сигналов для телевизионных приемников. Они включают в себя источники сигналов изображения, каналы связи и индивидуальные телевизионные приемники. Системы связи используют радиоканалы, волоконно-оптические и проводные линии связи. При проектировании таких сетей основной задачей является согласование и стандартизация параметров сигналов изображения и характеристик каналов связи.

Рассмотрим основные характеристики сигналов и каналов связи, используемые в вещательных ТВС.

Для передачи телевизионного сигнала используют метровый и дециметровый диапазоны волн и амплитудную модуляцию несущей частоты, что приводит к образованию двух боковых частотных полос. Если спектр сигнала изображения принять равным f_{\max} , то после амплитудной модуляции полоса частот радиосигнала будет в два раза шире. Как правило, передача такого сигнала осуществляется с частичным подавлением одной боковой полосы.

Частотные характеристики телевизионного канала связи для стандартной системы с $f_{\max} = 6$ МГц приведены на Рис. 1, а. Низкочастотные

составляющие телевизионного сигнала передаются обеими полосами а–b (Рис. 1, а), высокочастотные – одной верхней боковой полосой b-с, что приводит к известным (квадратурным) искажениям сигнала, влияние которых на качество воспроизведения мелких деталей изображения незначительно.

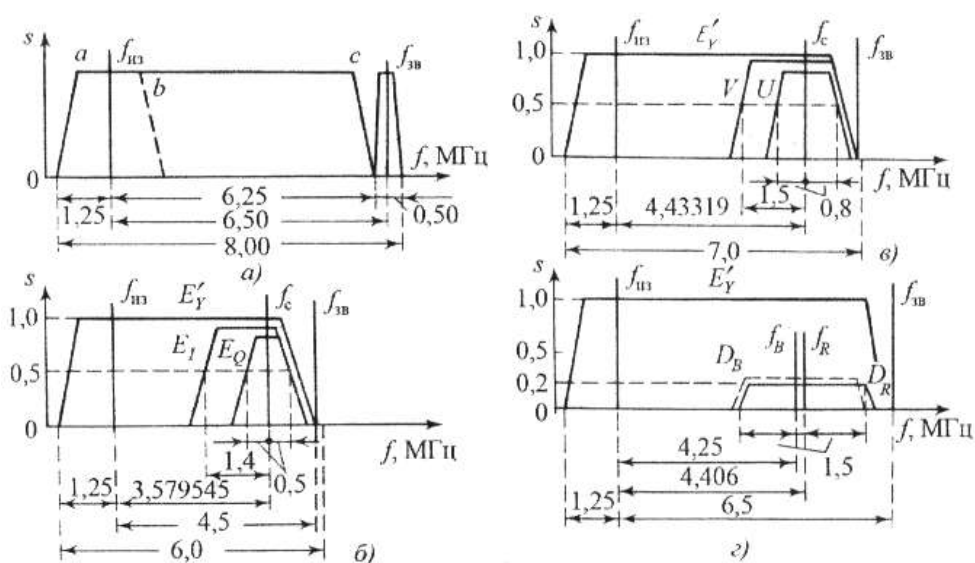


Рис. 1. Частотные характеристики телевизионного радиоканала (а) и спектры телевизионного сигнала систем NTSC (б), PAL (в), SECAM (г).

Для передачи сигнала звукового сопровождения используют несущую звука $f_{зв}$, причем разнос несущих частот изображения и звука в рассматриваемом примере составляет 6,5 МГц. В канале звукового сопровождения используют частотную модуляцию несущей частоты, что обеспечивает высокое качество звукового сопровождения, а также общую ширину полосы стандартного канала системы вещательного телевидения 8 МГц.

Для передачи сигнала изображения в подавляющем большинстве стандартов используют негативную модуляцию, т.е. наибольшей излучаемой мощности сигнала соответствуют уровни черного сигнала изображения, гасящих и синхронизирующих сигналов. Полоса частот, предназначенная для передачи одной телевизионной программы, называется «ра-

диоканалом». Основные сведения о частотном распределении радиоканалов приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Частотное распределение радиоканалов.

Диапазон	Частота, МГц	Число радиоканалов	Номера радиоканалов
Метровый			
I	48,5...66,0	2	1,2
II	76,0...100,0	3	3...5
III	174,0...230,0	6	6...12
Дециметровый			
IV	470,0...582,0	14	21...34
V	582,0...790	25	35...60

Яркостный и цветоразностные сигналы

В системах цветного телевидения должны быть сформированы сигналы изображения, обеспечивающие их передачу по стандартному радиоканалу, а также прием для воспроизведения неискаженного изображения не только цветными, но и черно-белыми телевизорами. Поэтому при выборе параметров системы цветного телевидения необходимо исходить из действующего в стране стандарта на систему черно-белого телевидения, чтобы обеспечить выполнение требования совместимости цветного телевидения с черно-белым.

В Европе действуют три основных стандарта на черно-белое телевидение с разверткой на 625 строк при 50 полях (25 кадрах) в секунду – это стандарт I, стандарты B, C,G и H, стандарты L,D и K. В Табл. 2 приведены основные данные этих стандартов, существенные при выборе стандарта на систему цветного телевидения [7.1.2.].

Различия между стандартами B, C,G и H незначительны с этой точки зрения, так же, как и различия между стандартами L,D и K. Стандарты B и C действуют только в I, II, III диапазонах частот.

В Армении в метровом диапазоне действует стандарт D, дециметровом – K. В большинстве стран Западной Европы – стандарты В и G.

Таблица 2.

Стандарты аналогового цветного телевидения.

Параметр	Стандарт		
	I	B, C, G, H	L, D, K
Число строк развертки	625	625	625
Число полей в 1 с	50	50	50
Число кадров в 1 с	25	25	25
Чересстрочность	2:1	2:1	2:1
Частота строк, Гц	$15\,625 \pm 0,001\%$	$15\,625 \pm 0,1\%$	D и K — $15\,625 \pm 3\text{ Гц}$ L — $15\,625 \pm 0,1\%$
Частота полей, Гц	$50 \pm 0,001\%$	50	50
Частота кадров, Гц	$25 \pm 0,001\%$	25	25
Полоса частот видеосигнала, МГц	5,5	5	6
Полоса частот радиоканала, МГц	8	8	8
Ширина передаваемой нижней боковой полосы сигналов изображения, МГц	1,25	0,75 — B, C, G 1,25 — H	0,75 — D, K 1,25 — L
Разность несущих частот изображения и звука ($f_{из} > f_{из}$), МГц	6 ($\pm 1000\text{ Гц}$)	5,5	6,5
Полярность модуляции радиопередатчика изображения	Негатив	B, G, H — негатив	L — позитив
Метод модуляции радиопередатчика звукового сопровождения	ЧМ	C — позитив B, G, H = ЧМ C = AM	D, K — негатив L = AM D, K = ЧМ
Максимальная девиация частоты радиопередатчика звукового сопровождения, кГц	± 50	B, G, H — ± 50	D, K — ± 50

Для передачи цветного телевидения формируют яркостный сигнал E'_Y и два цветоразностных: E'_{R-Y} и E'_{B-Y} [7.1.1.]. Эти сигналы образуют из γ -корректированных сигналов основных цветов E'_R, E'_G, E'_B . Как было отмечено выше, расчет передающей камеры производится с учетом того, что выбранные светотехнические характеристики (цветоделительная система, спектральные характеристики преобразователей изображений и др.), а также коэффициенты усиления соответствующих каналов при передаче белых участков изображения обеспечивали равные выходные сигналы E'_R, E'_G, E'_B , поскольку при расчете устройства воспроизведения

цветного изображения учитывают необходимость получения белого цвета при подаче равных сигналов E'_R , E'_G , E'_B . Выбор равносигнального белого цвета связан с тем, что в приемниках цветного телевидения при приеме сигналов черно-белой программы возбуждение трех люминофоров осуществляется тремя равными сигналами, что обеспечивает формирование на экране цветного телевизора черно-белого изображения.

Таким образом, яркостный сигнал E'_Y формируется суммированием E'_R , E'_G , E'_B , взятых с весовыми коэффициентами I_R, I_G, I_B , определяемыми относительным содержанием в яркостном сигнале сигналов основных цветов:

$$E'_Y = I_R E'_R + I_G E'_G + I_B E'_B,$$

Сигнал яркости в системах цветного телевидения формируется в соответствии с формулой

$$E'_Y = 0.3 E'_R + 0.59 E'_G + 0.11 E'_B.$$

Использование яркостного сигнала в соответствии с данной формулой для формирования черно-белого изображения позволяет получить изображение с удовлетворительным воспроизведением градаций яркости участков передаваемой сцены различной цветности.

Как видно из формулы, для воспроизведения цветного изображения, при передаче по каналу связи, кроме сигнала E'_Y , достаточно дополнительно передать два из трех скорректированных сигнала, например E'_R и E'_B , восстановив третий сигнал в приемнике. Такой способ передачи обладает определенной избыточностью, так как в сигналах E'_R и E'_B , наряду с информацией о цветности, заключена информация и о яркости. Поэтому в современных системах цветного телевидения по каналу связи вместо данных сигналов передаются цветоразностные $E'_{R-Y} = E'_R - E'_Y$ и $E'_{B-Y} = E'_B - E'_Y$. При этом:

$$E'_{R-Y} = 0.70 E'_R - 0.59 E'_G - 0.11 E'_B.$$

$$E'_{B-Y} = 0.89 E'_B - 0.30 E'_R - 0.59 E'_G.$$

Как следует из приведенных соотношений, в приемнике можно восстановить сигнал

$$E'_{G-Y} = -0.51 E'_{R-Y} - 0.19 E'_{B-Y}$$

Особенностью цветоразностных сигналов является то, что они не несут информации о яркости. При передаче участков белого или серого ($E'_R = E'_G = E'_B$) цветоразностные сигналы равны нулю.

Формирование яркостного, цветоразностных сигналов и восстановление сигналов основных цветов производят с помощью резистивных делителей в соответствии с соответствующими весовыми коэффициентами.

В телевизионном приемнике сигналы основных цветов могут быть восстановлены непосредственно в электронном прожекторе цветного кинескопа.

Как уже отмечалось, спектр частот цветоразностных сигналов может быть выбран меньшим по сравнению со спектром яркостного сигнала. Спектр частот цветоразностных сигналов может быть ограничен без заметного ухудшения качества цветного изображения: в стандартной системе 625/50/2:1 – до 1,5-2,0 МГц. Однако, даже если в упомянутой системе 625/50/2:1 спектры сигналов ограничить значениями $f_{Y\max} = 6$ МГц, $f_{(R-Y)\max} = 1,5$ МГц, $f_{(B-Y)\max} = 0,5$ МГц, потребуются дополнительные меры для передачи этих сигналов по стандартному радиоканалу с полосой 8 МГц. В наиболее используемых в настоящее время системах вещательного телевидения NTSC, PAL и SECAM по-разному решают задачу уплотнения телевизионного спектра.

Системы цветного телевидения с частотным уплотнением спектра.

Передача в стандартном радиоканале яркостного и цветоразностных сигналов основана на использовании линейчатости структуры спектра телевизионного сигнала. Поскольку составляющие спектра сигнала являются гармониками частот горизонтальной mf_x и вертикальной nf_y разверток, в промежутках между гармониками яркостного сигнала можно разместить гармоники цветоразностных сигналов. Для того чтобы составляющие цветоразностных сигналов, например, E'_{R-Y} соответствовали середине интервалов гармоник яркостного сигнала, необходимо, чтобы частота цветовой поднесущей $f_{C(R-Y)}$ была бы нечетной гармоникой половины строчной частоты:

$$f_{C(R-Y)} = [m+(m+1)] f_X/2 = (2m+1) f_X/2$$

Такой сигнал может быть принят черно-белым приемником. Цветоразностные сигналы, находящиеся в спектре яркостного сигнала, практически не влияют на качество черно-белого изображения.

Система цветного телевидения NTSC (National Television System Committee)

Такая система основана на использовании одной поднесущей для передачи цветоразностных сигналов. В ней применяют квадратурную модуляцию – сигналы E'_{R-Y} и E'_{B-Y} , имеющие сокращенную полосу частот по сравнению с сигналом E'_Y , модулируют поднесущие с частотой f_C , сдвинутые по фазе на угол $\varphi = \pi/2$ (рис. 2. а).

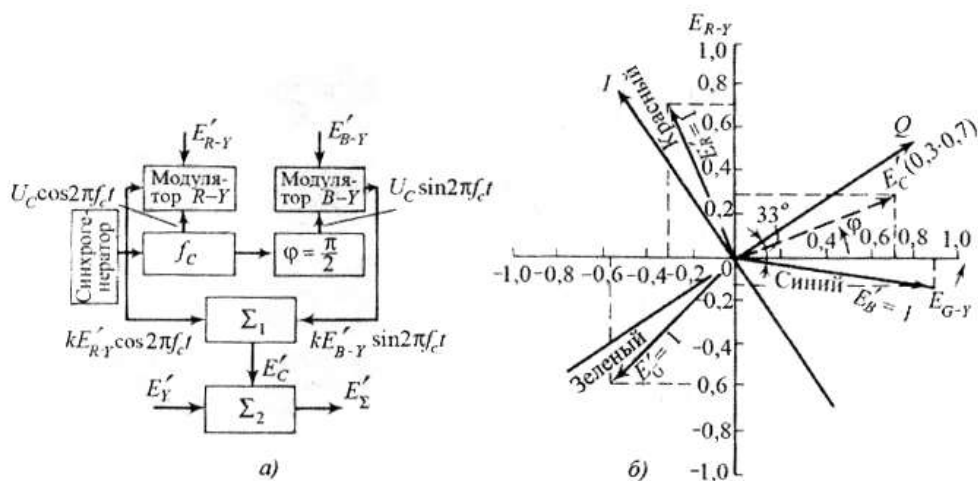


Рис. 2. Система цветного телевидения NTSC.

На выходе сумматора имеем:

$$E'_C = E'_{R-Y} \cos 2\pi f_C t + E'_{B-Y} \sin 2\pi f_C t$$

Сигнал E'_C может быть представлен в векторной форме (Рис. 2, б).

Его модуль $|E'_C| = \sqrt{(E'_{R-Y})^2 + (E'_{B-Y})^2}$, угол $\varphi = \arctg[(E'_{R-Y})/(E'_{B-Y})]$.

В соответствии с изменением цвета передаваемого участка изображения изменяются значения цветоразностных сигналов, что приводит к изменению E'_C . Изменение отношения сигналов E'_{R-Y} и E'_{B-Y} , как видно из выражения, приводит к изменению направления вектора. Изменение же этих сигналов при сохранении их соотношения приводит к изменению амплитуды сигнала, т.е. модуля E'_C .

Найдем положение некоторых характерных сигналов на векторной диаграмме. При $E'_{R-Y} = E'_{B-Y} = 0$, $E'_C = 0$ – эта точка (начало координат векторной диаграммы) в зависимости от амплитуды яркостного сигнала соответствует белому цвету, серому или черному. На рисунке представлены также вектора, соответствующие красному, зеленому и синему цветам. Таким образом, направление вектора $E'_C(\phi)$ определяется цветовым тоном передаваемого участка изображения, его модуль – насыщенностью цвета. Полученная векторная диаграмма является вариантом диаграммы цветности.

Для того чтобы частота поднесущей была нечетной гармоникой половины строчной частоты, предусмотрена связь генератора с синхрогенератором.

Далее сформированный сигнал E'_C суммируют с яркостным E'_Y , включающим сигналы синхронизации, гашения и др.

Для выделения из полного видеосигнала сигналов цветности в телевизионных приемниках рассматриваемой системы используют синхронное детектирование. Видеосигнал с выхода видеодетектора телевизионного приемника подвергается фильтрации для подавления низкочастотных составляющих, лежащих вне спектра цветоразностных сигналов. Этим уменьшается проникновение значительной (низкочастотной) части сигнала яркости в канал цветности.

Далее сигнал E'_C подается на входы синхронных детекторов (Рис. 3).

На второй их вход подается сигнал от местного генератора. При этом на выходе синхронного детектора образуется сигнал, являющийся произведением входных сигналов:

$$\begin{aligned} E''_{R-Y} &= U_C E'_{R-Y} \cos 2\pi f_C t \cos 2\pi f_C t + U_C E'_{B-Y} \sin 2\pi f_C t \cos 2\pi f_C t = \\ &= E'_{R-Y} + E'_{R-Y} \cos 4\pi f_C t + E'_{B-Y} \sin 4\pi f_C t, \end{aligned}$$

где постоянные множители перед слагаемыми приняты равными 1.

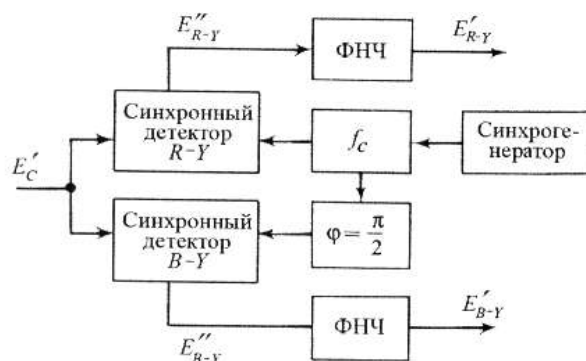


Рис. 3. Схема синхронного детектора.

Второе и третье слагаемые – высокочастотные составляющие, подаваемые фильтром низких частот (ФНЧ), первое слагаемое является цветоразностным сигналом E'_{R-Y} . Цветоразностный сигнал E'_{B-Y} формируется аналогично. Непременным условием неискаженного формирования цветоразностных сигналов является равенство частот и фаз колебаний генераторов синхронного детектора приемника и балансного модулятора. Для фазирования генераторов приемных устройств в полный телевизионный сигнал во время обратного хода по строкам добавляют высокочастотный сигнал цветовой синхронизации, частота и фаза которого равны частоте и фазе поднесущей балансного модулятора передающей стороны, а размах составляет 0,9 от амплитуды синхросигнала. В телевизионном приемнике резонансным усилителем этот сигнал выделяется и используется для управления генератором частоты цветовой поднесущей $f_C = 3.57954$ МГц.

При необходимости для управления электронными прожекторами цветного кинескопа или модуляторами плазменной панели могут быть получены сигналы E'_R , E'_G , E'_B . Сигнал яркости E'_Y выделяется при помощи полосового фильтра. Для наилучшего использования свойств цветового зрения в системе NTSC вместо цветоразностных сигналов используют E'_I и E'_Q , оси которых по векторной диаграмме (см. Рис. 2,б) повернуты на 33° .

Цветоразностные сигналы, как было отмечено выше, могут передаваться в сокращенной полосе частот. С учетом рассмотренных ранее особенностей восприятия мелких деталей цветного изображения удается

ограничиться полосами частот цветоразностных сигналов $E'_I - 1,5$ МГц, $E'_Q - 0,5$ МГц. Таким образом, крупные детали, которым соответствуют в сигнале частоты до 0,5 МГц, передаются тремя составляющими, более мелкие – до 1,5 МГц, – двумя, мелкие детали, которым соответствуют сигналы свыше 1,5 МГц – только яркостной составляющей (черно-белыми). Спектр полного сигнала этой системы приведен на Рис. 1,б.

Учитывая, что каждому цветовому тону соответствует определенный фазовый угол φ , изменение его в тракте передачи сигнала может привести к цветовым искажениям. Следовательно, фазовая характеристика тракта передачи должна быть линейной. Экспериментально установлено, что допустимые изменения фазового угла, при которых не происходит заметных изменений цветового тона, не превышают 5° .

Систему NTSC используют радиовещательные компании США, Японии и других стран.

Система цветного телевидения PAL (Phase Alternation line)

Эта система отличается от NTSC отсутствием влияния фазовых искажений на качество цветопередачи. Для этого используют квадратурную модуляцию с изменением фазы поднесущей от строки к строке для одного из цветоразностных сигналов. При этом

$$E'_C = H(t) V \cos 2\pi f_C t + U \sin 2\pi f_C t ,$$

где $H(t)$ – функция коммутации, изменяющая свой знак от строки к строке.

Выражение для E'_C можно представить и в комплексной форме:

$$E'_C = U + jV$$

В соответствии с этим, векторные диаграммы сигналов цветности в двух смежных строках E'_{Ci} и $E'_{C(i+1)}$ имеют вид, представленный на Рис. 4 пунктиром.

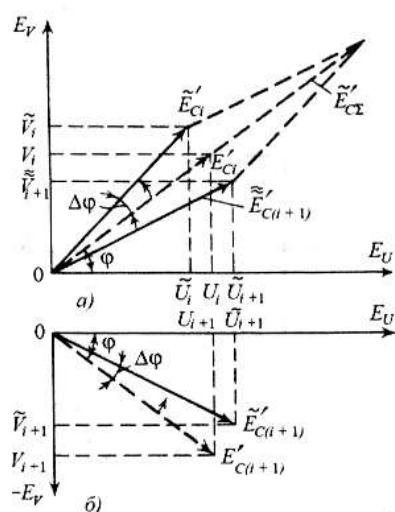


Рис. 4. Диаграмма формирования сигналов системы цветного телевидения PAL.

Для пояснения отсутствия влияния фазовых искажений на качество цветопередачи рассмотрим принцип обработки сигналов в кодере и декодере системы PAL (Рис. 5).

Если в тракте передачи сигнала происходит сдвиг квадратурно-модулированного сигнала E'_C относительно исходного сигнала на угол $\Delta\varphi$, то в приемном устройстве соседних строк последовательно будут зафиксированы сигналы \tilde{E}'_{Ci} и $\tilde{E}'_{C(i+1)}$, указанные на Рис. 4. Для последующей обработки сигналов цветности в приемнике необходимо, чтобы сигналы двух смежных строк существовали одновременно. Для этого используют запоминающее устройство на время передачи одной строки T_x (Рис. 5,б). Такое устройство памяти может быть реализовано на дискретных элементах памяти, например, линейке ПЗС или ультразвуковой линии задержки. Сигналы двух смежных строк в приемнике можно представить как:

$$\begin{aligned}\tilde{E}_{Ci} &= \tilde{U}_i + j\tilde{V}_i, \\ \tilde{E}_{C(i+1)} &= \tilde{U}_{i+1} + j\tilde{V}_{i+1}.\end{aligned}$$

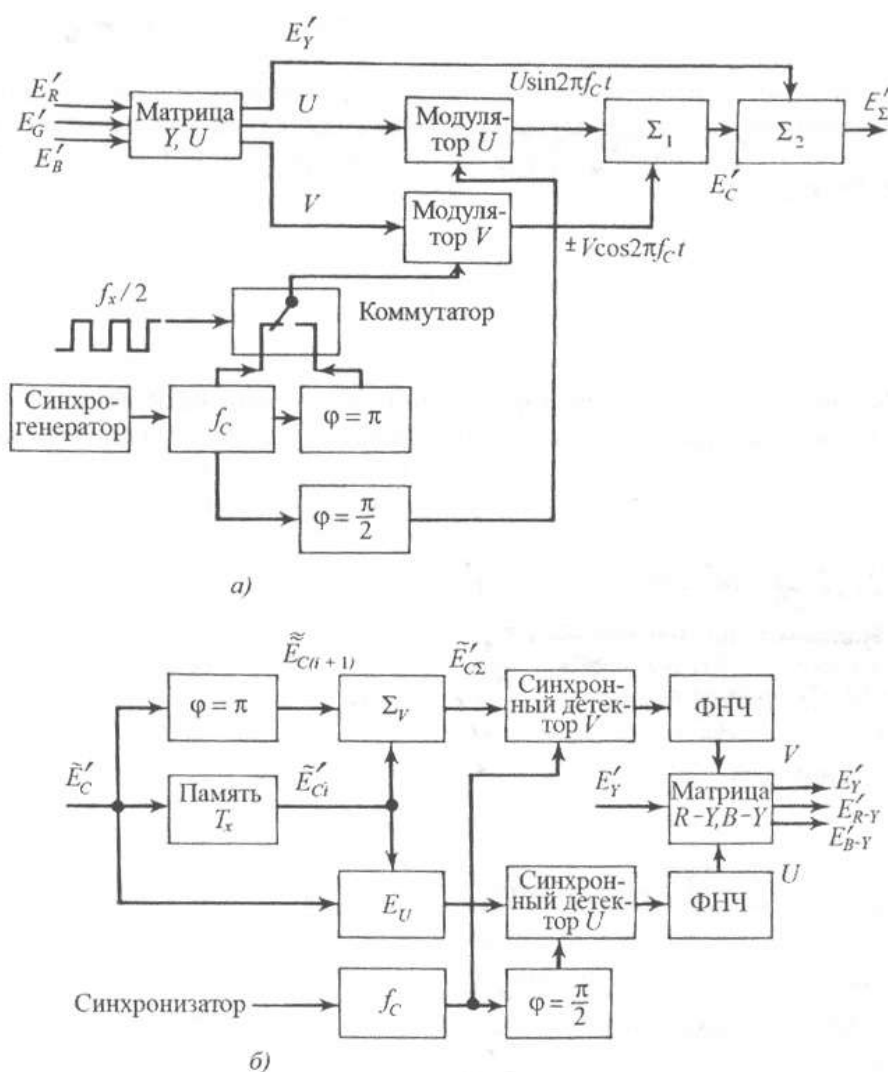


Рис. 5. Структурные схемы кодера (а) и декодера (б) системы PAL.

Если изменить полярность сигнала \tilde{V}_{i+1} на противоположную ($\varphi = \pi$ на Рис. 5,а) и сформированный сигнал просуммировать с сигналом \tilde{E}_{Ci} , то получим:

$$\tilde{E}_{C\Sigma} = \tilde{E}_{Ci} + \tilde{E}_{C(i+1)} = (\tilde{U}_i + \tilde{U}_{i+1}) + j(\tilde{V}_i + \tilde{V}_{i+1}).$$

Сигнал $\tilde{E}_{\text{св}}$ указан на Рис. 4 пунктиром. Именно этот сигнал далее подлежит синхронному детектированию. Вектор $\tilde{E}_{\text{св}}$ занимает положение на диаграмме, определяемое углом φ , т.е. независимо от фазового сдвига $\Delta\varphi$ восстанавливается истинное положение этого вектора; следовательно, в результате синхронного детектирования может быть реализована неискаженная передача цветового тона.

Использование рассмотренного метода обработки сигнала приводит к полной компенсации фазовых ошибок (погрешностей воспроизведения цветового тона).

Остальные преобразования сигналов в передающей и приемной частях аналогичны преобразованиям в системе NTSC.

В системе NTSC, как было отмечено выше, для снижения видности проникающих в канал яркости сигналов цветности частота цветовой поднесущей выбиралась равной нечетной гармонике половины строчной частоты $f_C = (2m+1) f_X/2$.

В системе PAL такой выбор частоты цветовой поднесущей совместно с изменением фазы сигнала V на $\varphi = \pi$ от строки к строке и от кадра к кадру привел бы к суммарному изменению фазы на 2π , что равносильно строгому сохранению фазы цветовой поднесущей на изображении. Механизмы компенсации цветовой поднесущей оказались бы неосуществимыми. В связи с этим, в системе PAL частота цветовой поднесущей рассчитывается по формуле:

$$f_C = (m+1/4) f_X + f_Y/2$$

и равна 4,4336 МГц. Спектр полного сигнала этой системы приведен на Рис. 1, в.

Систему PAL используют радиовещательные компании Германии, Англии, Австрии, Финляндии, Австралии и других стран.

Система цветного телевидения SECAM (Sequentieal couleur a memoire)

Данная система базируется на последовательной передаче двух цветоразностных сигналов с заменой их от строки к строке. Восстановление

сигнала в приемнике обеспечивается благодаря применению запоминающего устройства на время передачи одной строки. Выше было дано подробное обоснование возможности сокращения полосы частот цветоразностных сигналов за счет использования особенностей восприятия цвета мелких деталей изображения. Очевидно, что эти особенности зрения могут позволить увеличивать размер деталей, передаваемых с цветовыми искажениями или даже в черно-белом варианте не только в горизонтальном, но и в вертикальном направлениях. В связи с этим, возможно передавать полную информацию о цвете не в каждой строке, а через строку.

В системе SECAM цветоразностные сигналы передаются поочередно: в одной строке – E'_{R-Y} , в другой – E'_{B-Y} и т.д. Для этого электронный коммутатор, управляемый импульсами с частотой $f_x/2$ поочередно подключает к выходу источники сигналов D_R и D_B (см. Рис. 6,а). В приемнике оба сигнала могут быть восстановлены в каждой строке благодаря использованию устройства памяти на время T_x и электронного коммутатора (Рис. 6, б).

Таким образом, если на входе устройства памяти будет сигнал $E'_{R-Y}(D_R)$, то на выходе – $E'_{B-Y}(D_B)$, и наоборот. Если коммутатор переключать с периодом строк, то на одном из его выходов постоянно будет сигнал $E'_{R-Y}(D_R)$, на другом $E'_{B-Y}(D_B)$. Предполагается, что цветное содержание в двух соседних строках одинаково. Если проследить последовательность передачи информации о яркости и цветности каждого элемента изображения, то нетрудно убедиться в том, что полное цветное изображение передается за два кадра. Сигнал яркости E'_Y в полной полосе частот передают в каждой строке, чем обеспечивают четкость изображения как по горизонтали, так и по вертикали. Цветоразностные сигналы в системе SECAM передаются с использованием частотной модуляции. Последовательная передача частотно-модулированных цветоразностных сигналов делает систему нечувствительной к упомянутым выше фазовым искажениям, а также приводит к отсутствию перекрестных искажений между цветоразностными сигналами благодаря разделению их во времени.

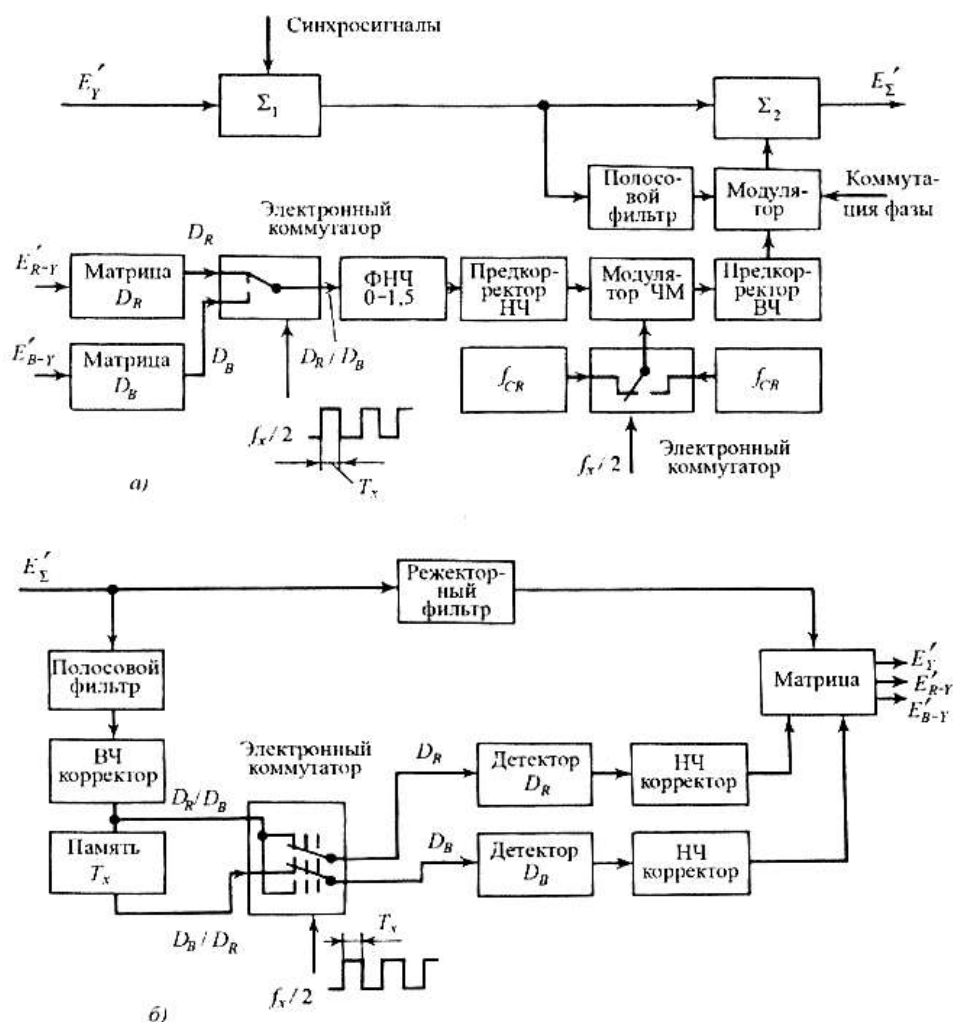


Рис. 6. Формирование и прием сигналов в системе цветного телевидения SECAM.

В качестве цветоразностных сигналов в системе SECAM используют сигналы D_R и D_B , получаемые перемножением коэффициентов $k_R = -1.9$ и $k_B = 1.5$, соответственно, на E'_{R-Y} и E'_{B-Y} . Выбор величины коэффициентов связан с улучшением совместимости и повышением помехоустойчивости системы. При частотной модуляции диапазоны девиации частоты во время передачи сигналов E'_{R-Y} и E'_{B-Y} разнятся. Введением коэффициентов k_R и k_B позволяет выровнять диапазоны изменения сигналов, что облегчает оптимизацию частотного модулятора. Введение знака минус перед

коэффициентом k_R связано с особенностями статистических характеристик цветных изображений, которые приводят к преобладанию в сигнале E'_{R-Y} положительных компонентов, в то время как в сигнале E'_{B-Y} преобладают отрицательные компоненты.

Сигналы D_R и D_B подвергают низкочастотным предискажениям за счет подъема высокочастотных составляющих спектра цветоразностных сигналов. Их осуществляют до модуляции (Рис. 6). Вводимые предискажения служат повышению отношения сигнал/помеха из-за увеличения глубины модуляции высокочастотной части сигналов.

Степень предискажений строго нормируется, так как в приемных устройствах с ней должна быть взаимно согласована цепь коррекции, восстанавливающая исходное частотное распределение сигнала изображения. Цветоразностные сигналы в системе SECAM ограничивают по спектру фильтром низких частот (ФНЧ) с полосой пропускания (0–1,5) МГц. Спектр обеспечивает в системе следующие параметры: затухание 3 дБ на частоте 1,3 МГц и 30 дБ на частотах выше 3 МГц.

После частотной модуляции цветоразностных сигналов осуществляют высокочастотные предискажения подъемом амплитуд боковых составляющих спектра сигнала относительно амплитуды цветовой поднесущей частоты f_{CO} . Помехоустойчивость систем связи с частотной модуляцией тем выше, чем выше индекс модуляции (отношение девиации частоты к высшей частоте модулирующего сигнала). В рассматриваемой телевизионной системе увеличение индекса модуляции ограничивается возможностями расширения спектра цветковых сигналов. Это приводит к появлению недопустимых помех в яркостном канале (ухудшению совместимости). При этом высокочастотные предискажения позволяют повышать помехоустойчивость системы без увеличения индекса модуляции.

При приеме частотно-модулированных сигналов помехи на выходе частотного детектора тем выше, чем больше отклонение частоты принимаемого сигнала от частоты поднесущей. Поэтому вводят высокочастотную предкоррекцию: частотно-модулированный сигнал цветности подвергается амплитудным предискажениям с последующим ослаблением на приемной стороне. Размах цветовой поднесущей на частоте f_{CO} устанавли-

ливают $(23 \pm 2,5)\%$ от значения яркостного сигнала (от уровня гасящих импульсов до уровня белого). Это приводит к уменьшению заметности цветовой поднесущей при передаче черно-белых и малонасыщенных деталей изображения, поскольку сигналы D_R и D_B близки к нулю и девиация частоты минимальна.

В канале цветности приемника цветного телевидения яркостный сигнал является помехой. В частотном диапазоне канала цветности энергия яркостного сигнала для большинства передаваемых сюжетов невелика. Рассматриваемая предкоррекция сводится к увеличению амплитуды сигналов цветности в те отрезки времени, когда размах яркостного сигнала превышает заданное пороговое значение (как правило, 70% номинальной амплитуды поднесущей). Для этого в цепь яркостного сигнала включается полосовой фильтр, с выхода которого сигнал управляет соответствующим модулятором в канале цветности (см. Рис. 6.1,а). Такое относительное увеличение амплитуды сигналов цветности по отношению к яркостному сигналу приводит к уменьшению мешающего действия последнего в канале цветности. В приемнике дополнительная амплитудная модуляция подавляется ограничителем частотно-модулированных сигналов. Точные значения этих частот для системы SECAM были установлены исходя из условий их кратности частоте строчной развертки:

$$f_{CR} = (4406,25 \pm 2) \text{ кГц};$$
$$f_{CB} = (4250,00 \pm 2) \text{ кГц};$$

Переключение частот осуществляется электронным коммутатором.

В системе SECAM после введения высокочастотных предискажений перед суммированием сигнала цветности производят периодическое изменение его фазы на π . Эти изменения производят через две строки на третью и в каждом поле, что приводит к снижению видимости на изображении несущих частот сигнала цветности, попадающей в канал яркости.

В связи с поочередной передачей сигналов D_R и D_B в приемном устройстве в любой момент времени необходимо иметь информацию о цветности. Для этого в сигнал синхронизации вводят сигналы опознавания, передаваемые в течение интервала кадрового гасящего импульса (с 7-й по

15-ю строку нечетного поля и с 320-й по 328-ю – четного). Назначение этих сигналов сводится к установлению правильной фазы коммутатора декодирующего устройства приемника, а также к выключению канала цветности во время приема сигналов черно-белой программы. Во время передачи сигнала D_R (красная строка) частота сигнала опознавания изменяется от f_{CR} до $f_{CR} + \Delta f$ по линейному закону. Далее, до окончания активной части строки, частота сигнала остается неизменной. Во время передачи сигнала D_B (синяя строка) частота сигнала опознавания изменяется от f_{CB} до $f_{CB} + \Delta f$.

В приемнике сигналы цветовой синхронизации выделяются частотными детекторами и управляют работой коммутатора декодирующего устройства.

Систему цветного телевидения SECAM используют в России, Франции и других странах.

Временное уплотнение сигналов в системах цветного телевидения

Основные параметры аналоговых ТВС такого типа приведены в Таблице 3.

Таблица 3.

Основные параметры аналоговых ТВС.

Параметр	NTSC	PAL	SECAM	D2MAC	MUSE	HDMAC
Число строк	525	625	625	625	1125	1250
Формат кадра	4:3	4:3	4:3	4:3	16:9	16:9
Частота строк, Гц	15734	15625	15625	15625	33750	31250
Частота кадров, Гц	30	25	25	25	30	25
Полоса частот сигналов яркости/цветности, МГц	4,2/0,8	5,0/1,2	6,0/1,5	5,0/2,5	21,0/5,0	23,0/11,5
Полоса частот радиоканала, МГц	6,0	7,0	8,0	8,4	8,2	12,0

Разработка систем с временным уплотнением телевизионного сигнала в канале связи стимулировалась стремлением к улучшению качества изображения и звука, в первую очередь, за счет устранения перекрестных искажений яркость – цветность, введения высококачественного стереозвука, создания систем ТВЧ и др. Этому способствовала также разработка быстродействующих модулей цифровой строчной и кадровой памяти. Временное уплотнение сигналов использовали в разработанной в Японии системе, базирующейся на кодировании с многократной субнапиксельной дискретизацией MUSE, а также европейских стандартах, использующих сжатие аналоговых компонентов MAC, C-MAC, D-MAC, D2-MAC, HD-MAC.

В настоящее время в связи с внедрением стандарта DVB данные системы практически не используются, поэтому нами рассматриваться не будут.

7.2. СТАНДАРТ DVB

DVB Project (Digital Video Broadcasting Project – Проект цифрового видеовещания) – это организация, занимающаяся разработкой стандартов в области цифрового телевидения для Европы. Она создана в 1993 году, и ее членами в настоящее время являются более 300 компаний, производящих оборудование для телевизионного вещания, занимающихся телевизионным вещанием и связью, научно-исследовательских организаций и т.д. Штаб-квартира DVB Project находится в Женеве (Швейцария).

Стандарты, подготавливаемые DVB Project, затем представляются на утверждение в европейские организации по стандартизации. Принятие стандартов позволяет унифицировать средства телевизионного вещания, элементную базу телевизионных приемников и другой аппаратуры. Это является необходимым условием успешного внедрения цифрового телевидения.

В результате работы DVB Project уже в 1994 году были выработаны основные положения стандарта DVB-C для кабельного телевизионного вещания и стандарта DVB-S спутникового телевизионного вещания.

Работа над стандартом наземного (т.е. обычного, эфирного) телевизионного вещания DVB-T (Terrestrial – наземный) была закончена позже, в 1996 году, так как в этом виде вещания внедрение цифрового телевидения столкнулось с наиболее серьезными сложностями.

В основе стандартов DVB лежит стандарт кодирования движущихся изображений и звукового сопровождения MPEG-2.

В стандартах DVB, помимо методов кодирования и параметров транспортного потока, описанных в MPEG-2, определены также методы помехоустойчивого кодирования, канального кодирования, модуляции несущих частот, передачи дополнительной информации, защиты информации от несанкционированного доступа (условного доступа к программам) и другие аспекты цифрового телевизионного вещания [7.2.1.].

При этом для всех видов телевизионного вещания общей основой являются использование методов MPEG-2 для сжатия изображения и звука, формирование транспортного потока на основе транспортного потока MPEG-2, кодирование с помощью кодов Рида-Соломона. Тем самым достигается значительная степень унификации.

Транспортный поток DVB

Синтаксис транспортного потока DVB расширен по сравнению с транспортным потоком MPEG-2. Предусмотрены новые типы пакетов, имеющие свои особые идентификаторы (PID). В первую очередь, рассмотрим расширенный набор таблиц PSI (Program Specific Information – программно-зависимой информации), содержащих информацию о передаваемых в транспортном потоке телевизионных программах, данных и т.д.

Транспортный поток MPEG-2 содержит три типа таблиц PSI, каждому из которых соответствует свой PID:

1. PMT (Program Map Table – Таблица состава программ). PID этих таблиц определяется в PAT для каждой программы, передаваемой в транспортном потоке. PMT содержит перечень всех составляющих данной программы (видео, звук, данные и др.) и значения PID пакетов, в которых передаются эти составляющие.

2. PAT (Program Association Table – Таблица объединения программ). PID=0.

PAT содержит данные о передаваемых в транспортном потоке программах и идентификаторы таблиц PMT.

3. CAT (Conditional Access Table – Таблица условного доступа). PID=1.

CAT содержит PID пакетов с данными для условного доступа к программам (ключами для дескремблирования и др.).

В стандартах DVB предусмотрены еще 4 типа обязательных таблиц PSI:

1. NIT (Network Information Table – Таблица сетевой информации).

PID=0x10 (общепринятая запись для числа в шестнадцатеричной форме, в десятичной форме равного 16). NIT содержит имя сети, к которой относится данный транспортный поток, и перечень остальных транспортных потоков с указанием спутниковых, кабельных или наземных каналов, по которым эти транспортные потоки передаются. Под сетью понимается совокупность транспортных потоков, передаваемых в одной системе доставки (например, одной вещательной компанией).

2. SDT (Service Description Table – Таблица описания служб) PID=0x11.

SDT содержит сведения о службах (видах сервиса), передаваемых в транспортном потоке.

3. EIT (Event Information Table – Таблица информации о событиях).

PID=0x12. EIT содержит сведения о событиях, т.е. моментах начала и окончания отдельных программ. Эти сведения необходимы для работы электронного путеводителя по программам (EPG – Electronic Program Guide).

4. TDT (Time and Data Table – Таблица времени и даты): PID=0x14.

TDT содержит всемирное координированное время (UTC – Universal Time Coordinated), по которому может устанавливаться текущее время в приемнике.

Помимо этого, могут передаваться еще необязательные таблицы и таблицы NIT, EIT и SDT других транспортных потоков.

Перечисленные таблицы дают возможность пользователю не только выбирать программу в данном транспортном потоке, но и получать информацию о программах в других транспортных потоках данной сети, чтобы выбирать программу в них и переходить на нужный канал вещания.

Стандарты DVB допускают возможность вводить дополнительные, не описанные в стандарте, пакеты данных с особыми идентификаторами.

В этих пакетах ведущая вещание телевизионная компания может передавать ключи к шифрам условного доступа, так называемые «навигаторы» или «гиды» (EPG – Electronic Program Guide), т.е. системы меню и таблиц для поиска нужной передачи и программирования времени включения телевизионного приемника для просмотра или записи выбранной передачи, а также другую информацию.

В последние годы в телевидении наблюдается возобновление интереса к эфирным каналам. Использование сетей относительно маломощных передатчиков и ретрансляторов СВЧ-диапазона позволяет охватить телевизионным вещанием территории с различной плотностью застройки. Низкий уровень излучаемой мощности делает эти системы безопасными для здоровья населения. При этом стоимость развертывания такой сети в городских условиях оказывается существенно ниже стоимости строительства традиционных широкополосных кабельных сетей.

Большее распространение во многих странах получила система телевизионного вещания MMDS (Multichannel Microwave Distribution System), работающая в диапазоне 2,5...2,7 ГГц (для России и стран СНГ). В этом диапазоне размещается 24 канала по 8 МГц. Передача сигналов цифрового телевидения может осуществляться с применением 2-ФМ или 4-ФМ. Приемное оборудование включает небольшую антенну типа «волновой канал», параболическую или другого типа и конвертор ДМВ- или МВ-диапазонов. Дальнейшая обработка сигнала в основном такая же, как в приемном тракте спутникового цифрового ТВ.

Хорошие перспективы имеют системы сотового телевидения, которые как и системы сотовой радиосвязи, основаны на использовании большого количества относительно маломощных передатчиков СВЧ-диапазона, каждый из которых обслуживает небольшую территорию. Наличие в сети множества ячеек позволяет предлагать пользователям свой набор ТВ-программ в каждой из них, что выгодно отличает сеть сотового ТВ от существующих систем эфирного ТВ-вещания в метровом и дециметровом диапазонах.

К системам сотового телевидения относятся LMDS (Local Multipoint Distribution System – система местного многоточечного распределения),

работающая в диапазоне частот 27,5...29,5 ГГц, и MVDS (Multipoint Video Distribution System – система многоточечного распределения видео), работающая в диапазоне частот 40,5...42,5 ГГц. Известны варианты таких систем и для работы в других частотных диапазонах: 24, 31 и 38 ГГц. В полосе частот 2 ГГц с помощью этих систем можно передавать от 96 до 128 аналоговых ТВ-каналов или в несколько раз больше цифровых. При этом передача радиосигналов осуществляется на экологически безопасных уровнях мощности 100..300 мВт на канал.

Абонентское оборудование системы сотового телевидения во многом аналогично используемому для приема спутниковых каналов, но благодаря более высокому уровню мощности принимаемого сигнала, приемные антенны меньше по размерам (диаметр около 150 мм для 40 ГГц и 250 мм для 28 ГГц) и дешевле. Так как антенна остронаправленная, то принимаются сигналы только того передатчика, на который она нацелена.

Перспективность новых методов ТВ-вещания нашла отражение в стандартах DVB. Методы передачи программ цифрового телевидения для частот выше 10 ГГц описаны в стандарте DVB-MS, который является развитием стандарта DVB-S для спутникового ТВ, а для частот ниже 10 ГГц – в стандарте DVB-MC, основанном на стандарте DVB-C для кабельного ТВ.

В цифровых телевизионных системах по каналам связи должен передаваться цифровой сигнал – транспортный поток DVB. Этот цифровой сигнал необходимо передавать в выделенной для данного канала связи полосе частот. При этом необходимо решать задачи модуляции несущего колебания цифровым сигналом и защиты от помех. Методы, используемые при передаче цифрового сигнала, существенно отличаются от традиционных методов передачи аналоговых сигналов.

Одним из главных требований к системам цифрового телевидения является использование существующих каналов телевизионного вещания. Невыполнение этого требования привело бы к необходимости менять сложившееся распределение частотных диапазонов по каналам, заменять передающие и приемные антенны, переходить к использованию более широкополосных передатчиков и радиочастотных трактов ТВ-приемников. Скорость передачи двоичных символов на выходе кодера MPEG-2

основного уровня основного профиля достигает 15 Мбит/с. Максимальная эффективность использования полосы частот канала связи при передаче двоичного сигнала с простой амплитудной манипуляцией, когда амплитуда несущей может принимать два значения, составляет 1 (бит/с)/Гц. Следовательно, для передачи сигнала цифрового телевидения необходима полоса частот до 15 МГц, что превышает ширину полосы частот стандартных каналов телевизионного вещания (8 МГц в Европе и 6 МГц в США и Японии).

Поэтому для передачи сигналов цифрового телевидения, особенно если надо передавать сигналы нескольких программ обычной четкости в одном канале или сигнал ТВЧ, необходимо увеличивать эффективность использования полосы частот канала связи, что достигается применением более сложных методов модуляции несущей.

Другое важнейшее требование к системе цифрового телевидения – обеспечение высокой помехоустойчивости.

Как известно, цифровая информация передается в виде двоичных символов – единиц и нулей. Из двоичных символов состоят кодовые комбинации (кодовые слова), каждая из которых может содержать информацию, например, о букве, цифре или, в случае цифрового телевизионного сигнала, о значении одного отсчета этого сигнала. В результате действия шумов и помех отдельные двоичные символы могут быть приняты с ошибкой. Интенсивность ошибок характеризуется их относительной частотой $f_{\text{ош}}$ [ош/дв.символ], показывающей вероятность того, что принятый отдельный двоичный символ ошибочен. В англоязычной технической литературе эта величина обычно называется BER (Bit Error Rate – частота ошибок на бит).

Отметим основные причины возникновения ошибок:

- действие шумов различной природы (тепловой шум, шум генерации-рекомбинации, фликкер-шум и т.д.), в основном проявляющееся во входных каскадах приемной аппаратуры;
- промышленные и атмосферные помехи;
- помехи, создаваемые радиопередатчиками, работающими в этой же полосе частот в соседних местностях (интерференция);

- многолучевое распространение радиоволн, возникающее из-за отражений от зданий и сооружений и от поверхности земли.

Ошибки могут быть одиночные и пакетные (групповые). Одиночные ошибки не зависят друг от друга. Пакетные ошибки искажают сразу несколько соседних двоичных символов. Например, вследствие действия достаточно продолжительной импульсной помехи несколько идущих подряд двоичных символов становятся равными нулю или единице.

Традиционными способами повышения помехоустойчивости являются увеличение мощности передатчика, выбор антенны с оптимальными для данного случая параметрами, уменьшение шумов в приемниках путем применения малошумящих полупроводниковых приборов или охлаждения входного каскада приемника, рациональное планирование использования радиоканалов на смежных территориях. Однако все эти методы имеют ограничения, связанные с реальными техническими возможностями, конечной шириной доступного диапазона длин волн, стоимостью аппаратуры и т.д. В случае передачи цифровых сигналов значительное повышение помехоустойчивости может быть достигнуто путем применения кодов, исправляющих ошибки. Кроме того, выбранный метод модуляции также должен способствовать повышению помехоустойчивости.

7.3. КАНАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ

Перемежение и скремблирование

Одним из эффективных методов уменьшения влияния пакетных ошибок является перемежение или перемешивание. Данные, перед передачей по каналу связи, переставляются в заданном порядке, а в приемной части восстанавливается исходный порядок, т.е. выполняется деперемежение. При этом пакетная ошибка, возникшая в канале связи, превращается в набор рассредоточенных во времени одиночных ошибок, которые проще обнаруживаются и исправляются с помощью кодов, исправляющих ошибки [7.3.2.].

Пример перемежения и деперемежения показан на Рис.1.

Исходный цифровой сигнал представляет собой последовательность 4-разрядных двоичных слов, передаваемых бит за битом (Рис.1,а). Перемежение выполняется в пределах каждых 4 слов, т.е. в пределах отрезка цифрового сигнала, содержащего 16 бит. Числа показывают номера битов в этом отрезке. В результате перемежения биты переставляются (Рис.1,б). Биты, искаженные действием пакетной ошибки, отмечены звездочками. В результате деперемежения (Рис.1,в) восстанавливается исходный порядок битов и искаженные биты рассредоточиваются.

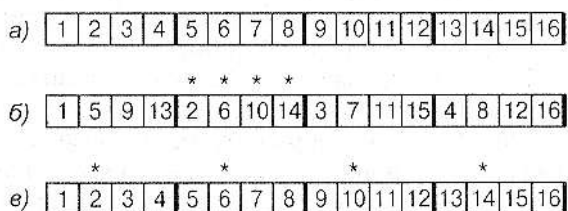


Рис. 1. Пример перемежения и деперемежения.

Переставляться могут не только отдельные биты, но и группы битов, например, байты. В стандартах цифрового телевидения DVB перемежение выполняется в пределах пакетов транспортного потока после кодирования Рида-Соломона (см. далее), в результате которого размер пакетов увеличивается с 188 до 204 байтов. Каждый пакет разбивается на 12 групп по 17 байтов. Сначала передаются первые байты всех групп, т.е. байты с номерами 1, 18,...171, 188, затем – вторые байты групп: 2, 19,...172, 189 и т.д. В конце передаются последние байты групп, имеющие номера 17, 34,...187, 204. Таким образом, в процессе перемежения различные байты смещаются на расстояния от 0 до 176 позиций в пределах пакета транспортного потока. В приемной части восстанавливается исходный порядок следования байтов.

Перемежение можно использовать и для шифровки передаваемого сигнала, так как восстановление правильного порядка символов возможно только при знании закона перестановки.

Термином скремблирование в стандарте MPEG-2 называют изменение характеристик потока данных (видео, аудио или другой информации) с целью предотвращения несанкционированного получения этой инфор-

мации в неискаженном виде. Дескремблирование – это обратная операция, т.е. обратное изменение характеристик потока данных.

В цифровых системах передачи информации, в частности, в цифровом телевидении, для скремблирования к передаваемому цифровому сигналу добавляют мешающий сигнал, в качестве которого, как правило, используют псевдослучайные последовательности (ПСП).

Это последовательности чисел, в частности – битов, которые обладают многими свойствами случайных сигналов. Нули и единицы в ПСП расположены вроде бы хаотически, но на самом деле каждая ПСП формируется в соответствии с алгоритмом, который можно описать небольшим количеством параметров.

При таком методе скремблирования каждый бит передаваемого цифрового сигнала складывается по модулю 2 с очередным битом ПСП. Правила суммирования по модулю 2 просты:

$$0 \oplus 0 = 0; \quad 1 \oplus 0 = 1; \quad 1 \oplus 1 = 0.$$

Из этих правил следует, что если какой-либо бит два раза сложить по модулю 2 с одним и тем же двоичным символом, то снова получим исходный бит. Поэтому для дескремблирования необходимо сложить по модулю 2 каждый бит скремблированного цифрового сигнала с тем же битом той же ПСП.

Следовательно, для дескремблирования в приемнике надо формировать точно такую же ПСП, какая использовалась для скремблирования в передающей части. Для этого в приемник тем или иным способом передаются параметры алгоритма формирования ПСП. Не получив эти параметры, невозможно дескремблировать принятый сигнал. Возможен и такой вариант ограничения доступа: алгоритм формирования ПСП известен, но неизвестно, какой именно участок ПСП используется для скремблирования. В этом случае в состав ключа к шифру должен входить указатель на начало используемого участка ПСП.

Скремблирование путем сложения по модулю 2 с ПСП применяется в DVB и в случаях, когда ограничение доступа не требуется, т.е. для бесплатных ТВ программ. Дело в том, что такое скремблирование приближает свойства передаваемого сигнала к свойствам шума. При этом энер-

гия более равномерно распределяется по полосе частот передаваемого сигнала, что способствует более эффективному использованию канала связи и повышению помехоустойчивости. Соответственно, в приемнике всегда должно выполняться дескремблирование.

Коды, исправляющие ошибки

Помехоустойчивое кодирование передаваемой информации позволяет в приемной части системы обнаруживать и исправлять ошибки. Коды, применяемые при помехоустойчивом кодировании, называются «корректирующими кодами» или кодами, исправляющими ошибки.

Если применяемый способ кодирования позволяет обнаружить ошибочные кодовые комбинации, то в случае приема изображения можно заменить принятый с ошибкой элемент изображения на предыдущий принятый элемент или на соответствующий элемент предыдущей строки или предыдущего кадра. При этом заметность искажений на экране телевизионного приемника существенно уменьшается. Такой способ называется «маскировкой ошибки». Более совершенные корректирующие коды позволяют не только обнаруживать, но и исправлять ошибки. Как правило, корректирующий код может исправлять меньше ошибок, чем обнаруживать. Количество ошибок, которые корректирующий код может исправить в определенном интервале последовательности двоичных символов, например, в одной кодовой комбинации, называется исправляющей способностью кода.

Основной принцип построения корректирующих кодов заключается в том, что в каждую передаваемую кодовую комбинацию, содержащую k информационных двоичных символов, вводят p дополнительных двоичных символов, в результате чего получается новая кодовая комбинация, содержащая $n = k + p$ двоичных символов. Такой код будем обозначать (n, k) . Доля информационных символов в нем характеризуется относительной скоростью кода, определяемой как:

$$R = k/n = k/k+p \quad (1).$$

Количество возможных кодовых комбинаций кода (n, k) равно 2^n . Из них передаваться могут 2^k кодовых комбинаций, называемых «разрешен-

ными». Остальные $2^n - 2^k$ кодовые комбинации являются «запрещенными». Появление одной из этих запрещенных комбинаций в приемной части означает, что имеется ошибка.

Для оценки способности кода обнаруживать и исправлять ошибки используется понятие кодового расстояния (расстояния Хемминга). Кодовое расстояние между кодовыми комбинациями определяется как число двоичных разрядов, в которых эти комбинации различаются. Например, кодовое расстояние между кодовыми комбинациями 0001 и 0011 равно 1, а между комбинациями 0000 и 1111 равно 4.

Если разрешенные кодовые комбинации выбраны таким образом, что при изменении любого двоичного символа разрешенная кодовая комбинация переходит в запрещенную, то такой корректирующий код позволяет обнаруживать одиночные ошибки в отдельных кодовых комбинациях.

Одиночная ошибка переводит исходную кодовую комбинацию в кодовую комбинацию, отстоящую от нее на $d=1$. Следовательно, для обнаружения одиночных ошибок необходимо, чтобы кодовое расстояние между любыми двумя разрешенными кодовыми комбинациями корректирующего кода было не менее 2. Для обнаружения r_1 ошибок в кодовой комбинации необходимо, чтобы кодовое расстояние между двумя разрешенными кодовыми комбинациями удовлетворяло неравенству:

$$d \geq r_1 + 1.$$

Один из самых простых и известных примеров помехоустойчивого кодирования – проверка на четность. В каждую кодовую комбинацию вводится один дополнительный двоичный символ x_p , называемыми «контрольным» или проверочным битом. Этот бит устанавливается равным 1, если сумма единиц в исходной кодовой комбинации равна нечетному числу, и равным 0 в противоположном случае. Данное правило выражается соотношением:

$$x_p = x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_k, \quad (2)$$

где x_1, \dots, x_k – двоичные символы исходной кодовой комбинации.

Если в приемной части системы один из двоичных символов кодовой комбинации принят с ошибкой, значение контрольного бита не будет

удовлетворять равенству (2). Это несоответствие будет обнаружено специальной схемой и явится признаком того, что произошла ошибка. Таким образом, проверка на четность позволяет обнаруживать одиночные ошибки, но не позволяет их исправлять. Данный метод широко применяется в вычислительной технике, где наличие хотя бы одного ошибочного бита недопустимо. Для исправления одиночных ошибок необходимо, чтобы кодовое расстояние между любыми двумя разрешенными кодовыми комбинациями корректирующего кода было не менее 3. В этом случае принятая запрещенная кодовая комбинация заменяется ближайшей к ней разрешенной. Так как ошибки одиночные, то переданная разрешенная кодовая комбинация отстоит от принятой запрещенной кодовой комбинации на 1, а остальные разрешенные кодовые комбинации – не менее, чем на 2. В этом случае ошибка надежно исправляется. В общем случае для коррекции r_2 ошибок в кодовой комбинации кодовое расстояние d между любыми двумя разрешенными кодовыми комбинациями должно удовлетворять неравенству $d \geq 2r_2 + 1$. Для увеличения кодового расстояния между разрешенными кодовыми комбинациями необходимо увеличивать число p контрольных символов в передаваемых кодовых комбинациях. Известно соотношение:

$$d_{\min} = p + 1 = n - k + 1 ,$$

где d_{\min} – минимальное кодовое расстояние между двумя разрешенными кодовыми комбинациями. Чтобы при этом относительная скорость кода не стала чрезмерно малой, необходимо в соответствии с (1) увеличивать и число k информационных символов в кодовой комбинации.

Построение кода с заданными n и k может осуществляться разными способами. Есть хорошо разработанные математические методы решения этой задачи и обширная литература. Для цифрового телевидения большое значение имеет возможность коррекции пакетных ошибок, искажающих сразу несколько соседних двоичных символов. Кроме того, при выборе кода для системы цифрового телевидения необходимо обеспечить, по возможности, простой метод декодирования, так как декодер должен быть в каждом телевизионном приемнике.

В современных системах цифрового телевидения для обеспечения помехоустойчивой передачи телевизионных сигналов по каналу связи используют коды «Рида-Соломона». Чтобы получить некоторое представление об этих кодах посмотрим, какое место они занимают в классификации корректирующих кодов (Рис. 2).



Рис. 2. Классификация корректирующих кодов.

Корректирующие коды разделяются на блочные и сверточные (непрерывные). Блочные коды основаны на перекодировании исходной кодовой комбинации (блока), содержащей k информационных символов, в передаваемую кодовую комбинацию, содержащую $n > k$ символов.

Дополнительные $n-k$ символов зависят только от k символов исходной кодовой комбинации. Следовательно, кодирование и декодирование осуществляются всегда в пределах одной кодовой комбинации (блока). В противоположность этому – в сверточных кодах кодирование и декодирование осуществляются непрерывно над последовательностью двоичных символов.

Блочные коды бывают разделимые и неразделимые. В разделимых кодах можно в каждой кодовой комбинации указать, какие символы яв-

ляются информационными, а какие – проверочными. В неразделимых кодах такая возможность отсутствует.

Следующая ступень классификации – систематические коды. Они отличаются тем, что в них проверочные символы формируются из информационных по определенным правилам, выражаемым математическими соотношениями. Например, каждый проверочный символ x_{pj} получается как линейная комбинация информационных символов:

$$x_{pj} = (b_{1j} x_1) \oplus (b_{2j} x_2) \oplus \dots \oplus (b_{kj} x_k), \quad (3)$$

где b_{1j}, \dots, b_{kj} – коэффициенты, принимающие значения 0 или 1; $j = 1, 2, \dots, n - k$. Соотношение (2) для формирования контрольного бита проверки на четность является частным случаем (3).

Перейдем к знакомству с циклическими кодами. Пусть имеется кодовая комбинация $a_0 a_1 a_2 \dots a_{n-1}$, где a_0 – младший разряд кода. Соответствующий ей полином имеет вид:

$$a_0 + a_1 x + \dots + a_{n-1} x^{n-1},$$

где x – формальная переменная, вводимая только для получения записи кодовой комбинации в виде полинома.

Над полиномами, представляющими кодовые комбинации, определена математическая операция умножения. Особенность этой операции по сравнению с общепринятой заключается в том, что коэффициенты при x всех степеней суммируются по модулю 2, а показатели степени x при перемножении суммируются по модулю n , поэтому $x^n = 1$.

Циклические коды обладают следующим основным свойством. Если кодовая комбинация $a_0 a_1 a_2 \dots a_{n-1}$ является разрешенной, то получаемая из нее путем циклического сдвига кодовая комбинация $a_{n-1} a_0 a_1 a_2 \dots a_{n-2}$ также является разрешенной в данном коде. При записи в виде полиномов операция циклического сдвига кодового слова сводится к умножению соответствующего полинома на x с учетом приведенных ранее правил выполнения операции умножения.

Введем понятие производящего полинома. Производящим полиномом порядка $(n-k)$ может быть полином со старшей степенью x равной

$(n-k)$, на который без остатка делится двучлен $(1+x^n)$. Разрешенные кодовые комбинации получаются перемножением полиномов порядка $k-1$, выражающих исходные кодовые комбинации, на производящий полином.

Циклический код с производящим полиномом $g(x)$ строится следующим образом.

1. Берутся полиномы $g(x), xg(x), x^2g(x), \dots, x^{k-1}g(x)$.
2. Кодовые комбинации, соответствующие этим полиномам, записывают в виде строк матрицы G , называемой «производящей матрицей».
3. Формируется набор разрешенных кодовых комбинаций кода. В него входит нулевая кодовая комбинация, k кодовых комбинаций, указанных в п.1, а также суммы их всевозможных сочетаний. Суммирование осуществляется поразрядно, причем каждый разряд суммируется по модулю 2. Общее число полученных таким образом разрешенных кодовых комбинаций равно 2^k , что соответствует числу информационных разрядов кода.

Для построения декодера, в первую очередь, получают производящий полином $h(x)$ порядка k для построения исправляющей матрицы H :

$$h(x) = 1 + x^n/g(x) .$$

Строками исправляющей матрицы H будут кодовые комбинации, определяемые полиномами $h'(x), x h'(x), \dots, x^{n-k-1} h'(x)$, где $h'(x)$ – это записанный в обратном порядке полином $h(x)$. Исправляющая матрица имеет n столбцов и $n-k$ строк.

При декодировании принятая кодовая комбинация $a_0a_1a_2\dots a_{n-1}$ скалярно умножается на каждую строку исправляющей матрицы. Эта операция может быть записана в виде соотношения:

$$c_j = (h_{j1}a_1) \oplus (h_{j2}a_2) \oplus \dots \oplus (h_{jn}a_n) ,$$

где h_{ji} – элементы j -той строки матрицы H . Полученные $n-k$ чисел c_j образуют исправляющий вектор или синдром. Если ошибок нет, то все $c_j = 0$. Если же при передаче данной кодовой комбинации возникла ошибка, то по тому, какие именно элементы исправляющего вектора отличны от нуля, можно сделать вывод о том, в каких разрядах принятой кодовой комбинации есть ошибка и, следовательно, исправить их.

Рассмотрим пример.

Построим циклический код с $n = 7$; $k = 4$. Для этого представим двучлен $1 + x^7$ в виде произведения:

$$1 + x^7 = (1 + x)(1 + x^2 + x^3)(1 + x + x^3). \quad (4)$$

В обычной алгебре это равенство, конечно, не выполняется, но если использовать для приведения подобных вместо обычного сложения операцию суммирования по модулю 2, а при сложении показателей степеней – операцию суммирования по модулю 7, то равенство окажется справедливым.

В качестве производящего многочлена возьмем $1 + x + x^3$. Умножаем его на x , x^2 и x^3 и получаем многочлены $x + x^2 + x^4$; $x^2 + x^3 + x^5$; $x^3 + x^4 + x^6$. Затем записываем производящую матрицу G , причем в каждой строке матрицы младший разряд кодовой комбинации расположен первым слева.

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Далее формируем набор из 16 допустимых кодовых комбинаций:

00000000, 1101000, 0110100, 0011010, 0001101, 1011100, 0101110, 0010111, 1000110, 0100011, 1111111, 1010001, 1000110, 0100011, 1001011.

В этих записях младшие биты слева, а старшие – справа.

Перемножив первые два сомножителя в (4), получаем производящий многочлен для исправляющей матрицы: $1 + x + x^2 + x^4$. Затем умножаем его на x и x^2 и получаем еще две строки этой матрицы, которая в результате имеет такой вид (в отличие от матрицы G , здесь младшие разряды соответствующих полиномов расположены справа):

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Пусть принята кодовая комбинация 0001101, входящая в набор допустимых. Найдем скалярные произведения этой кодовой комбинации со всеми строками матрицы H :

$$\begin{aligned}
(0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1)(0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1) &= 0\oplus0\oplus0\oplus0\oplus1\oplus0\oplus1 = 0; \\
(0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1)(0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0) &= 0\oplus0\oplus0\oplus0\oplus1\oplus1\oplus0\oplus0 = 0; \\
(0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1)(1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0) &= 0\oplus0\oplus0\oplus0\oplus1\oplus1\oplus0\oplus0 = 0.
\end{aligned}$$

Пусть теперь принята кодовая комбинация 0001100, в которой последний (старший) бит содержит ошибку. Скалярные произведения принятой кодовой комбинации на строки исправляющей матрицы имеют вид:

$$\begin{aligned}
(0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0)(0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1) &= 0\oplus0\oplus0\oplus0\oplus1\oplus0\oplus0 = 1; \\
(0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0)(0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0) &= 0\oplus0\oplus0\oplus0\oplus1\oplus1\oplus0\oplus0 = 0; \\
(0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0)(1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0) &= 0\oplus0\oplus0\oplus0\oplus1\oplus1\oplus0\oplus0 = 0.
\end{aligned}$$

Таким образом, получен синдром (1, 0, 0). Если ошибка оказывается в другом бите кодовой комбинации, то получается другой синдром.

Одним из важных достоинств циклических кодов является возможность построения кодирующих и декодирующих устройств в виде сдвиговых регистров с обратными связями через сумматоры по модулю 2.

Различные виды циклических кодов получаются с помощью различных производящих полиномов. Среди большого количества циклических кодов к числу наиболее эффективных и широко используемых относятся ВСН-коды. Например, ВСН-код (63, 44), используемый в системе спутникового цифрового радиовещания, позволяет исправить 2 или 3 ошибки, обнаружить 4 или 5 ошибок на каждый блок из 63 символов. Относительная скорость такого кода равна $R = 44/63 = 0,698$.

Одним из видов ВСН-кодов являются коды Рида-Соломона. Эти коды относятся к недвоичным кодам, так как символами в них могут быть многоразрядные двоичные числа, например, целые байты. В Европейском стандарте цифрового телевидения DVB используется код Рида-Соломона, записываемый как (204, 188, 8), где 188 количество информационных байтов в пакете транспортного потока MPEG-2, 204 – количество байтов в пакете после добавления проверочных символов, 8 – минимальное кодовое расстояние между допустимыми кодовыми комбинациями. Таким образом, в качестве кодовых комбинаций берутся целые пакеты транспортного потока, содержащие $188 \times 8 = 1504$ информационных бита, а добавляе-

мые проверочные символы содержат $16 \times 8 = 128$ битов. Относительная скорость такого кода равна 0,92. Этот код Рида-Соломона позволяет эффективно исправлять до 8 принятых с ошибками байтов в каждом транспортном пакете.

Отметим также, что используемый в цифровом телевизионном вещании код Рида-Соломона часто называют укороченным. Смысл этого термина состоит в следующем. Из теории кодов Рида-Соломона следует, что если символом кода является байт, то полная длина кодового слова должна составлять 255 байтов (239 информационных и 16 проверочных). Однако пакет транспортного потока MPEG-2 содержит 188 байтов. Чтобы согласовать размер пакета с параметрами кода, перед кодированием в начало каждого транспортного пакета добавляют 51 нулевой информационный байт, а после кодирования эти дополнительные нулевые байты отбрасываются.

В приемнике для каждого принятого транспортного пакета, содержащего 204 байта, вычисляются синдромы и находятся два полинома: «локалатор», корни которого показывают положение ошибок, и «корректор», дающий значение ошибок. Ошибки корректируются, если это возможно. Если же коррекция невозможна (например, ошибочных байтов более 8) данные в пакете не изменяются, а сам пакет помечается путем установки флага (первый бит после синхробайта) как содержащий неустранимые ошибки. В обоих случаях 16 избыточных байтов удаляются, и после декодирования длина транспортного пакета становится равной 188 байтов.

Сверточные коды

Другой класс корректирующих кодов, используемых в современном цифровом телевидении, – это сверточные коды, основанные на преобразовании входной бесконечной последовательности двоичных символов в выходную бесконечную последовательность двоичных символов, в которой на каждый символ входной последовательности приходится более одного символа. Увеличение количества передаваемых двоичных символов при использовании сверточных кодов характеризуется относительной скоростью кода, иногда называемой просто «скоростью кода»,

$$R = Q_{\text{вх}}/Q_{\text{вых}} = k/n ,$$

где $Q_{\text{вх}}$ и $Q_{\text{вых}}$ – скорости передачи двоичных символов на входе и выходе кодера, соответственно, k – число битов входной последовательности, преобразуемых в n битов выходной последовательности.

Пример сверточного кодера приведен на Рис. 3.

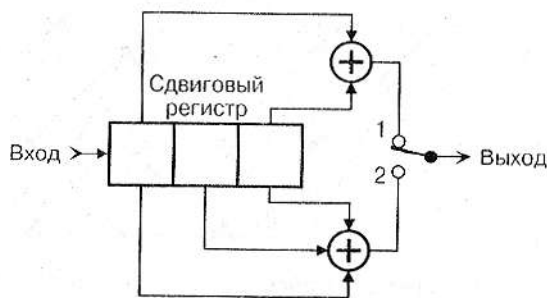


Рис. 3. Реализация сверточного кодера.

Кодер содержит трехразрядный сдвиговый регистр, на вход которого поступает входная последовательность двоичных символов. На каждый такт биты в ячейках регистра сдвигаются на шаг вправо, причем очередной бит входной последовательности записывается в первую слева ячейку, а бит из крайней справа ячейки выбрасывается. Выходы разрядов регистра подключены ко входам двух сумматоров по модулю 2. Выходная последовательность двоичных символов формируется с помощью коммутатора, который на каждый такт входной последовательности сначала передает на выход бит с верхнего сумматора (точка 1), а потом – с нижнего (точка 2). Таким образом, на каждый бит входной последовательности формируются два бита выходной последовательности, т.е. относительная скорость этого кода $R = 1/2$.

Важный параметр сверточных кодов – кодовое ограничение, обозначаемое K . Этот параметр показывает, сколько групп по k -битов содержится в сдвиговом регистре и, следовательно, одновременно участвует в формировании битов выходной последовательности. В рассматриваемом примере $k = 1$, $K = 3$.

Работа сверточного кодера поясняется решетчатой диаграммой (Рис. 4).

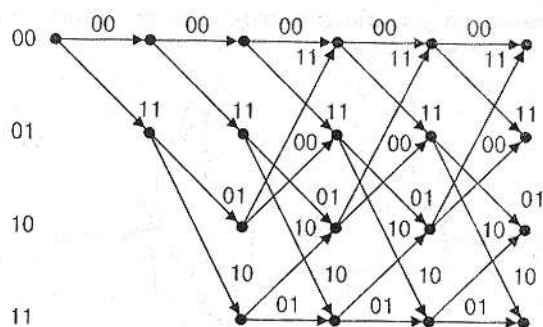


Рис. 4. Решетчатая диаграмма.

Каждый двоичный символ входной последовательности преобразуется в пару двоичных символов выходной последовательности, определяемую двоичным символом входной последовательности и текущим состоянием кодирующего устройства. Таких состояний может быть четыре: 00, 01, 10 и 11.

Каждому состоянию соответствует горизонтальный ряд узлов на диаграмме. Из каждого узла, соответствующего текущему состоянию, выходят две ветви. Верхняя (на Рис. 4.) ветвь соответствует двоичному символу «0» входной последовательности, а нижняя ветвь – двоичному символу «1». Пара цифр у каждой ветви показывает пару двоичных символов выходной последовательности, формируемых при данном переходе кодирующего устройства из одного состояния в другое. Полученная структура переходов кодирующего устройства образует решетку, поэтому такие коды часто называются «решетчатыми».

Если входная последовательность состоит из одних нулей, то и выходная последовательность также содержит только нули. Пусть входная последовательность содержит один единичный бит, а остальные – равные нулю:

....0 0 1 0 0 0

С помощью структурной схемы кодера и решетчатой диаграммы построим выходную последовательность:

.... 00 00 11 01 11 00 00 ...

Эта последовательность содержит 5 единиц, поэтому расстояние Хемминга между ней и последовательностью из одних нулей равно 5. Изучение свойств рассматриваемого сверточного кода показывает, что расстояние Хемминга между выходными последовательностями, получающимися из различных входных и не содержащими ошибок, оказывается не менее 5. Вообще, расстояние между выходными последовательностями возрастает с уменьшением R и увеличением K .

Для декодирования сверточных кодов чаще всего применяется алгоритм Витерби, который позволяет из множества возможных путей, приводящих к последнему декодируемому символу принятой последовательности, выбрать относительно небольшое число путей, являющихся наиболее правдоподобными, и определить правильное значение символа исходной последовательности.

В системе цифрового телевидения DVB при передаче по спутниковым и наземным каналам связи используется сверточное кодирование со следующими параметрами:

- кодовое ограничение $K=7$;
- относительные скорости кода $R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$.

В стандартах цифрового телевидения, как правило, используется каскадное кодирование (Рис.5), т.к. в используемых каналах связи частота ошибок может быть настолько велика, что код Рида-Соломона не обеспечивает необходимой помехоустойчивости. Сначала пакеты транспортного потока кодируются кодом Рида-Соломона (внешнее кодирование), а затем полученная последовательность двоичных символов кодируется с применением сверточных кодов (внутреннее кодирование). Коды называются «внутренним» и «внешним» в зависимости от того, какое положение по отношению к каналу передачи они занимают.

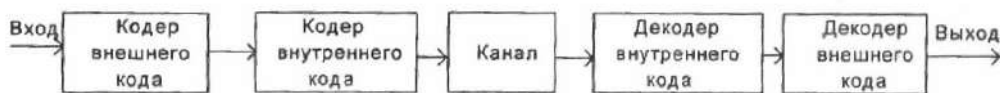


Рис. 5. Канальное кодирование.

Каскадное кодирование обеспечивает эффективную защиту от ошибок при передаче сигналов цифрового телевидения. При отношении сигнал/помеха (по мощности), равном 3 Дб, относительная частота ошибок на входе декодера решетчатого кода составляет $10^{-1} \dots 10^{-2}$, на выходе же этого декодера она уменьшается примерно до 2×10^{-4} , а на выходе декодера Рида-Соломона – от 10^{-10} до 10^{-11} . Интересно оценить, как близко это значение к теоретическому пределу, и существуют ли практические коды с лучшими энергетическими характеристиками. Согласно известной теории Шеннона, информация по каналу с ошибками при выборе соответствующего кода может быть передана со сколько угодно высокой достоверностью, если скорость передачи не превышает пропускной способности канала. Еще один важный вывод из теории информации – исправляющие свойства кода тем выше, чем ближе кодовые слова к случайной последовательности. Исследования показывают, что для канала с аддитивным белым шумом предельная оценка на 3 дБ ниже достигнутой для данного каскадного кода.

При передаче по каналам с ограниченной полосой (типовой режим для вещательных каналов) метод кодирования для достижения максимальной эффективности должен учитывать также и выбранную схему модуляции.

В середине 90-х годов был предложен новый класс кодов – так называемые турбокоды, которые еще на 1,5–2,5 дБ приблизились к теоретическому порогу [7.3.1.]. Основная идея этого кода, как и каскадного, кодирование исходной символьной последовательности не одним, а несколькими кодерами, однако соединенными не последовательно (каскадно), а параллельно. При таком соединении устраняется одна из причин более низкой эффективности каскадного кода – кодирование внутренним кодером как информационных, так и проверочных битов внешнего.

Типовая структурная схема турбокодера содержит несколько параллельных ветвей, состоящих из каскадно соединенных перемежителя и кодера. В практических схемах турбокодеров обычно используются два кодера и один перемежитель, как показано на Рис. 6.

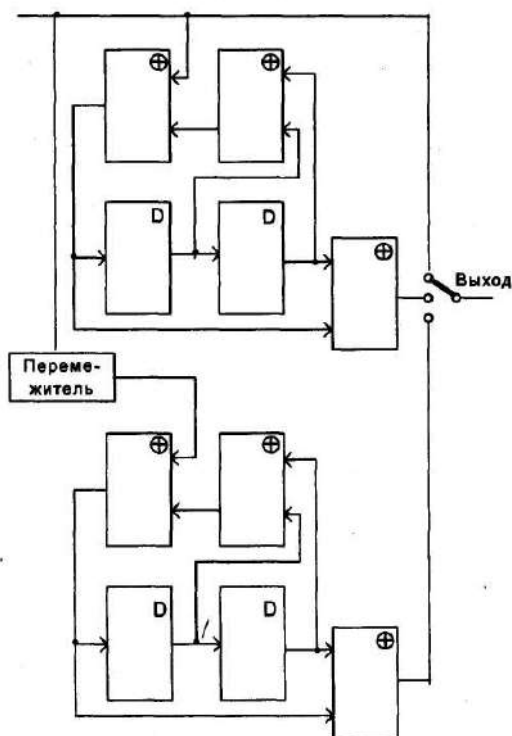


Рис. 6. Турбокодер.

В качестве последнего могут использоваться блочные кодеры Хэмминга, Рида-Соломона, сверточные кодеры, построенные по схеме рекурсивного систематического кодера. Мы упоминали, что «рекурсивным» называется устройство, у которого имеется обратная связь с выхода на вход. Рекурсивный сверточный кодер приобретает важное свойство, необходимое для турбокодирования: он становится систематическим, т.к. входная последовательность напрямую проходит на один из выходов. Если теперь в распределительном устройстве на входе добавлять к каждой последовательности из k битов хвостовую часть из $n-k$ битов, переводящую кодер в исходное нулевое состояние, его можно рассматривать как блочный с длиной блока n . Здесь за основу взят простейший сверточный код с $R=1/2$ и $K=3$, показанный ранее на Рис.3, у которого один из выходов соединен со входом. Результирующая скорость кода составляет $1/3$ (на каждый информационный бит приходится по одному проверочному

от каждого из кодеров) и может быть увеличена (например, до $1/2$) путем перфорирования некоторых проверочных битов с выходов обоих кодеров. Разумеется, ценой увеличения скорости передачи будет при этом некоторое снижение корректирующей способности.

Кодеру, показанному на схеме Рис. 6, соответствует декодер, схема которого изображена на Рис. 7.



Рис. 7. Турбодекодер.

Декодирование турбокода базируется на оценке вероятностей различных кодовых слов или различных путей на решетчатой диаграмме. Используется как априорная, так и апостериорная информация о событии. Исходная информационная последовательность и первая проверочная последовательность с выхода демультиплексора поступают на вход первого декодера, на его выходе формируется мягкое решение о принятой последовательности, и оно вместе с проверочными битами второго кодера поступает на вход второго декодера. Ключевой особенностью турбокодирования, благодаря которой оно и получило свое название, является итеративное повторение циклов декодирования, при котором результат каждой итерации совместно с проверочными битами служит исходным сигналом для следующей. Компьютерное моделирование показывает, что при числе итераций до 18 и длине блока 65 536 битов обеспечивается вероятность ошибки 10^{-5} при отношении сигнал/шум равном 0,7 дБ.

Турбокоды показали высокие результаты в помехоустойчивом кодировании уже после того, как были выбраны методы модуляции и кодиро-

вания для основных систем цифрового вещания, поэтому они получили применение лишь в новых стандартах цифрового вещания.

7.4. МЕТОДЫ МОДУЛЯЦИИ

Главная особенность модуляции несущей цифровыми сигналами заключается в том, что модулируемый параметр несущей может принимать в результате модуляции ряд дискретных значений. Такую модуляцию называют «манипуляцией». Параметры несущего колебания меняются дискретно и во времени. Интервал времени, в течение которого эти параметры остаются постоянными, называется «символьным интервалом» или «интервалом канального символа». В течение каждого символьного интервала передается один бит или, одновременно, несколько битов, образующих канальный символ [7.4.1.].

Рассмотрим вопрос о возможности одновременного выполнения требований эффективного использования полосы частот канала связи и обеспечения помехоустойчивости. Эти требования взаимно противоположны. Для повышения эффективности использования полосы частот канальный символ должен содержать по возможности больше битов передаваемой информации. Для этого в каждый момент времени сигнал в канале связи должен иметь не 2, а больше возможных значений. В случае применения амплитудной манипуляции это достигается наличием соответствующего количества уровней амплитуды несущей, при частотной манипуляции должно быть соответствующее количество возможных значений частоты, при использовании фазовой – возможных значений фазы сигнала и т.д.

Очевидно, что при этом ухудшится помехоустойчивость системы, т.к. приемник должен будет одновременно различать не два, а больше значений сигнала. Чтобы обеспечить уверенное различение требуемого количества уровней сигнала необходимо увеличивать отношение сигнал/шум в канале связи, т.е. наращивать мощность передатчика. Это соот-

ветствует основным положениям теории связи – для увеличения пропускной способности канала связи при фиксированной ширине полосы частот необходимо повышать отношение сигнал/шум.

Перейдем к изучению конкретных способов модуляции несущей цифровым сигналом.

Амплитудная манипуляция (**АМ**) заключается в дискретном изменении уровня амплитуды несущей. В простейшем случае одному уровню сигнала может соответствовать наличие несущей, а другому – отсутствие. Недостатком АМ являются значительные перепады излучаемой мощности.

Частотная манипуляция (**ЧМ**) осуществляется путем дискретного изменения частоты несущей при постоянной ее амплитуде.

Фазовая манипуляция (**ФМ**) заключается в дискретном изменении фазы несущей. В простейшем случае несущая может иметь два значения фазы: 0 и 180° . В приемнике может осуществляться как когерентное детектирование, требующее фазовой синхронизации приемника с передатчиком, так и более простое некогерентное детектирование. В последнем случае часто применяют относительную фазовую манипуляцию, при которой фаза несущая для каждого принятого символа сравнивается не с некоторой абсолютной начальной фазой, а с фазой несущей предыдущего принятого символа.

Для повышения эффективности использования полосы частот канала связи применяется многопозиционная ФМ. На Рис. 1, а показана четырехпозиционная ФМ, при которой одновременно передаются два бита, что позволяет повысить эффективность использования полосы частот в два раза. Пример соответствия фазы несущей передаваемому трехразрядному двоичному коду для восьмипозиционной ФМ приведен на Рис. 1, б. Сдвиг между дискретными значениями фазы несущей равен 45° . Эффективность использования полосы частот в этом случае повышается в три раза по сравнению с простой двухпозиционной ФМ.

При распределении передаваемых кодовых комбинаций по позициям используют манипуляционный код Грея – соседние позиции разли-

чаются одним битом. Благодаря этому, если при демодуляции под действием помехи вместо правильного значения фазы будет определено соседнее, в последовательности двоичных символов на выходе демодулятора получится только один ошибочный бит, который будет исправлен в декодере корректирующего кода.

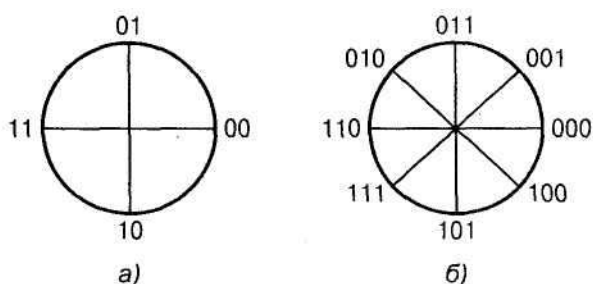


Рис. 1. Распределение фаз при многопозиционной ФМ.

Фазовая манипуляция используется в стандарте DVB-S, определяющем методы передачи цифрового телевидения по спутниковым каналам.

Следующий вид модуляции, часто применяемый для передачи цифровых сигналов, – многопозиционная квадратурная амплитудная манипуляция (КАМ).

Как известно, квадратурная амплитудная модуляция заключается в одновременной амплитудной модуляции двумя сигналами $u_i(\text{inphase})$ и $u_Q(\text{quadrature})$ двух квадратурных составляющих несущей с частотой ω_0 и получении суммарного сигнала:

$$u(t) = u_i(t) \cos \omega_0 t + u_Q(t) \sin \omega_0 t ,$$

где $u_i(t) = S(t)\cos\varphi(t)$, а $u_Q(t) = S(t)\sin\varphi(t)$.

Квадратурные составляющие получаются расщеплением исходной информационной последовательности на четные и нечетные символы.

Для демодуляции используется синхронное детектирование, состоящее в умножении сигнала $u(t)$ на $\cos\omega_0 t$ и $\sin\omega_0 t$ с последующим подавле-

нием высокочастотных составляющих фильтром НЧ. В результате выделяются, соответственно, $u_i(t)$ и $u_Q(t)$.

Сама по себе квадратурная амплитудная модуляция уже обеспечивает увеличение эффективности использования полосы частот в два раза, так как на одной несущей частоте одновременно передаются 2 сигнала. В случае КАМ уровни каждой квадратурной составляющей несущей изменяются дискретно.

На Рис. 2 показана 4-позиционная КАМ, при которой каждая квадратурная составляющая может иметь два возможных уровня.

В случае, показанном на Рис. 2,а, каждая составляющая может или отсутствовать, или присутствовать с заданной амплитудой. В случае, приведенном на Рис. 2,б, каждая составляющая может быть в фазе, что соответствует уровню +0,5, или в противофазе, что соответствует уровню -0,5. Второй вариант предпочтительнее, т.к. в нем обеспечивается меньшее отношение пиковой мощности несущей к ее средней мощности.

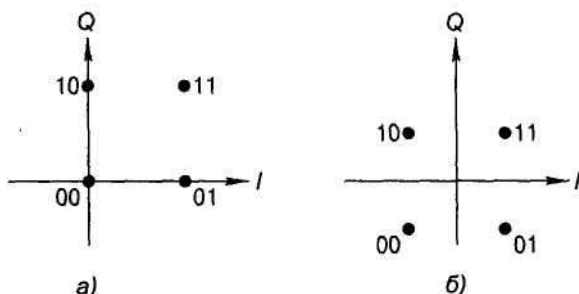


Рис. 2. Четырехпозиционная КАМ.

При дискретном модулировании не амплитуды, а фазы каждой из двух квадратурных составляющих получим квадратурную фазовую манипуляцию (КФМ). Сигнал, получаемый в этом случае, может быть представлен соотношением:

$$\cos(\omega_0 t + \theta_i) + \sin(\omega_0 t + \theta_Q) = A_0 \cos(\omega_0 t + \theta_0),$$

где θ_i , θ_Q – фазы квадратурных составляющих, A_0 , θ_0 – амплитуда и фаза результирующего сигнала. В Таблице 1 приведены значения фазы резуль-

тирующего сигнала в случае, когда квадратурные составляющие модулируются по фазе двухуровневыми сигналами.

Таблица 1.

θ_1	0	0	π	π
θ_0	0	π	0	π
θ_0	$\pi/4$	$-\pi/4$	$3\pi/4$	$-3\pi/4$

Распределение фаз при (КФМ).

В моменты времени, когда меняются фазы обеих квадратурных составляющих, фаза θ_0 может меняться скачком на 180° . Это приводит к возникновению паразитной амплитудной модуляции при прохождении сигнала с КФМ через частотно-зависимые цепи. Для устранения этого нежелательного эффекта используют квадратурно-фазовую манипуляцию со сдвигом (**КФМС**). Сущность ее заключается в том, что фазы двух квадратурных составляющих изменяются в разные моменты времени, и возможность скачка фазы суммарного сигнала на 180° исключается.

От формы модулирующих сигналов в каналах зависит наличие или отсутствие межсимвольных помех и общая ширина полосы частот, занимаемая ФМ сигналом. Обычные прямоугольные сигналы в этом смысле далеко не оптимальны [7.4.2.]. Существенного сужения спектра удастся добиться скруглением элементарных модулирующих сигналов. Наиболее часто применяют спектры Найквиста с так называемым «косинусным скруглением». На Рис. 3 приведены частные случаи спектра Найквиста.

Коэффициент α характеризует степень скругления спектра. Условием отсутствия межсимвольных помех является передача символов со скоростью $1/T$. Сравнение свойств различных сигналов удобно производить, используя их геометрическое представление. Многомерные сигналы можно изобразить в виде точек (концов векторов) на плоскости. На Рис. 4 показаны типичные ансамбли сигналов с ФМ и КАМ.

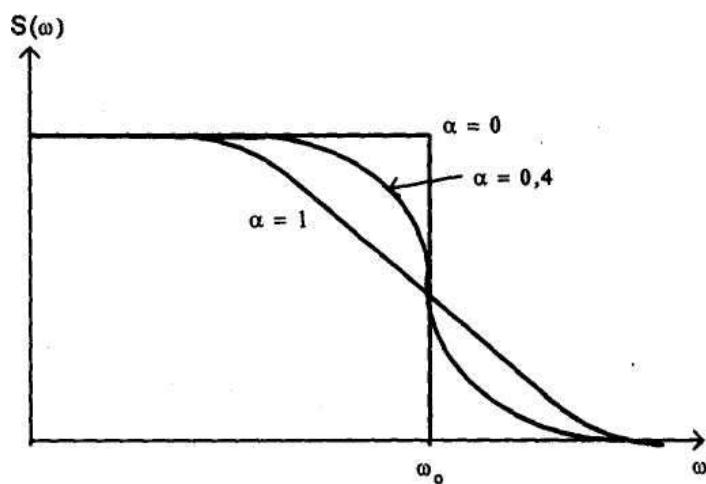


Рис. 3. Спектры Найквиста для различных коэффициентов скругления.

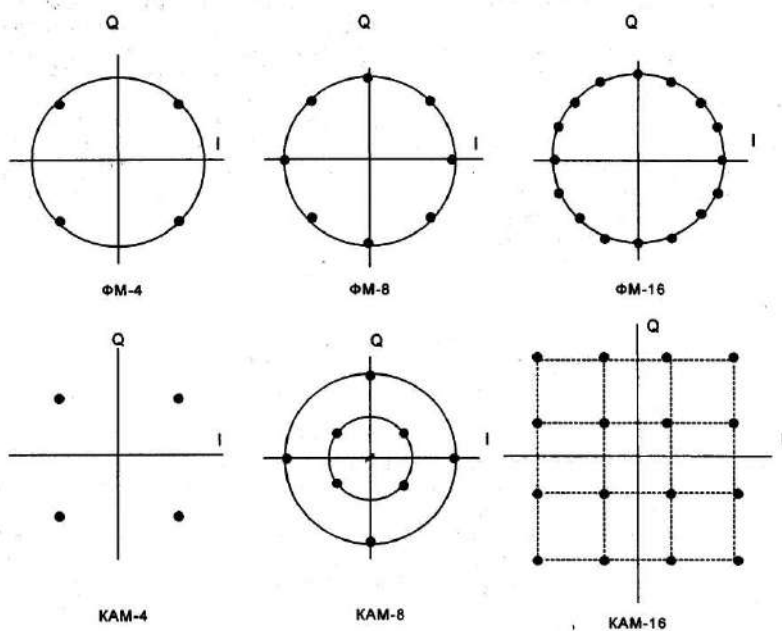


Рис. 4. Типичные ансамбли сигналов с ФМ и КАМ.

Пространство сигналов модулированной несущей представляет собой дискретные положения вершин суммарного вектора $(I+Q)$ в системе координат I, Q . В случае ФМ-4 векторы I и Q имеют одинаковые и

постоянные амплитуды, дискретно меняются только фазы, которые могут принимать значения 0° или 180° – для вектора I и 90° и 270° – для вектора Q . При этом энергия ФМ сигналов в процессе модуляции не меняется, и вершины суммарного вектора $I+Q$ при переходе от одного фазового положения до другого описывают окружность (Рис. 4). В случае КАМ концы сигнальных векторов располагаются в узлах прямоугольной решетки. Нетрудно увидеть, что при $M = 4$ векторы **ФМ-4** и **КАМ-4** совпадают.

Зависимости вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ от отношения сигнал/шум для некоторых видов модуляции приведены на Рис.5. Видно, что сигналы КАМ при одинаковой кратности обладают лучшей помехоустойчивостью. Это объясняется более равномерным расположением сигнальных точек по всему сигнальному пространству, что обеспечивает большие значения минимального расстояния. С другой стороны, полная энергия КАМ сигнала меняется во времени, поэтому он менее пригоден для работы в режиме насыщения спутникового ретранслятора.

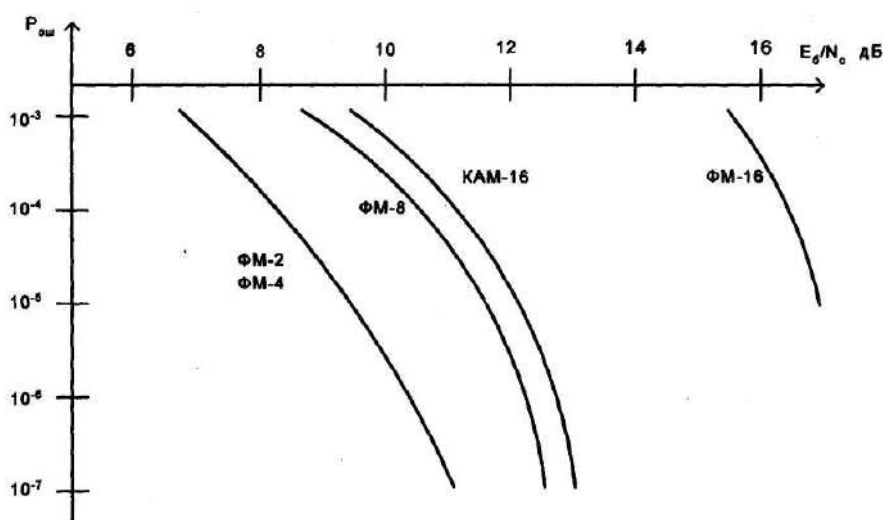


Рис. 5. Зависимости вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ от отношения сигнал/шум.

Прием сигналов, модулированных описанными выше методами, существенно отличается от приема сигналов с привычными видами аналоговой модуляции. Структурная схема приемника сигналов с многопозицион-

ной ФМ, КАМ или КФМ показана на Рис.6. На вход этой схемы поступает сигнал на промежуточной частоте (ПЧ). Этот сигнал проходит автоматическую регулировку усиления (АРУ), которая для ФМ и КФМ необязательна [7.4.1.].

Далее из сигнала восстанавливается несущая частота, приведенная к диапазону ПЧ. Восстановление несущей выполняется с использованием фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Однако, по сравнению, например, с восстановлением цветовой поднесущей в декодерах PAL, в данном случае задача более сложная, так как пилот-сигнал отсутствует. Помимо несущей частоты в приемнике восстанавливается тактовая синхронизация, т.е. выделение интервалов времени передачи отдельных канальных символов (символьных интервалов) с учетом задержки распространения сигнала от передатчика до приемника. Если в составе сигнала не передается никаких дополнительных составляющих, обеспечивающих тактовую синхронизацию, а в большинстве случаев это именно так, то последняя восстанавливается непосредственно из принимаемого сигнала. Так же, как и при восстановлении несущей, для этого используются схемы с обратными связями типа ФАПЧ.

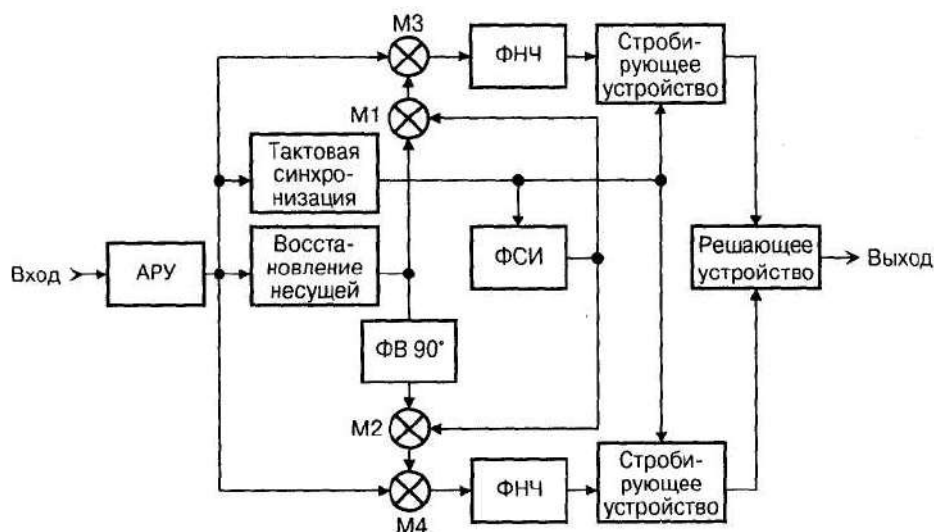


Рис. 6. Структурная схема приемника сигналов с многопозиционной ФМ, КАМ, КФМ.

На выходе блока восстановления несущей формируется сигнал первой квадратурной составляющей. Фазовращатель на 90° (ФВ 90°) формирует из этого сигнала вторую квадратурную составляющую. Формирователь сигнальных импульсов (ФСИ), управляемый сигналами тактовой синхронизации, вырабатывает импульсы для «взвешивания» сигнала, принимаемого в течение символьного интервала. В простейшем случае сигнальные импульсы могут иметь прямоугольную форму. Лучше, однако, применять импульсы, спектр которых имеет форму отрезка: косинусоиды или гауссоиды.

Сигнальные импульсы перемножаются в умножителях М1 и М2 с квадратурными составляющими несущей. Полученные пачки колебаний, в свою очередь, перемножаются с принимаемым сигналом в умножителях М3 и М4, выходные сигналы которых проходят фильтры нижних частот ФНЧ. В результате выделяются квадратурные составляющие принятого сигнала. Строблирующие устройства, управляемые сигналами тактовой синхронизации, выделяют в каждом символьном интервале отрезки сигнала для принятия решения о принимаемом канальном символе.

Решающее устройство анализирует данные, поступающие на него со стробирующих устройств, сравнивает параметры квадратурных составляющих принятого сигнала в данном символьном интервале с параметрами квадратурных составляющих сигналов, получающихся при передаче всех возможных канальных символов для данного способа модуляции, и выбирает канальный символ, дающий модулированный сигнал с наиболее близкими к принятому сигналу параметрами. Выбранный символ выдается на выход приемника.

Один из современных методов передачи цифровых сигналов по радиоканалам – ортогональное частотное мультиплексирование. В англоязычной технической литературе такая модуляция называется OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex). Сущность этого метода поясняется на Рис. 7.

В стандартном канале телевизионного вещания, имеющем ширину полосы частот ΔF_K , формируют N несущих частот, отстоящих друг от друга на равных частотных интервалах Δf .

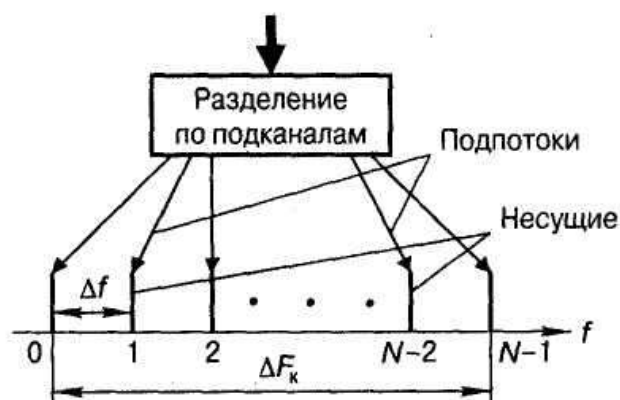


Рис. 7. Принцип OFDM.

Числа у оси частот показывают номера несущих от 0 до $N-1$. Общий поток передаваемых цифровых данных, имеющий скорость передачи двоичных символов Q_0 , разделяют на N параллельных подпотоков, каждый из которых имеет скорость передачи двоичных символов $d = Q_0/N$.

Каждый подпоток передается на своей несущей, например, с использованием КАМ. Таким образом, в одном канале телевизионного вещания получается N узкополосных подканалов. Количество несущих в соответствии со стандартом DVB-T может быть равно 6817 ($\Delta f = 1116$ Гц) или 1705 ($\Delta f = 4464$ Гц). Выбор частотных интервалов между несущими осуществляется так, чтобы соседние несущие колебания были ортогональны на отрезке времени, в течение которого передается один символ. Это позволяет избежать взаимного влияния соседних подканалов.

Модуляция и демодуляция выполняются с помощью ДПФ. При модуляции берутся одновременно передаваемые символы всех N подканалов и производится обратное ДПФ полученного набора из N чисел. В результате получаются другие N чисел, которые последовательно преобразуются в аналоговую форму. Не вдаваясь в математические подробности, примем факт, что эти другие N чисел эквивалентны отсчетам сигнала, содержащего N несущих колебаний, промодулированных в соответствии с передаваемыми в этот момент времени в соответствующих подканалах

символами. Полученный таким образом аналоговый сигнал может быть обычным способом перенесен в нужный частотный диапазон.

При демодуляции принятый сигнал переносится на промежуточную частоту и преобразуется в цифровую форму. Затем в группах по N отсчетов принятого сигнала выполняется прямое ДПФ, в результате которого получаются значения символов, одновременно передаваемых в N подканалах.

Данный метод передачи имеет следующие достоинства:

- равномерное распределение энергии по полосе частот канала связи;
- возможность передавать наиболее важную часть информации (синхронизацию, НЧ-составляющие сигнала яркости) на тех участках полосы частот, где меньше всего уровень помех от соседних каналов, а области полосы частот канала, соответствующие несущим изображения и звука обычного телевизионного вещания, вообще не использовать;
- благодаря тому, что каждый из подканалов является узкополосным, уменьшается влияние отраженных сигналов при многолучевом приеме. Последнее свойство особенно важно, т.к. многолучевой прием создает значительные сложности для цифрового телевизионного вещания в городах. При использовании OFDM длительности интервалов времени, в течение которых передаются отдельные символы, увеличиваются и становятся больше, чем времена задержек отраженных сигналов, в результате чего обеспечивается безошибочный прием.

Кроме того, для исключения влияния отраженных сигналов вводятся защитные интервалы. На Рис.8,а показаны отрезки времени, в течение которых на модулятор одной из несущих поступают символы передаваемого подпотока данных S_1 , S_2 , S_3 и т.д. (в зависимости от используемого метода модуляции несущих количество битов в символе может быть различным). Перед началом передачи символа S_2 формируется защитный интервал Δ_1 (Рис.8,б), в течение которого на входе демодулятора в приемнике еще могут присутствовать отраженные сигналы, содержащие предыдущий символ S_1 (Рис.8,в). Затем в течение интервала времени T_{p2} передается символ S_2 . Аналогично формируется защитный интервал Δ_2 перед символом S_3 и т.д.

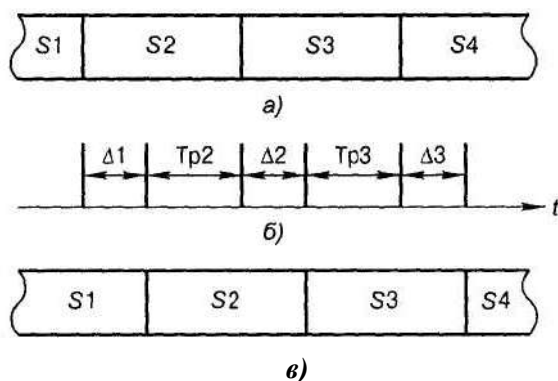


Рис. 8. Формирование защитных интервалов.

В современных системах передачи цифровых сигналов, в том числе в системах цифрового телевидения, модуляцию несущей совмещают с помехоустойчивым кодированием. При этом число возможных состояний несущей после модуляции превышает число символов, которые должны быть переданы, т.е. вводится дополнительная избыточность, обеспечивающая повышение помехоустойчивости. Такую модуляцию, совмещенную с кодированием, называют «кодированной модуляцией» (Coded Modulation). В частности, сочетание помехоустойчивого кодирования с OFDM называют **COFDM** (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex).

Таким образом, при передаче сигналов цифровой системы телевидения по радиочастотным каналам связи используются две ступени помехоустойчивого кодирования. На первой ступени, называемой «внешней», осуществляется кодирование цифровой информации с помощью кодов Рида-Соломона, как это было описано в предыдущем разделе. На второй ступени, называемой «внутренней», используется канальное кодирование, совмещенное с модуляцией. В результате достигается требуемая помехоустойчивость.

7.5. СТАНДАРТЫ СПУТНИКОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ DVB-S/S2

Принципы спутникового вещания

Спутниковое телевизионное вещание (СТВ) является сегодня одним из самых экономичных и надежных способов передачи телевизионных сигналов высокого качества в любую точку мира. К преимуществам СТВ относятся: возможность приема сигнала практически неограниченным числом приемных установок, независимость затрат на приемную установку от расстояния между источником телевизионного сигнала и абонентом (в пределах зоны обслуживания), незначительное влияние атмосферы и географических особенностей местности на устойчивость приема [7.5.1.].

Эти преимущества обусловили развитие во многих странах мира работ по созданию СТВ. Некоторые системы рассчитаны на прием телевизионных сигналов непосредственно на простые индивидуальные или коллективные приемные установки с малой антенной и относятся к радиовещательной спутниковой службе (РСС или BSS). Это так называемые «спутники» непосредственного телевизионного вещания (НТВ).

В то же время многими странами широко используются системы подачи и распределения телевизионных программ через спутники малой и средней мощности, относящиеся к фиксированной спутниковой службе (ФСС или FSS). Первоначально эти системы обеспечивали прием телевизионных сигналов на головные станции кабельных сетей или эфирные ретрансляторы для последующего распределения абонентам.

Все вещательные спутники размещаются на так называемой **геостационарной орбите** – круговой орбите высотой **35 786** км в плоскости экватора. Находясь на ней, спутник неподвижен относительно поверхности Земли, т.к. вращается с той же угловой скоростью, что и Земля. Зона видимости геостационарного спутника – около одной трети земной поверхности. В то же время современные технические средства позволяют сформировать достаточно узкий управляемый луч электромагнитной энергии,

охватывающий сравнительно небольшую часть земной поверхности. Линии пересечения земной поверхности и конического луча передающей антенны спутника определяют границы зоны покрытия при различных диаметрах приемной антенны земной станции. Очевидно, что чем дальше находится антенна от центра зоны, тем больше должен быть ее диаметр. Важной характеристикой спутниковых телекоммуникационных систем является количество стволов спутникового ретранслятора. Весь диапазон частот, в котором работают спутники, принято делить на некоторые полосы частот шириной 27...36, 72...120 МГц, в которых усиление радиосигналов осуществляется отдельным стволом. Вместо этого термина часто применяется английское название – «транспондер». Радиосигналы этих стволов разделяются по частоте, пространству, поляризации.

В спутниковом телевидении уровень излучаемого со спутника сигнала принято характеризовать произведением мощности подводимого к передающей антенне сигнала на коэффициент ее усиления (в дБ) относительно изотропного (всенаправленного) излучателя. Эту характеристику называют эквивалентной изотропно-излучаемой мощностью (**ЭИИМ**) и измеряют в дБ на ватт. Исследования показали, что значение ЭИИМ, равное 52 дБВт, является оптимальным с точки зрения стоимости абонентского спутникового приемника и удобства его установки, зоны обслуживания, количества стволов (транспондеров) на одном спутнике и себестоимости одного ствола. Например, для обеспечения такого значения ЭИИМ мощность бортового спутникового передатчика должна составлять 190–260 Вт в зависимости от позиции на геостационарной орбите.

Уровень сигнала в точке приема определяется плотностью потока мощности у поверхности Земли относительно потока мощности 1 Вт, проходящего через 1 м² (дБВт/м²).

Для спутникового вещания выделены специальные участки радиочастотного спектра в сантиметровом диапазоне волн. Земной шар разделен на три района. Европа, Африка, Россия, страны СНГ и Монголия входят в Район 1. В целом для систем спутникового телевизионного вещания выделены полосы частот, представленные в Таблице 1.

Таблица 1.

**Участки радиочастотного спектра
в сантиметровом диапазоне волн.**

Наименование диапазона	Полоса частот, ГГц
<i>L</i> -диапазон	1,452...1,55 и 1,61...1,71
<i>S</i> -диапазон	1,93...2,7
<i>C</i> -диапазон	3,40...5,25 и 5,725...7,075
<i>X</i> -диапазон	7,25...8,40
<i>Ku</i> -диапазон	10,70...12,75 и 12,75...14,80
<i>Ka</i> -диапазон	15,4...26,5 и 27,0...50,2
<i>K</i> -диапазон	84...86

Два последних диапазона почти не используются и пока считаются экспериментальными. Однако вещание спутниковых телепрограмм в этих диапазонах позволяет значительно уменьшить диаметр приемных антенн. Кроме того, информационная емкость, под которой понимается количество телевизионных каналов, размещаемых в данном диапазоне частот, значительно выше. Основная проблема в освоении этих диапазонов – экономическая, а именно: проблема создания недорогих абонентских спутниковых приемников.

Сформулированные в Регламенте радиосвязи основные положения, касающиеся систем спутникового непосредственного телевидения, сводятся к следующему:

- в системах НТВ используются спутники-ретрансляторы, расположенные на геостационарной орбите;

- для спутниковых радиолиний Земля-спутник и спутник-Земля выделены, соответственно, фиксированные полосы частот 12,75–14,5 ГГц и 10,7... 12,5 ГГц. Это связано с тем, что на этом участке спектра влияние метеорологических условий в атмосфере мало сказывается на распространение радиоволн. При этом приемо-передающая аппаратура системы НТВ оказывается сравнительно дешевой;

- отношение сигнал-шум в системе НТВ не должна быть меньше 14 дБ;
- для увеличения объема передаваемой информации рекомендуется двукратное использование рабочих частот, что возможно благодаря развязке по поляризации.

В качестве интегрального параметра, характеризующего в целом приемное устройство спутниковых телевизионных сигналов, принят коэффициент добротности G/T , равный отношению коэффициента усиления приемной антенны G к суммарной шумовой температуре всего приемного устройства. Для установки индивидуального приема значение добротности G/T выбирается равным 6 дБ/°К, а для устройств коллективного приема спутниковых радиосигналов 14 дБ/°К.

Одной из особенностей применения спутникового вещания является ограниченность энергетического потенциала спутникового ретранслятора, поэтому здесь традиционно используют методы обработки, требующие минимального отношения сигнал/шум на входе демодулятора в обмен, например, на полосу частот сигнала. В аналоговом вещании этим обуславливался выбор частотной модуляции, а не амплитудной, а в цифровом вещании приходится применять мощное каскадное помехоустойчивое кодирование и модуляцию с невысокими кратностями ФМ-4 или QPSK.

Еще одна специфическая особенность спутникового вещательного ретранслятора – работа в нелинейном режиме вблизи точки насыщения выходного усилительного прибора (лампы бегущей волны или транзисторного усилителя), так как именно в этом режиме удастся получить максимальную выходную мощность и до предела снизить диаметр приемных антенн. Из-за существенной нелинейности работа в точке насыщения возможна только на одной несущей в стволе – это так называемый режим MCPC (Multiple Channels per Carrier – несколько каналов на одной несущей), когда цифровые потоки нескольких телевизионных программ объединяются (мультиплексируются) в общий поток и модулируют единственную несущую частоту, передаваемую с одной передающей станции. При этом нелинейный режим работы усилителя диктует использование типа модуляции с постоянной огибающей – смещенную ФМ и другие разновидности фазовой модуляции.

Альтернативный вариант – SCPC (Single Channel per Carrier – один канал на одной несущей) требует перехода в линейный (точнее: квазилинейный) режим со снижением выходной мощности на 2,5...4 дБ и неэффективен в спутниковом вещании. Он применяется в спутниковых распределительных сетях, когда в одном стволе нужно передать на сеть профессиональных приемных станций несколько телевизионных программ, источники которых территориально разнесены и не могут собрать сигналы в одной точке, а потому вынуждены строить свои собственные передающие станции.

Некоторые спутники последних разработок позволяют мультиплексировать каналы прямо на борту, обеспечивая их излучение уже в режиме MCPC.

Второй случай использования режима SCPC в спутниковом телевидении – передача телевизионного репортажа с небольшой перевозимой передающей станции. Ее энергетических возможностей обычно недостаточно для вывода ретранслятора в точку насыщения, и передача часто происходит далеко от насыщения, в линейном режиме. Этот вид передачи называется DSNG (Digital Satellite News Gathering – цифровая спутниковая видеожурналистика).

Передача цифровых сигналов MPEG-2/DVB-S по спутниковым каналам

Стандарт спутникового вещания DVB-S, принятый еще 1994 году, определяет структуру транспортных пакетов, канальное кодирование и схемы модуляции при передаче по спутниковым каналам сетей НТВ. Обработка потока MPEG-2 для использования в спутниковом вещании приведена на Рис. 1.

Транспортный поток поступает на скремблер, где происходит его суммирование с псевдослучайной последовательностью (ПСП). После скремблирования данные транспортного пакета подвергаются помехоустойчивому кодированию каскадным кодом, в котором в качестве внешнего используется укороченный код Рида-Соломона (204,188,8), в

качестве внутреннего – сверточный код. Для защиты от пакетных ошибок большой длительности в стандарте осуществляется сверточное перемежение данных с глубиной 12 байтов. В стандарте DVB-S используется сверточный кодер с длиной кодового ограничения $K = 7$ и относительными скоростями кодирования $R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$. Переключение с базовой скорости $1/2$ на другие значения осуществляется выборочным вычеркиванием (перфорированием) добавочных символов. Это несколько снижает корректирующую способность кода, но, одновременно, уменьшает и его избыточность, позволяя высвободить больше емкости для полезных данных.

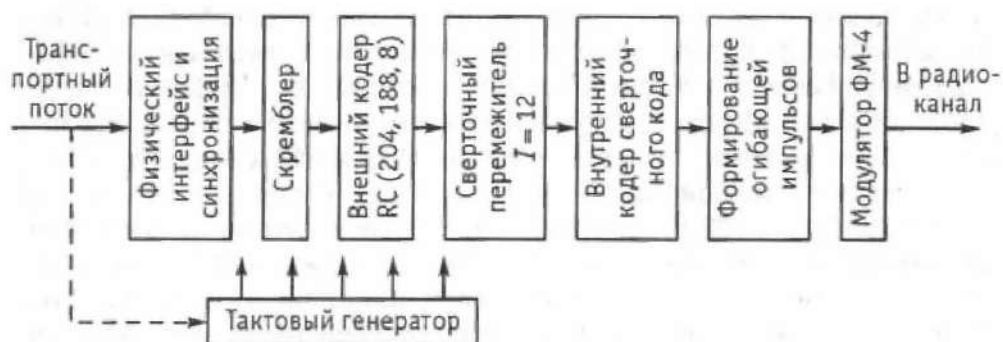


Рис. 1. Структурная схема канального DVB-S кодера.

Модуляция в DVB-S

Основным видом модуляции в стандарте DVB-S принята ФМ-4 (QPSK), хотя при ограниченном частотном ресурсе могут использоваться ФМ-8 и даже КАМ-16 (перевозимые репортажные станции).

Пропускная способность радиоканала, работающего по стандарту DVB-S, зависит от полосы пропускания ствола, вида модуляции и относительной скорости кодирования. В Таблице 2 приведены значения символьной и информационной скоростей цифрового потока при различных значениях параметров системы. Данные таблицы рассчитаны при коэффициенте запаса по полосе (отношение полосы ствола к символьной скорости), равной 1,2.

Таблица 2.

Значения символьной и информационной скоростей цифрового потока при различных значениях параметров системы.

Полоса, МГц	Символьная скорость, Мсимв/с	Информационная скорость, Мбит/с				
		1/2	2/3	3/4	5/6	7/8
54	45	41,47	55,29	62,20	69,12	72,57
46	38,3	35,33	47,10	52,99	58,88	61,82
40	33,3	30,72	40,96	46,08	51,20	53,76
36	30	27,65	36,86	41,47	46,08	48,38
33	27,5	25,34	33,79	38,01	42,24	44,35
27	22,5	20,74	27,65	31,10	34,56	36,29

Отображение битовой последовательности в пространство сигналов ФМ-4 осуществляется с помощью манипуляционного кода Грея. Перед подачей на модулятор для получения формы «скругленного косинуса» применяется фильтр с характеристикой Найквиста.

Стандарт DVB-S2

Стандарт DVB-S определяет структуру транспортных пакетов, канальное кодирование и схемы модуляции при передаче по спутниковым каналам сетей НТВ(DTH). Стандарт DVB-DSNG, появившийся на три года позже, выполняет те же задачи для сетей передачи сигнала на пункты ретрансляции и спутниковых сетей сбора новостей. Второй стандарт отличается от первого, в основном тем, что рассчитан на более слабые передатчики, не вводящие спутниковый ретранслятор в режим насыщения и поэтому допускающие использование более высоких уровней модуляции – 8PSK и 16QAM.

Стандарт DVB-S2 призван объединить обе эти области, а также решить ряд дополнительных задач.

Необходимость в пересмотре имеющихся стандартов была обусловлена несколькими причинами.

Важнейшим фактором стали планы массового запуска ТВЧ. Сегодня, когда подавляющее большинство европейских программ передается в стандартном разрешении, дефицита частотного ресурса, выделенного в Европе для ТВ-вещания через спутник, в целом не наблюдается. Но, как показывают расчеты, если все спутниковые программы будут переведены в ТВЧ, то этого ресурса окажется недостаточно даже при переходе к более совершенным системам компрессии ТВ сигнала. Таким образом, перспектива появления ТВЧ потребовала разработки форматов канального кодирования, более эффективно использующих спектр.

Вторая причина необходимости нового стандарта – неудовлетворительная работа имеющихся приемных систем с сигналами Ка-диапазона. Качество приема в этом диапазоне ощутимо зависит от погодных условий, в первую очередь, от дождя. Поэтому для трансляций в этом диапазоне часто требуется более высокая помехозащищенность, чем в С- и Ku-диапазонах.

Третья причина – появление интерактивных спутниковых сетей с адресными услугами, чему, в частности, способствовало развитие технологии точечных лучей. Такие сети требуют большого транспортного ресурса и оптимизировать его использование можно, адаптировав параметры каждого адресного потока к условиям приема конкретного адресата.

Таким образом, к новому стандарту предъявлялись следующие требования:

- повышение эффективности использования транспортного канала. То есть обеспечение возможности передачи в полосе стандартного канала больше бит полезной информации.
- предоставление расширенных возможностей обмена скорости передачи полезной информации на помехоустойчивость.
- обеспечение дифференцированного подхода к выбору транспортных параметров для разных услуг, передаваемых в одном канале.
- обеспечение совместимости с прежними стандартами и пути плавного перехода от старого оборудования к новому.

Первые два требования удалось выполнить за счет введения в стандарт более разнообразных схем модуляции, использования более эффективных систем защитного кодирования и введения дополнительных коэффициентов скругления.

Гибкость формирования канала была достигнута теми же методами, а также за счет введения режимов **VCM** (Variable Coding and Modulation) и **ACM** (Adaptive Coding and Modulation). Первый режим допускает разный уровень помехозащищенности услуг, передаваемых в одном канале, а второй – дополнительную возможность адаптации транспортных параметров к текущим условиям приема услуги. Режим ACM предназначен для сетей с обратным каналом, где приемные системы имеют возможность переправлять на головную станцию информацию об условиях приема.

В результате был создан универсальный стандарт, на базе которого могут строиться сети для распространения ТВ-программ стандартной или высокой четкости, сети для предоставления интерактивных услуг, например, доступа в Интернет, сети для профессиональных приложений, таких, как передача цифрового ТВ от студии к студии, сбор новостей и раздача сигнала на эфирные ретрансляторы. Новый стандарт также удобен для формирования сетей передачи данных и создания IP-магистралей. Как и большинство многофункциональных стандартов, он представляет собой набор инструментов, которые можно использовать в разных сочетаниях. Такой принцип построения делает стандарт максимально гибким и не сильно перегружает процессоры приемников. При нынешнем развитии силиконовых технологий все функции приемника можно реализовать на одном чипе.

Большинство эффективных механизмов, заложенных в DVB-S2, оказались несовместимыми со старыми стандартами. Поэтому для выполнения требования совместимости вниз разработчики ввели в стандарт два режима. Один – совместимый, но менее эффективный, а другой, использующий все новые возможности, но не позволяющий использовать приемники стандарта DVB-S.

Первый рекомендуется для предоставления традиционных услуг, на период миграции к новому стандарту, а второй – для применения в про-

фессиональных сетях и для передачи новых услуг, которые невозможно принять старыми приемниками. Рассмотрим составляющие стандарта более подробно.

Новый стандарт предусматривает четыре возможные схемы модуляции (Рис. 2).

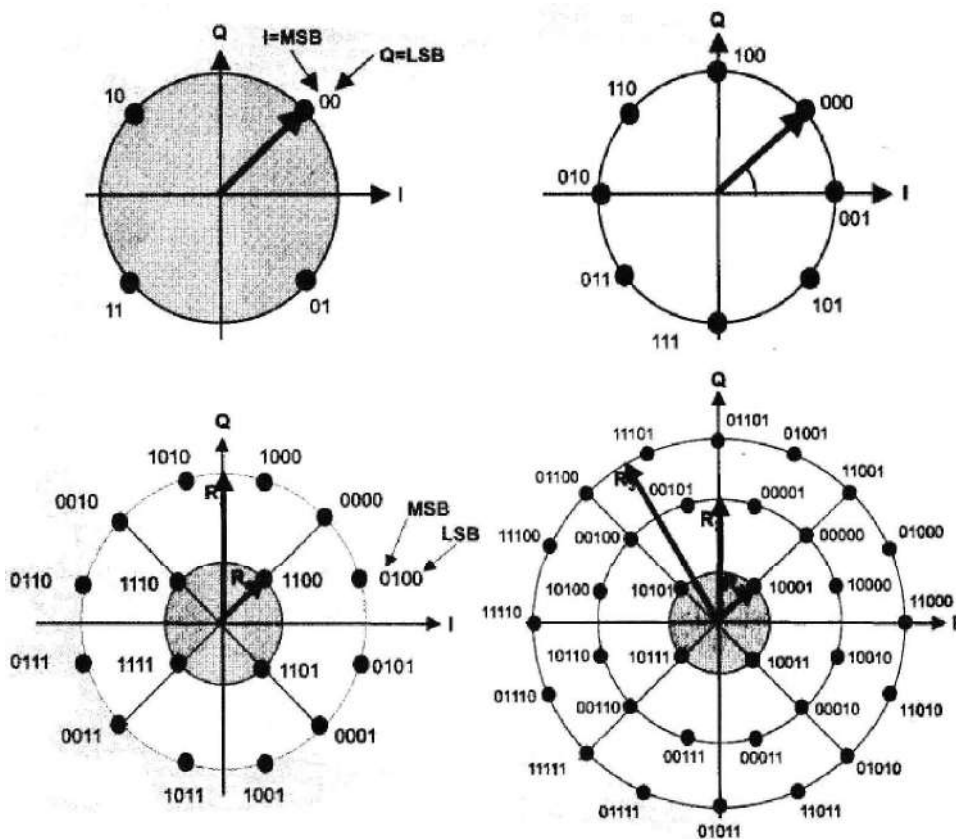


Рис. 2. Схемы модуляции DVB-S2.

Первые две, QPSK и 8PSK, предназначены для использования в вещательных сетях. Передатчики транспондеров работают там в режиме, близкому к насыщению, что не позволяет модулировать несущую по амплитуде. Более скоростные схемы модуляции, 16 КАМ и 32 КАМ, ориентированы на профессиональные сети, где часто используются более слабые наземные передатчики, не вводящие бортовые ретрансляторы в нелинейный режим работы, а на приемной стороне устанавливаются профес-

сиональные конвертеры (LNB), позволяющие с высокой точностью оценить фазу принимаемого сигнала. Эти схемы модуляции можно использовать и в системах вещания, но в этом случае каналообразующее оборудование должно поддерживать сложные варианты предискажений, а на приемной стороне должен быть обеспечен более высокий уровень отношения сигнал/шум. Символы внутри конstellляционного поля КАМ модулированного сигнала размещены по окружностям. Такой вариант является наиболее помехоустойчивым в плане передачи амплитуды символа и позволяет использовать ретрансляторы в режимах, близких к точке насыщения.

Обратим внимание на то, что, по сравнению с QPSK, схема модуляции 32 КАМ, позволяет повысить общую скорость потока в 2.5 раза.

Одновременно с введением более высоких уровней модуляции стандарт предусматривает возможность применения двух дополнительных коэффициентов скругления α . К используемому в DVB-S $\alpha=0.35$ в новом стандарте добавлены коэффициенты $\alpha = 0.20$ и $\alpha = 0.25$. Новые, более низкие, значения коэффициентов обеспечивают большую крутизну импульсов, что позволяет использовать спектр более эффективно. С другой стороны, снижение α способствует повышению нелинейных искажений, что особенно сказывается при передаче одной несущей на транспондер. Поэтому конкретное значение коэффициента выбирается с учетом всех параметров передачи.

Для защиты от помех в новом стандарте, как и в прежних, используется перемежение данных и наложение двухуровневого кода для прямой коррекции ошибок (FEC). Но системы внешней и внутренней кодозащиты отличаются от применяемых в стандарте DVB-S. В качестве внешней кодозащиты вместо кода Рида-Соломона используется код BCH, а в качестве внутренней, вместо сверхточного кода, код с низкой плотностью проверок на четность LDPC.

LDPC – один из вариантов «турбо»-кодов, изобретенный еще в 1960 году и получивший свое второе рождение в середине 90-х гг. Он был выбран путем компьютерного моделирования из семи опробованных вариантов турбокодов. Критерием выбора было обеспечение максимальной эффективности передачи в канале, и коду LDPC удалось максимально

приблизить ее к пределу Шеннона при соблюдении установленных ограничений на сложность чипа декодера. Код LDPC накладывается на блоки длиной 64800 бит, которые для приложений, чувствительных к задержкам, могут быть сокращены в 4 раза.

Для дополнительного снижения частоты ошибки используется внешний уровень кодозащиты BCH, работающий при малой плотности ошибок. В большинстве режимов код позволяет исправлять до 12 ошибок.

BCH так же, как и код Рида-Соломона, представляет собой алгебраический код, описываемый определенными полиномами. Но, в отличие от кода Рида-Соломона, BCH исправляет одиночные, а не пакетные ошибки и может накладываться на более длинные последовательности.

Новая пара кодов обеспечивает более эффективное использование канального ресурса, чем коды DVB-S. Как отмечают разработчики стандарта, она позволяет работать при уровнях E_b/N_0 (цифровой эквивалент C/N) всего на 0.7 дБ выше требуемого соотношением Шеннона для заданной скорости, в то время как применение свертки в паре с кодом Рида-Соломона требовало превышения этого предела примерно на 5 дБ. Правда, при этом не выполняются условия бесконечно высокой достоверности передаваемой информации, оговоренные в теореме Шеннона. Более того, новый стандарт допускает более высокую частоту ошибок (BER) на выходе декодера, чем старый. Если кодеры стандарта DVB-S обеспечивают снижение BER до $10^{-10} - 10^{-11}$, то LDPC в сочетании с BCH снижают его до уровня 10^{-7} . Такой уровень соответствует появлению одной ошибки в час при передаче потока скоростью 5 Мбит/с (стандартная скорость передачи ТВ компрессированного в MPEG-2). С другой стороны, такой уровень ошибки является допустимым для подавляющего большинства приложений, а большая достоверность при необходимости может быть обеспечена самим приложением. По существу, в стандарт DVB-S заложен избыточный уровень достоверности. Это связано с особенностями работы кода Рида-Соломона, который либо восстанавливает принимаемую последовательность с высокой точностью, либо не восстанавливает ее вовсе.

В случае передачи пакетной информации, перед ее подачей в FEC-кодеры, на нее накладывается CRC-8 (Cyclic Redundancy Check) кодиро-

вание. А после FEC кодирования данные подвергаются перемежению, защищающему ее от длительных помех.

Стандарты DVB-S и DVB-DSNG жестко ориентированы на передачу транспортного потока MPEG-2TS. Структура транспортного кадра нового стандарта не привязана к определенному формату. Она позволяет передавать как транспортные пакеты MPEG-2, так и произвольные потоки с непрерывной или пакетной структурой.

DVB-S2 предусматривает двухуровневое пакетирование потока, введенное для решения проблемы с синхронизацией приемной системы в условиях работы с низким уровнем отношения сигнал/шум.

Вначале пакетируется низкочастотный (Base Band–BB) сигнал. Длина BB пакета привязана к циклу работы LDPC кодера и составляет либо 64800, либо 16200 бит. Заголовок BB пакета длиной 80 бит кодируется вместе с данными приложения.

Он содержит информацию о режимах использования канала (однопотоковый, многопотоковый), типе инкапсулируемого потока (MPEG-2TS, произвольный), режиме кодирования и модуляции (VCM, ACM) и ряд других параметров. Затем сформированный BB-пакет подвергается пакетированию на физическом уровне. За счет введения второго уровня решается задача надежной синхронизации приемника, который должен иметь возможность детектировать несущую и фазу передаваемого сигнала и синхронизироваться с началом кадра даже в тех случаях, когда мощность сигнала окажется ниже мощности шума.

Полезную нагрузку физического кадра составляет BB-кадр, к которому добавляется заголовок из 90 символов бинарного кода. В нем передаются синхроимпульсы, информация о схеме модуляции и режиме помехоустойчивого кодирования. Заголовок физического кадра кодируется отдельно от содержания кадра. Это делается по двум причинам.

- для того чтобы принять транспортный поток, приемник предварительно должен «прочитать» информацию о его параметрах, заложенную в заголовок физического пакета.

- заголовок должен устойчиво декодироваться при любых, самых неблагоприятных условиях, и для его защиты требуется особо надежный

код. В качестве такого кода выбран блочный код с очень высокой избыточностью – $7/64$, предусматривающий турбодекодирование, то есть итеративное декодирование с «мягкими» решениями. Для того чтобы защитное кодирование заголовка не очень снижало скорость передачи полезной информации, разработчики стандарта постарались минимизировать количество передаваемых в нем параметров, и все, что было возможно, вынесли в заголовок ВВ-пакета.

Физический кадр разбивается на слоты по 90 символов, что облегчает надежную синхронизацию при помехоустойчивом декодировании. В качестве опции через каждые 16 слотов могут вставляться пилот сигналы, представляющие собой отрезок немодулированной несущей. Пилот-сигналы предназначены для восстановления потерянной синхронизации при плохих условиях приема. Перед отправкой в линию физические кадры подвергаются энергетическому диспергированию. При отсутствии полезной информации модулятор формирует буферные физические кадры, позволяющие приемнику сохранить информацию о режиме передачи в канале.

В режимах VCM (Variable Coding and Modulation) и ACM (Adaptive Coding and Modulation) транспортные параметры могут меняться с частотой в 1 кадр, но в пределах кадра они остаются неизменными.

Системы DVB-S2 могут быть сконфигурированы для передачи одной или нескольких несущих в одном транспондере.

Режимы с совместимостью вниз в основном предназначены для сетей вещания и более всего – для операторов, предоставляющих субсидии на покупку абонентских приемников. Они могут использовать эти режимы на время смены парка приемников, а затем переключиться на более эффективные, несовместимые режимы.

Совместимые вниз режимы не позволяют полностью использовать потенциал нового стандарта и довольно сложны в реализации. Поэтому они не получили широкого распространения.

В зависимости от выбранного режима помехоустойчивого кодирования и схемы модуляции, уровень сигнал/шум, позволяющий принять сигнал на приемной стороне, колеблется от -2.4 дБ (при модуляции QPSK и $FEC = 1/4$) до $+16$ дБ (32 APSK и $FEC = 9/10$). Эти значения справедли-

вы для гауссовского канала и идеального демодулятора. Они были получены методом компьютерного моделирования. При условии допустимости BER на уровне 10^{-7} энергетика сигнала превышает предел Шеннона всего на 0.7 – 1.2 дБ.

По сравнению с DVB-S, новый стандарт обеспечивает повышение скорости передачи полезной информации на 20–35% или при той же эффективности использования спектра дает запас по уровню сигнала в 2–2.5 дБ.

Выигрыш в эффективности передачи оказывается еще более значительным при использовании режима ACM, предназначенного для интерактивных адресных приложений – таких, как передача IP unicast. На Рис. 3 показана схема работы спутниковой системы в этом режиме.

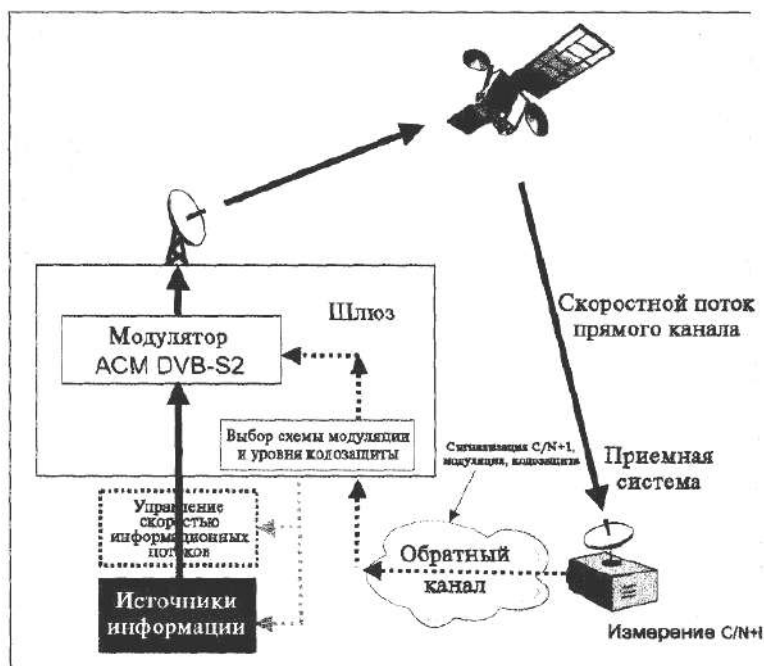


Рис. 3. Работа DVB-S2 в режиме ACM.

Этот режим позволяет исключить запас по энергетике в 4–8 дБ, закладываемый в спутниковые сигналы для неблагоприятных условий приема, что дает возможность удвоить или утроить пропускную способность транспондера. Режим ACM наиболее эффективен применительно к трансляциям Ка-диапазона, а также для тропических зон приема.

Система включает АСМ шлюз, DVB-S2 модулятор с поддержкой АСМ, передающую наземную станцию, спутник и систему приема спутникового сигнала, подключенную к АСМ шлюзу через обратный канал.

В АСМ режиме формат помехоустойчивого кодирования и схема модуляции могут меняться от кадра к кадру. В условиях повышенного затухания сигнала услуга может поддерживаться за счет снижения скорости передачи полезной информации с одновременным повышением избыточности помехозащитного кода и/или перехода к более помехоустойчивой схеме модуляции. Качество принимаемого сигнала оценивается параметром $C/N+1$. Каждая приемная система измеряет величину этого параметра и по обратному каналу отправляет результат к АСМ-шлюзу. Работа в этом режиме требует введения механизмов управления скоростью пользовательских потоков данных, предотвращающих перегрузку канала при ухудшении погодных условий. Введение таких механизмов может оказаться довольно сложной задачей, особенно, если число пользователей будет достигать сотен и тысяч, и поток к каждому из них будет требовать индивидуальной адаптации. Решение задачи осложняется еще и тем, что информация может поступать из удаленных источников, трудно поддающихся управлению. Решение этой проблемы не может регламентироваться стандартом, а в каждом случае должно определяться индивидуально.

Консорциум DVB Project не предполагает, что новый стандарт заменит старые уже в ближайшее время. Сегодня в мире работает множество коммерчески успешных спутниковых сетей стандарта DVB-S и их трансляции принимаются миллионами декодеров, способных прослужить еще не один год. Поэтому наиболее вероятным сценарием внедрения нового стандарта выглядит его использование для трансляции услуг, которые не могут быть приняты традиционными приемниками. Вполне возможно, что новый стандарт быстро найдет применение и в сетях спутникового сбора новостей. Хотя бы в виду преимуществ, которые предоставляет АСМ-режим. Но скорость его массового внедрения, вероятно, будет зависеть от появления новых услуг, несовместимых с имеющейся приемной аппаратурой.

7.6. СТАНДАРТЫ ЦИФРОВОГО РАДИОВЕЩАНИЯ DAB И DRM.

Несмотря на бурное развитие телевидения – на сегодняшний день важнейшего электронного средства массовой информации – эфирное радиовещание во всем мире продолжает оставаться основным источником информации для населения. Для эфирного радиовещания в мире используется несколько служб, различающихся целями, техническими параметрами и зонами обслуживания [7.6.1.]. Основные характеристики существующих систем эфирного радиовещания приведены в Таблице 1, где для сравнения указаны планируемые параметры цифрового радиовещания. Эти системы условно можно разделить на три класса:

- системы с амплитудной модуляцией (АМ), использующие диапазоны КМВ (километровые), ГМВ (гектометровые) и ДКМВ (декаметровые), т.е. частоты ниже 30 МГц, что соответствует диапазонам НЧ, СЧ и ВЧ;

- МВ (УКВ) ЧМ-системы, использующие метровые волны, т.е. работающие на частотах 30...300 МГц в диапазоне ОВЧ;

- системы непосредственного спутникового радиовещания (DSR, ADR, World Space, Digital System E и ряд других), работающие в диапазонах УВЧ и СВЧ.

Единственным видом существующего аналогового радиовещания, способным передавать звуковые вещательные сигналы с высоким качеством, является ЧМ (FM) радиовещание в диапазоне метровых волн. Для радиовещания в этом диапазоне в России выделены полосы частот (66...74) МГц и (87,5...108) МГц, в Западной Европе – (88...104) МГц и в США – (88...108) МГц.

Несмотря на то, что каждый аналоговый канал занимает довольно узкую полосу (130... 190 кГц), из-за сильного взаимного влияния сигналов соседних зон их приходится значительно разносить. Поэтому увеличение числа одновременно передаваемых в вещательной сети стереофонических программ без увеличения взаимных помех при их приеме становится невозможным.

Таблица 1.

**Основные характеристики существующих систем
эфирного радиовещания.**

Диапа- зон волн / служба	Вещательные зоны	Число звуковых про- грамм	Полоса звуко- вых час- тот, кГц	Отно- шение сиг- нал/несу- щая, дБ	Моно/ стерео	Фикси- рован- ная, подвиж- ная
КМВ	Национальное вещание, смежные госу- дарства	3... 5	4,5...5,0	20	М	Ф + П
ГМВ	То же	8	4,5...5,0	20	М	Ф + П
ДКМВ	Весь мир	?	4,5...5,0	0	М	Ф(П)
МВ/УКВ	Региональное и местное веща- ние	5...10	15	50	М/С	Ф(П)
DSR, ADR	Национальное вещание, смежные госу- дарства	16	15	70	М/С	Ф
ЦРВ (назем- ное)	Региональное и местное веща- ние	≥ 6	>15	70	С	Ф+П
ЦРВ (спутни- ковое)	Национальное вещание, смежные госу- дарства	≥ 16	>15	70	С	Ф+П

Ввиду большой ширины частотных каналов и применения частотной модуляции реализуются высокие параметры качества. В частности, использование ЧМ позволяет значительно увеличить отношение сигнал/помеха – по сравнению с АМ в 5,8 раза (15 дБ) при монофоническом вещании и в 2 раза (5,5 дБ) – при стереофоническом.

В середине 1980-х гг. специалистам стало ясно, что, оставаясь в рамках классического последовательного метода передачи, малоэффективного цифрового компандирования звукового вещательного сигнала и используя сантиметровый диапазон волн, невозможно решить важнейшую задачу радиовещания – обеспечить высококачественный прием на мобильный приемник нескольких стереофонических программ. Задача перспективного развития звукового вещания решается путем создания аб-

солютно новых систем, спроектированных таким образом, чтобы удовлетворить высоким требованиям слушателей к качеству звучания программ при различных условиях приема. Этим требованиям отвечает цифровое радиовещание (ЦРВ) – новая информационная технология, в основе которой представление и передача звукового сигнала в цифровой форме во всех звеньях вещательного тракта – от студии до мобильного приемника.

По сравнению с аналоговым цифровое радиовещание имеет ряд существенных технических преимуществ, среди которых:

- большая эффективность использования радиочастотного спектра;
- меньшие мощности передатчиков при той же зоне обслуживания;
- меньшая чувствительность к помехам.

Цифровое радиовещание получило известность в 1995г., когда было начато опытное вещание в диапазоне ОВЧ в Великобритании и скандинавских странах в стандарте T-DAB. Это – новый вид услуги эфирного радиовещания, гарантирующий прием в движущемся автомобиле до 6 стереофонических программ с качеством, близким к качеству CD-проигрывателя, плюс значительный объем дополнительной информации. Система утверждена EBU в качестве общеевропейской и рекомендована Международным Союзом Электросвязи (МСЭ) для внедрения во всем мире наземной системы цифрового звукового радиовещания.

Тем не менее, система T-DAB обладает рядом недостатков, среди которых фиксированный состав звуковых программ в излучаемом наборе («пакете») и относительно низкая эффективность использования частотного ресурса. Кроме того, относительно ОВЧ ЧМ радиовещания качество вещания в формате DAB улучшается незначительно.

Принципиально иное решение цифрового радиовещания предусматривается в концепции DRM. Вещание в стандарте DRM осуществляется на частотах ниже 30 МГц (реально в диапазонах СЧ и ВЧ) с использованием радиопередатчиков с амплитудной модуляцией (АМ).

Главная цель, которую преследуют разработчики идеологии DRM, – резко улучшить качество вещания по сравнению с традиционным аналоговым радиовещанием в диапазонах средних и, особенно коротких волн, что позволит перевести вещательный КВ-канал из разряда чисто

информационных в разряд художественно-информационных. Консорциум DRM считает, что для достижения коммерческого успеха цифровой системы вещания в диапазонах с АМ она должна удовлетворять следующим требованиям:

- более высокие – качество звука и надежность приема, чем у АМ вещания;
- совместимость с существующим частотным планом АМ вещания, возможность дальнейшего развития;
- обеспечение постепенного перехода от аналогового к полностью цифровому радиовещанию;
- максимально возможное использование существующего передающего оборудования;
- возможность производства дешевых радиоприемников.

Стандарты DRM и DAB призваны устранить два основных недостатка аналогового радиовещания: «расточительное» использование частотного ресурса, по определению ограниченного, и неспособность противостоять многообразным помехам, а также замираниям сигнала в многолучевом канале, в частности, при приеме на подвижном объекте. Кроме того, система должна работать в традиционных «радиовещательных» диапазонах волн, поскольку даже если новая услуга будет востребованной, трудно рассчитывать на выделение полос частот, существенно превышающих те, что используются при аналоговом вещании. Отсюда следует первое важное требование к системам ЦРВ – высокая частотная (спектральная) эффективность, причем, чем ниже по шкале частот организуется цифровое радиовещание, тем выше должна быть эффективность использования спектра.

Эта проблема впервые была решена в ходе разработки проекта Eureka 147 – речь идет о знаменитой системе MUSICAM, ныне известной как система кодирования звука по стандарту MPEG-1 Layer II. Однако эффективности этой системы кодирования (вкупе с модуляцией ОФМ-4) оказалось недостаточно для построения системы ЦРВ, работающей на частотах ниже 30 МГц, т.е. в диапазонах длинных, средних и коротких волн. Здесь уже в ходе работ консорциума DRM над проектом системы для

этого диапазона частот были разработаны более совершенные системы кодирования звука (MPEG-4 AAC, MPEG-4 CELP и MPEG-4 HVXC) и использована квадратурная амплитудная модуляция (от 4-КАМ до 64-КАМ).

Обеспечение мобильного приема также требовало нетрадиционного подхода. Удачное решение – система COFDM – была найдена (применительно к радиовещанию) опять же в процессе работы над проектом Eureka 147. При этом, как ранее отмечалось, появляется возможность резко снизить скорость передачи на каждой несущей, ввести временной интервал, защищающий приемник от эхо-сигналов, а также реализовать перемежение сигналов по частоте. Использование такой системы обеспечит возможность построения одночастотной вещательной сети (SFN), когда сеть передатчиков, передающих один и тот же набор звуковых программ, работают на одной частоте с целью увеличения зоны (площади) обслуживания.

Заметим, что эффективность описанного метода передачи в значительной степени определяется также и системой канального кодирования, и системой демодуляции/декодирования с использованием алгоритма Витерби.

Обратим внимание и на основные системные преимущества ЦРВ. Это, прежде всего, высокая эффективность использования радиочастотного спектра. Так, например, в системе ЦРВ Eureka 147 для передачи шести стереофонических программ на всей территории России требуется полоса частот около 1,5 МГц. В системе ОВЧ ЧМ-вещания – при передаче трех программ более низкого качества – 8 МГц.

В последнее время интенсивно развивается коммерческий сектор радиовещания с использованием ОВЧ ЧМ-вещания, однако задача охвата многопрограммным радиовещанием всего населения страны никак не приблизилась к своему решению. Полный охват населения оказывается нерентабельным для коммерческих ЧМ-радиостанций. Аналогичная ситуация скорее всего возникнет и при развертывании систем стандарта T-DAB, близкого к ОВЧ ЧМ-вещанию по возможностям охвата территории.

Это означает, что задача охвата населения радиовещанием на всей территории Армении и за рубежом в перспективе может быть решена с обязательным использованием частотных ресурсов в диапазонах длин-

ных, средних и коротких (для удаленных районов) волн. Поэтому, по мнению ряда ведущих специалистов отрасли, перспективы совершенствования услуг эфирного радиовещания в нашей стране следует связывать с технологией, реализуемой стандартом DRM. Однако при внедрении цифрового радиовещания в диапазонах с АМ необходимо обеспечить сохранение возможности приема для огромного количества существующих аналоговых радиоприемников.

7.7. СТАНДАРТЫ КАБЕЛЬНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ DVB-C/C2

Стандарт DVB-C

Системы кабельного телевидения (СКТВ) являются широко распространенным средством доставки телевизионных программ до абонента. В условиях многоэтажной городской застройки они обеспечивают значительно лучшее качество ТВ сигнала, чем эфирное вещание [7.7.2.]. Для подачи сигнала к абоненту используется диапазон метровых и дециметровых волн от 47 до 862 МГц. Между I и V телевизионными диапазонами имеются частотные промежутки, выделяемые другим службам. В кабельных сетях здесь организуются так называемые спецканалы (участки между 104 и 174 МГц и между 230 и 300 МГц) и гиперканалы (участок между 300 и 470 МГц). Структура типовой сети кабельного телевидения показана на Рис. 1.

Основа сети – головная станция, которая принимает ТВ программы от разных источников (эфирных передатчиков, кабельных, спутниковых и радиорелейных распределительных систем, местных студий), приводит сигналы к единому формату, принятому в данной сети, расставляет их по частотным каналам, скремблирует, если сеть работает в режиме условного доступа, усиливает до уровня 100... 120 дБмкВ (децибел к микровольту) и отдает в линейный распределительный тракт. В традиционных сетях коллективного приема основой тракта служит коаксиальный кабель, в который включаются усилители и делители мощности сигнала. Для увеличения протяженности линейного тракта используют кабели с малым зату-

ханием и высокой экранировкой, усилители с повышенной линейностью передаточной характеристики и ответвители с хорошим согласованием и высокой направленностью. Постоянство уровней сигналов в тракте в условиях эксплуатации поддерживается с помощью автоматической регулировки усиления.

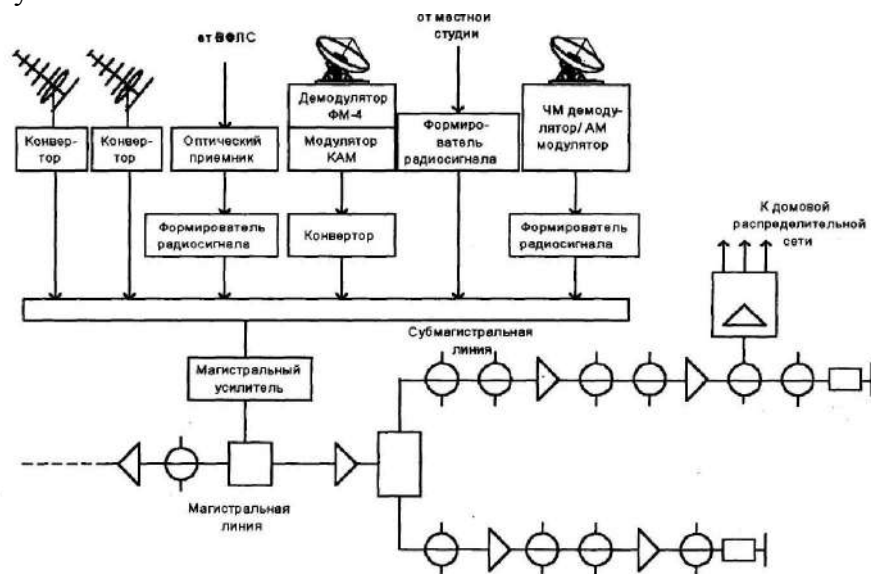


Рис. 1. Структура типовой сети кабельного телевидения.

Широкое развитие оптоволоконных технологий позволило использовать в качестве магистрального оптический кабель и объединить достаточно удаленные районы в крупные единые сети, охватывающие десятки и сотни тысяч абонентов. Второе важное новшество современного поколения СКТВ – наличие обратного – относительно низкоскоростного канала от абонента к головной станции, используемого кабельным оператором для диагностирования и мониторинга состояния сети, а также для предоставления широкого спектра дополнительных услуг – телефонии, передачи данных, доступа в Интернет и в другие интерактивные приложения. Обратный канал организуется в низкочастотной части спектра, на частотах ниже 45 МГц.

Внедрение цифрового телевидения в системы СКТВ ставит вопрос об их пригодности для этой цели и об оценке необходимых усовершенст-

ований и доработок. Предварительный анализ применимости цифровых методов кодирования и модуляции показывает, что в правильно спроектированной сети отношение сигнал-шум не ниже 43 дБ, поэтому целесообразно применение многопозиционной модуляции, например, КАМ. Более высокое отношение сигнал-шум снижает вероятность ошибок и позволяет обойтись одной ступенью помехоустойчивого кодирования. Однако пакетные ошибки не исключены, поэтому перемежение остается составной частью процесса канального кодирования.

Необходимо отметить, что КАМ-сигналы более чувствительны к амплитудным и особенно фазовым искажениям в тракте, поэтому вопросы согласования, коррекции характеристик остаются достаточно острыми.

Эффективное сжатие позволяет в одном частотном канале передать до 3–5 ТВ программ.

В построении головных станций переход на цифровой формат предъявляет новые требования к аппаратуре обработки и формирования сигналов. Появляется возможность формирования многопрограммных цифровых потоков, не декодируя принятые MPEG-сигналы, а выделяя из них нужные компоненты на уровне транспортного потока и мультиплексируя эти компоненты в новые. При этом также на уровне транспортного потока могут решаться вопросы скремблирования, смены системы условного доступа, работы одновременно в нескольких системах условного доступа. Принятый в стандартах DVB единый подход к канальному кодированию существенно облегчает обработку и преобразование сигналов DVB, т.к. число дополнительных операций при преобразованиях оказывается минимальным.

Структурная схема кодера стандарта DVB-C показана на Рис. 2. Источником входного сигнала, как и в других кодерах семейства DVB, служит транспортный поток MPEG-2 с пакетами размером 188 байтов. В скремблере пакеты организуются в группы по 8, синхробайт каждого первого пакета из группы инвертируется и служит в дальнейшем для цикловой синхронизации. Скремблирование осуществляется сложением по модулю 2 с ПСП, порождаемой многочленом:

$$g(x) = x^{15} + x^{14} + 1.$$

На период следования каждого синхробайта скремблирование прерывается. Внешний кодер Рида-Соломона и сверточный перемежитель также не имеют отличий от устройств, описанных ранее.

Учитывая относительно высокое отношение сигнал-шум, внутреннее кодирование не используется, а в качестве метода модуляции предлагается квадратурная АМ различной кратности, от КАМ-16 до КАМ-256.

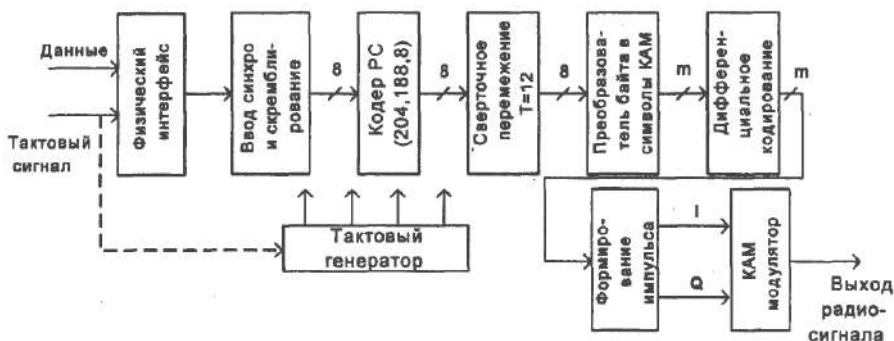


Рис. 2. Структурная схема кодера стандарта DVB-C.

На Рис. 3 показано как последовательный поток MPEG-2 преобразуется в параллельный – символов КАМ. Так, для КАМ-64 3-х байтовая входная последовательность преобразуется в четырехсимвольную шестибитовую ($64 = 2^6$). Дополнительное повышение помехоустойчивости достигается относительным кодированием двух старших битов. Перед подачей на модулятор импульсы подвергаются скруглению с коэффициентом $\alpha = 0,15$. В следующем блоке символы с помощью ЦАП преобразуются в импульсы напряжения, подаваемые затем на модулятор.

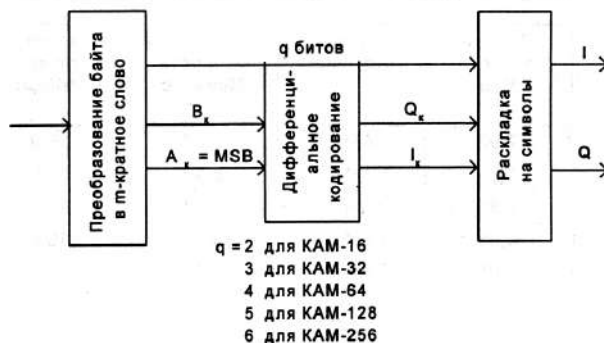


Рис. 3. Формирование символов КАМ.

В Таблице 1 приведены примеры рассчитанных значений символьной и информационной скорости при разных кратностях модуляции в канале 8 МГц .

Таблица 1.

Значения символьной и информационной скорости при разных кратностях модуляции в канале 8 МГц.

Полоса частот, МГц	Вид модуляции	Символьная скорость Мсимв/с	Информационная скорость, Мбит/с
7,92	КАМ-64	6,89	38,9
7,96	КАМ-32	6,92	31,9
7,86	КАМ-16	6,84	25,2
3,93	КАМ-64	3,42	18,9
4,00	КАМ-32	3,48	16,0
4,00	КАМ-16	3,48	12,8

В приемнике, структурная схема которого показана на Рис. 4, должны выполняться соответствующие обратные операции [7.7.1].

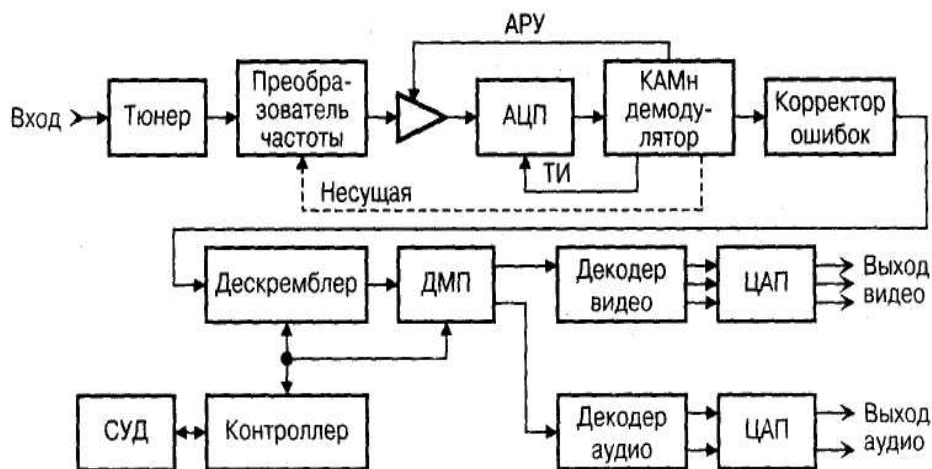


Рис. 4. Структурная схема приемника DVB-C.

Входной сигнал с кабельной линии поступает на тюнер, в котором сигнал обрабатывается и переносится на промежуточную частоту. Затем в преобразователе частоты производится второе преобразование с исполь-

зованием несущей частоты, восстановленной в демодуляторе КАМ или в самом блоке преобразователя частоты. Полоса частот выходного сигнала составляет от 3 до 11 МГц.

Далее сигнал проходит управляемый усилитель, коэффициент усиления которого определяется сигналом АРУ с демодулятора. Размах сигнала при этом согласуется с диапазоном входных напряжений АЦП. Для приема сигналов КАМ-16, 32 и 64 достаточно АЦП, имеющего 8 двоичных разрядов, а 256 – 9 двоичных разрядов. Дискретизация производится с частотой канальных символов, т.е. около 7 МГц. Тактовые импульсы ТИ формируются в демодуляторе.

Поступающий на демодулятор цифровой сигнал преобразуется в сигналы квадратурных составляющих **I** и **Q**, по которым восстанавливаются канальные символы. Затем из этих символов формируются байты выходного потока данных, поступающих в блок коррекции ошибок (Корректор ошибок), в котором выполняются деперемежение и декодирование кода Рида-Соломона. В результате восстанавливаются размеры транспортных пакетов (по 188 байтов) и исходный порядок следования байтов в пакетах. Затем поток данных поступает на дескремблер. Дескремблированный транспортный поток приходит на демультимплексор (ДМП), в котором из транспортного потока выбираются пакеты, относящиеся к выбранной программе, и формируются элементарные потоки видео, звукового сопровождения и данных. Управление дескремблером и демультимплексором осуществляет контроллер. Демультимплексор выбирает из транспортного потока пакеты с таблицами программ (РАТ) и передает их на контролер, который обеспечивает отображение информации о программах в транспортном потоке на экране. По командам пользователя выбирается одна из программ и данные о PID пакетов, относящихся к этой программе, передаются в демультимплексор. Вспомогательные данные к выбранной программе (субтитры и т.п.) поступают с демультимплексора на контролер, который передает их далее на блок воспроизведения дополнительной информации.

Таким образом, в приемнике цифрового телевидения выбор программы осуществляется в два этапа. Сначала выбирается канал ТВ-веща-

ния, в котором передается транспортный поток, содержащий несколько программ. Затем выбирается одна из программ в этом транспортном потоке. Элементарные потоки видео и звука с демультимплексора поступают на соответствующие декодеры MPEG-2.

Стандарт DVB-C2

В последние годы операторы кабельного телевидения все чаще предоставляют пакет мультисервисных услуг Triple Play, который, дополнительно к традиционному телевидению, включает телефонию и доступ к Интернет. При этом объемы IP-трафика стремительно растут и эта тенденция обещает сохраниться в будущем. Кроме того, все больше видеоматериала предоставляется в формате ТВЧ (телевидение высокой четкости), требующем значительно более высокой пропускной способности по сравнению с телевидением стандартной четкости. По перечисленным причинам многие кабельные операторы вскоре столкнутся с проблемой дефицита спектра. Решить эту проблему можно либо расширением спектра, либо разделением сети на сегменты с меньшим числом абонентов. Оба подхода требуют добавления множества активных и пассивных сетевых компонентов, то есть достаточно затратны для оператора. Третий, наиболее перспективный подход – реорганизация физического канала по технологии с более эффективным использованием спектра. Такая технология как раз и разработана в рамках недавно принятого стандарта DVB-C2.

Второе поколение стандартов DVB (DVB-X2), как и первое, включает три основных транспортных стандарта, обслуживающих три главные транспортные среды DVB-S2 (спутниковый), DVB-T2 (эфирный) и DVB-C2 (кабельный).

Разработчики семейства стандартов DVB-X2 старались максимально унифицировать компоненты стандартов, предназначенных для разных сред. В частности, во всех стандартах применяется единая схема помехоустойчивого кодирования (FEC – Forward Error Correction). Она предусматривает последовательное наложение кодозащиты с применением кода BCH и внутренней кодозащиты с применением кода с низкой плотностью проверок на четность (Low Density Parity Check Codes – LDPC).

На Рис. 5 показана упрощенная структурная схема передатчика DVB-C2.

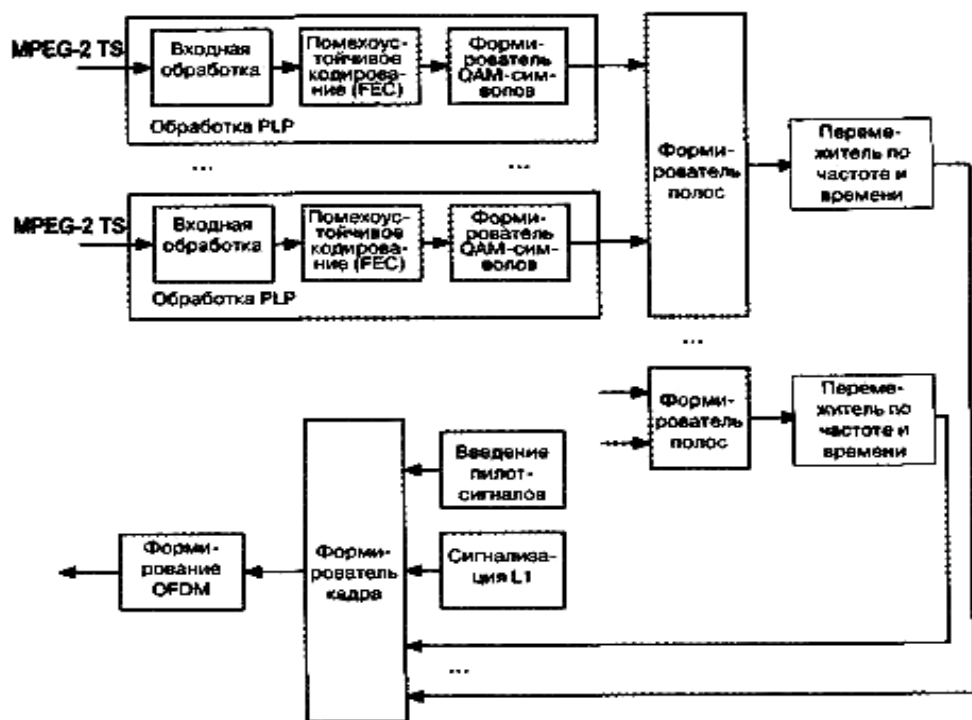


Рис. 5. Структурная схема передатчика DVB-C2.

В новом кабельном стандарте внутри одного физического канала предусмотрено выделение транспортных труб. Они получили название “Physical Layer Pipe (PLP)”. Это логический канал, который может переносить обычный поток MPEG-2 TS или использоваться для передачи IP. Каждый PLP пропускается через блок входной обработки, за которой следует модуль помехоустойчивого кодирования и далее – раскладчик QAM-символов. Один или несколько PLP могут укладываться в так называемые слои данных Data Slices (аналогичные каналам). Для повышения устойчивости к пакетным ошибкам или воздействия узкополосных помех эти слои затем подвергаются перемежению по времени и частоте. После этого они поступают в формирователь кадра, собирающий воедино все слои и добавляющий пилот-сигналы, а также преамбулу с сигнализацией пер-

вого уровня. На последнем этапе сформированный кадр поступает в генератор OFDM-потока.

Идентификатор PLP ID, позволяющий идентифицировать конкретный PLP на приемной стороне, является частью заголовка, передаваемого перед каждым пакетом. После декодирования этого заголовка и извлечения PLP ID приемник может определить, должен ли он декодировать пакет, следующий за заголовком. Пакеты, не принадлежащие к запрашиваемому PLP, пропускаются, то есть не поступают в QAM-демодулятор и декодер помехоустойчивого кодирования. В результате существенно снижается скорость потока, обрабатываемого приемником, а также процессорная мощность, требуемая для этой обработки.

Другое преимущество применения PLP заключается в том, что разные потоки можно передавать с разным уровнем помехоустойчивости: схема модуляции и режим помехоустойчивого кодирования для каждого PLP могут выбираться индивидуально. То есть каждой услуге может назначаться свое качество обслуживания (QoS). Преимущества индивидуального выбора параметров, в первую очередь, проявляются при двусторонней передаче данных в режиме точка–точка. Они могут выбираться в зависимости от характеристик каналов, соединяющих ГС и конкретное абонентское устройство, а именно: от протяженности линии, количества сетевых усилителей и качества внутридомовой разводки.

Стандарт DVB-C2 предусматривает помехоустойчивое кодирование LDPC. Коды этого класса известны еще с 60-х годов прошлого века, но их практическое использование стало возможным только в последнее время благодаря достижениям в области полупроводниковых технологий. Эффективность LDPC-кодирования особенно высока при кодировании длинных последовательностей. Потому длина стандартного слова, к которому в DVB-C2 прилагается LDPC, составляет 64800 бит (вместо 204 Байт в DVB-C). То есть кодируемое слово больше не коррелировано с транспортным пакетом MPEG-2 TS. Кроме LDPC, в DVB-C2 предусмотрено применение кода BCH, налагаемого с очень высокой относительной скоростью (около 0,99). Этот код с малой корректирующей способностью введен для снижения порога коррекции LDPC. Порог коррекции при-

сутствует у всех итеративных схем кодирования – таких, как LDPC или турбокоды. Он проявляется в том, что при декодировании всегда остается некоторое количество ошибок, не поддающихся коррекции при последующих итерациях, выполняемых FEC-декодером.

Существенное повышение эффективности помехоустойчивого кодирования позволяет использовать более высокие размерности модуляции. Если в DVB-C максимально можно использовать 256 QAM, то в DVB-C2 добавляются размерности 1024 и 1096 QAM. Допустимые комбинации модуляций и схем помехоустойчивого кодирования приведены в Таблице 2. В ней также указаны уровни отношения сигнал/шум, требуемые для приема, квазисвободного от ошибок. Эти уровни лежат в пределах примерно от 10 до 35 дБ, причем спектр допустимых модуляций и схем кодирования позволяет подбирать их под требуемый сигнал /шум с шагом около 2 дБ.

Таблица 2.

**Допустимые комбинации модуляций и схем
помехоустойчивого кодирования.**

FEC	16QAM	64QAM	256QAM	1024QAM	4096QAM
2/3	-	13,5 дБ	-	-	-
3/4	-	-	20,0 дБ	24,8 дБ	-
4/5	10,7 дБ	16,1 дБ	-	-	-
5/6	-	-	22,0 дБ	27,2 дБ	32,4 дБ
9/10	12,8 дБ	18,5 дБ	24,0 дБ	29,5 дБ	35,0 дБ

Основным отличием DVB-C2 от DVB-C является применение OFDM, обеспечивающей допустимые комбинации модуляций и схем помехоустойчивого кодирования, устойчивость к различным видам канальных искажений (многолучевым отражениям или узкополосным помехам). DVB-C2 поддерживает позаимствованный в DVB-T2 режим 4К с продолжительностью полезного OFDM-символа 448 мкс и двумя вариантами защитных интервалов – 1/64 и 1/128. Более того, в DVB-C2 используются те же схемы распределения пилот-сигналов, что позволяет применять к обеим системам единый блок оценки качества канала.

В то же время, в отличие от эфирного стандарта, DVB-C2 не должен подчиняться жесткой частотной сетке. Так как кабельная сеть представляет собой закрытую экранированную среду, то нет необходимости координировать использование ее спектра с эфирными присвоениями. Напротив, можно гибко адаптировать полосу канала под свои конкретные потребности. Применение COFDM вместо одной модулированной несущей как раз и является ключевым фактором, обеспечивающим эту возможность. Ширина канала задается выделением ему определенного количества COFDM-поднесущих. А характеристики входного фильтра и системные часы остаются практически неизменными. Такой подход позволяет расширить полосу передаваемого сигнала для размещения в нем большего количества услуг. Чтобы не усложнять и не удорожать абонентское оборудование, предполагается сегментированный прием таких каналов. Приемник со стандартной полосой пропускания может извлечь из широкого пакета только ту часть, которая содержит принимаемую в данный момент услугу, а полоса, занимаемая этой частью, никогда не превышает 8 МГц.

Такая схема позволяет точно подстроить отводимую слою полосу под скорость передаваемого в нем потока. Например, спутниковые потоки с очень разными битовыми скоростями могут быть перенесены в поток DVB-C2 без необходимости забивать лишнее место стаффинговыми битами или ремультимплексировать транспортный поток MPEG-2 TS. Слой может формироваться до тех пор, пока не будут заполнены все поднесущие OFDM-сигнала. Размещение и ширина каждого слоя могут изменяться от фрейма к фрейму, но это не влечет за собой необходимости перестраивать приемник.

Одна из основных целей разработки спецификации DVB-C2 заключается, разумеется, в повышении эффективности использования спектра. Это достигается применением LDPC-кодирования в сочетании с более высокими схемами QAM-модуляции, а также за счет применения OFDM.

Схема выигрыша за счет OFDM показана на Рис. 6.

В стандарте DVB-C с его одночастотной модуляцией применяется маскирующий фильтр, задающий форму передаваемого сигнала. В результате действия скругляющего фильтра по краям канала появляются

скосы, снижающие эффективность использования спектра. Этот фактор не зависит от абсолютной ширины канала, то есть для канала, скажем, в 16 МГц спектральные потери на скругление будут теми же. В случае с OFDM потери связаны с добавлением защитного интервала, введением пилот-сигналов и защитных полос по краям спектра. В стандартном режиме с защитным интервалом 1/128 и плотностью размещения пилот-сигналов 1/96 потери, обусловленные этими двумя факторами, составляют примерно 2%. Что касается пограничных защитных полос, то они требуются только между соседними каналами, но не внутри одного OFDM-потока. Ширина пограничной защитной полосы практически не зависит от полосы, занимаемой самим OFDM-сигналом. Таким образом, с расширением полосы спектральные потери существенно снижаются. Так, например, спектральные потери для сигнала DVB-C2 шириной 32 МГц (передающего, скажем, 5 слоев по 6,4 МГц) составляют всего 3,25%, в то время как в DVB-C они составляют 15%.

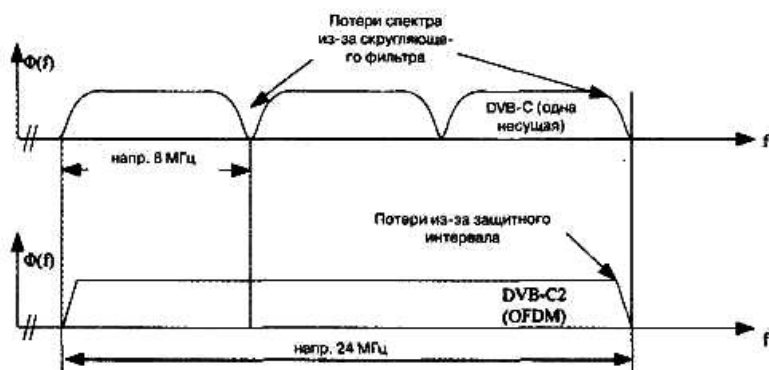


Рис. 6. Схема выигрыша при применении OFDM.

Снижение потерь спектра за счет применения COFDM в сочетании с LDPC-кодированием позволило создать систему, по эффективности передачи близкую к теоретическому пределу. Если каналы DVB-C находятся ниже предела примерно на 10 дБ, то каналы DVB-C2 отличаются от него всего на 2–3 дБ.

Одним из важнейших вопросов является снижение помех от кабельных сетей.

Экранированная среда передачи кабельных сетей теоретически позволяет использовать в них весь спектр от 0 до почти 1 ГГц. Но не идеальное кабелирование внутри абонентских домов и квартир во многих случаях приводит к излучению сигналов КТВ в эфир. Иногда это излучение достигает уровней, которые могут создать помехи, например, полицейским или диспетчерским авиаслужбам. В этих случаях кабельных операторов принуждают снизить уровень сигнала, передаваемого на критических частотах, или же им приходится полностью выключить каналы, создающие помехи. В DVB-C2 такой необходимости не будет. Так как стандарт позволяет вырезать отдельные OFDM-поднесущие, можно будет избирательно отключать только те из них, которые создают помехи, а не весь канал целиком.

Таким образом, недавно разработанный стандарт DVB-C2 позволяет существенно повысить эффективность использования спектра. Это достигается за счет применения более высоких размерностей QAM-модуляции (до 4096 QAM) в сочетании с мощной системой помехоустойчивого кодирования на базе LDPC-кодов. Кроме того, применение OFDM дает дополнительный выигрыш в плане гибкости и эффективности, а также позволяет удешевить создание единых приемных чипсетов DVB-T2/C2. Рабочие возможности стандарта близки к теоретическому пределу. Это позволяет создать на его базе экономически эффективную систему, включающую вещание ТВ высокой и стандартной четкости, а также интерактивные услуги, типа видео по требованию или доступа к Интернету.

7.8. СТАНДАРТЫ НАЗЕМНОГО ВЕЩАНИЯ DVB-T/T2

Стандарт наземного ТВ-вещания DVB-T

Переход к цифровому наземному ТВ-вещанию оказался трудной задачей. При обычной передаче телевизионных сигналов по эфиру на качество приема, помимо атмосферных и промышленных помех, сильно влияют отраженные радиоволны (многолучевой прием) и помехи от других радиопередатчиков, работающих в этом же частотном диапазоне в соседних местностях [7.8.2.].

Стандарт DVB-T предусматривает для передачи сигналов цифрового телевидения по стандартным каналам ТВ-вещания использование COFDM. Возможны два режима, называемые 8К (число несущих 6817) и 2К (число несущих 1705). Режим 8К позволяет использовать меньшие мощности передатчиков, но требует более производительных устройств обработки сигналов, чем режим 2К. Параметры для обоих режимов приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Параметры режимов 2К и 8К.

Режим модуляции	8К				2К			
Длительность рабочего интервала T_r , мкс	896				224			
Частотный разнос несущих Δf , Гц	1116				4464			
Число несущих N	6817				1705			
Ширина полосы частот, МГц	7,61				7,61			
Относительная длительность защитного интервала, Δ / T_r	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Длительность защитного интервала Δ , мкс	224	112	56	28	56	28	14	7
Длительность символа $\Delta + T_r$, мкс	1120	1008	952	924	280	252	238	231
Максимальное удаление ТВ-передатчиков в одночастотной сети $d = c \cdot \Delta$, км	67,2	33,6	16,8	8,4	16,8	8,4	4,2	2,1

Из приведенных данных видно, что сигнал цифрового телевидения, передаваемый с помощью COFDM, можно разместить в стандартном радиоканале аналогового ТВ-вещания с шириной полосы частот 8 МГц, обеспечивая между соседними радиоканалами защитные частотные интервалы приблизительно по 0,39 МГц.

В Таблице 2 приведены значения скорости передачи двоичных символов для полезной информации и допустимого минимального отношения сигнал/шум в радиоканале для различных способов модуляции отдельных несущих COFDM. Эти результаты справедливы для обоих режимов: 8К и 2К. Значения приведены для случаев приема на стационарную и на мобильную антенны. В последнем случае телевизионный приемник может быть установлен на автомобиле или другом транспортном средстве.

Таблица 2.

Параметрические зависимости в стандарте DVB-T.

Вид модуляции	Относительная скорость кода	Сигнал/шум, дБ		Полезная скорость, Мбит/с			
		Стационарная антенна	Мобильная антенна	1/4	1/8	1/16	1/32
4-ФМн	1/2	3,6	5,4	4,98	5,53	5,85	6,03
4-ФМн	2/3	5,7	8,4	6,64	7,37	7,81	8,04
4-ФМн	3/4	6,8	10,7	7,46	8,29	8,78	9,05
4-ФМн	5/6	8,0	13,1	8,29	9,22	9,76	10,05
4-ФМн	7/8	8,7	16,3	8,71	9,68	10,25	10,56
16-КАМн	1/2	9,6	11,2	9,95	11,06	11,71	12,06
16-КАМн	2/3	11,6	14,2	13,27	14,75	15,61	16,09
16-КАМн	3/4	13,0	16,7	14,93	16,59	17,56	18,10
16-КАМн	5/6	14,4	19,3	16,59	18,43	19,52	20,11
16-КАМн	7/8	15,0	22,8	17,42	19,35	20,49	21,11
64-КАМн	1/2	14,7	16,0	14,93	16,59	17,56	18,10
64-КАМн	2/3	17,1	19,3	19,91	22,12	23,42	24,13
64-КАМн	3/4	18,6	21,7	22,39	24,88	26,35	27,14
64-КАМн	5/6	20,0	25,3	24,88	27,65	29,27	30,16
64-КАМн	7/8	21,0	27,9	26,13	29,03	30,74	31,67

Значения достижимой полезной скорости передачи даны для разных отношений Δ/Tr (1/4, 1/8, 1/16 и 1/32). Относительная скорость кода характеризует избыточность, вносимую сверточным кодированием. Сопоставляя числа, приведенные в Таблице 2, со значениями скорости передачи двоичных символов, соответствующими различным уровням качества воспроизводимого изображения при сжатии по стандарту MPEG-2, можно выбирать способы модуляции несущих и значения защитных интервалов, обеспечивающие передачу требуемого количества ТВ-программ с заданным качеством изображения. По значениям отношения сиг-

нал/шум можно рассчитывать требуемые мощности передатчиков и размеры зон уверенного приема.

Из таблицы видно, что прием сигналов цифрового телевидения возможен при более низких соотношениях сигнал/шум, чем при приеме аналогового (около 50 дБ).

Рассмотрим другие особенности стандарта DVB-T [7.8.1.]. Будем называть символом COFDM совокупность информационных символов, передаваемых в данный момент времени на всех несущих частотах. Символы COFDM организуются в кадры, каждый из которых содержит 68 символов COFDM. 4 кадра образуют суперкадр, который содержит целое число транспортных пакетов MPEG-2. В каждом символе COFDM для режимов модуляции 8K и 2K выделяется, соответственно, 769 и 193 опорных несущих (пилот-сигналов), которые, по сравнению с остальными несущими, передаются с повышенной на 2,5 дБ мощностью. Часть опорных несущих имеют постоянные положения на оси частот, а положения остальных опорных несущих изменяются от одного символа COFDM к другому. Пилот-сигналы используются для синхронизации тактовых частот демодулятора и модулятора, кадровой синхронизации, контроля состояния канала и других целей. Особый пилот-сигнал служит для передачи информации о режиме работы, параметрах защитных интервалов и сверточного кодирования, способе модуляции несущих.

Кадр содержит все необходимые сигналы для синхронизации демодулятора, поэтому длительность задержки начала приема после, например, переключения каналов, не превышает длительности одного кадра.

Стандарт DVB-T предусматривает возможность использования иерархической модуляции. Сущность этого метода состоит в том, что передаваемый цифровой поток разбивается на два потока. Первый поток (с высшим приоритетом) передается с более высокой помехоустойчивостью, и в нем переносится наиболее значимая часть информации. Второй поток, имеющий более низкий приоритет, передается с меньшей помехоустойчивостью. При использовании профилей MPEG-2, имеющих масштабируемость, первый поток может соответствовать базовому слою данных, а второй поток — дополнительному. Иерархическая модуляция дает воз-

возможность принимать телевизионные программы, хотя и с пониженным качеством изображения, при неблагоприятных условиях, например, на значительном удалении от передатчика или при наличии существенных помех, а также на переносные ТВ-приемники.

Еще одна особенность стандарта DVB-T – возможность построения одночастотной сети телевизионного вещания (Single Frequency Network – SFN), в которой соседние передатчики могут одновременно вести вещание на одной несущей частоте, синхронно передавая одну и ту же ТВ-программу, причем, области приема их сигналов перекрываются. В этих зонах, благодаря применению COFDM, наличие сигналов от двух передатчиков не только не ухудшает качество приема, но, наоборот, позволяет улучшить прием за счет сложения двух сигналов. Использование одночастотной сети позволяет охватить наземным ТВ-вещанием большую территорию с использованием относительно маломощных передатчиков.

Рассмотрим последовательность преобразований сигнала, выполняемых при передаче цифрового телевидения по стандарту DVB-T. Первые шесть операций такие же, как для кабельного и спутникового ТВ. Далее выполняются следующие действия:

7. Сверточное кодирование с заданной относительной скоростью.

8. Второе (внутреннее) перемежение, предназначенное для защиты от селективных замираний несущих OFDM. В результате этой операции добиваются, чтобы соседние биты не передавались на соседних несущих.

9. Раскладка потока битов на символы по каждой несущей.

10. Ввод пилот-сигналов и формирование кадров COFDM.

11. Модуляция COFDM. Выполняется обратное дискретное преобразование Фурье (ОДПФ) последовательности символов. Действительная и мнимая части результата ОДПФ преобразуются в аналоговую форму и ими модулируются, соответственно, косинус и синус несущей, т.е. выполняется аналоговая квадратурная модуляция.

12. Перенос модулированного сигнала в нужный частотный канал и передача.

Одним из основных требований к стандарту эфирного вещания была максимальная унификация с предшествующими стандартами спутниково-

го и кабельного вещания [7.8.2.]. Эта прее́мственность хорошо видна на структурной схеме кодера DVB-T, приведенной на Рис. 1.

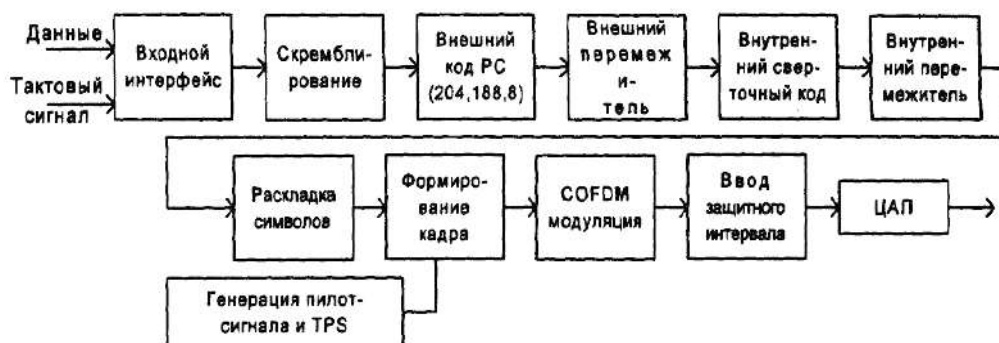


Рис. 1. Структурная схема кодера DVB-T.

Начальные этапы обработки цифрового сигнала, связанные с кодированием, включая внешнее кодирование кодом Рида-Соломона, сверточное перемежение и сверточное кодирование, тождественны DVB-S. Остальные элементы специфичны для OFDM. Включенный после сверточного кодера внутренний перемежитель предназначен для компенсации последствий селективных замираний в канале с многолучевостью, от которых не спасает введение защитных интервалов.

При отражении от близлежащих объектов эхо-сигнал в некоторой узкой полосе частот может быть сравнимым с полезным сигналом и приходиться к приемнику в противофазе с последним, нейтрализуя несколько соседних несущих. Чтобы избежать выпадения сразу нескольких битов, данные по несущим распределяют с частотным перемежением, так что соседние биты оказываются разнесенными по частоте и не попадают в полосу селективного замирания. Перемежение осуществляется в два этапа, как показано на Рис. 2.

На первом этапе цифровой поток с выхода сверточного кодера разделяется на n парциальных потоков, где $n = 2$ для ФМ-2, $n = 4$ для КАМ-16 и $n = 6$ для КАМ-64. Каждый из потоков делится на блоки из 126 битов и поступает на отдельный блоковый перемежитель битов с поразрядным перемежением. Выходные потоки перемежителей группируются по одно-

му биту с каждого выхода, образуя m -битовые кодовые слова, поступающие на вход символьного перемежителя. В последнем перемежение символов происходит по определенному закону внутри блока из $12 \times 126 = 1512$ символов для $\langle 2k \rangle$ модуляции и $48 \times 126 = 6048$ символов для $\langle 8k \rangle$ модуляции.

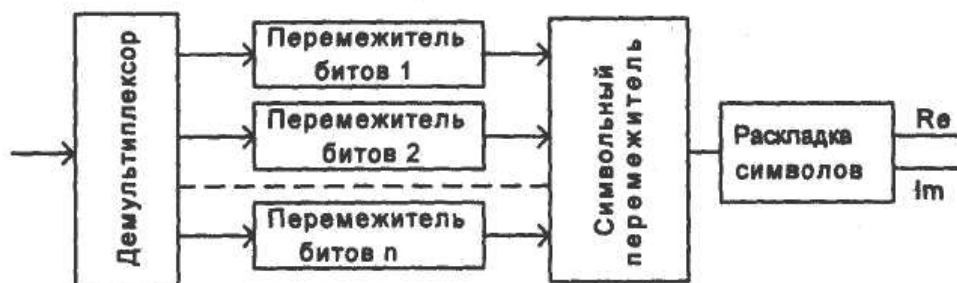


Рис. 2. Перемежение в стандарте DVB-T.

Следующий по порядку модуль в схеме осуществляет раскладку битов на символ COFDM, т.е. направляет к каждой несущей соответствующий кодовый символ с выхода перемежителя. На этом же этапе вводятся маркеры синхронизации и данные TPS.

Модуляция OFDM несущих кодированными сигналами в модуляторе происходит в соответствии с выбранным видом модуляции и манипуляционным кодом. Роль многочастотного модулятора выполняет интегральная микросхема обратного преобразования Фурье (Рис. 3).

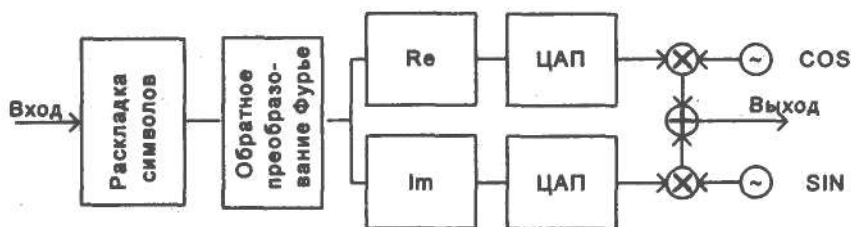


Рис. 3. Модуляция OFDM в стандарте DVB-T.

Полученные комплексные значения коэффициентов разделяются на вещественную и мнимую части и поступают на цифро-аналоговые преоб-

разователи. Вещественная часть умножается на косинусоидальную компоненту несущей частоты, мнимая часть – на синусоидальную, и оба спектра складываются.

Структурная схема приемного тракта цифрового телевидения по стандарту DVB-T [7.8.1.] показана на Рис. 4.



Рис. 4. Структурная схема приемного тракта в стандарте DVB-T.

В тюнере производится выделение нужного частотного канала и перенос его сигнала на ПЧ. Затем сигнал проходит усилитель, управляемый сигналом АРУ, и преобразуется в цифровую форму с помощью АЦП. Далее выполняется квадратурная демодуляция, в результате которой выделяются квадратурные составляющие, соответствующие действительной и мнимой частям сигнала COFDM. Затем производится прямое дискретное преобразование Фурье полученных квадратурных составляющих, в результате чего осуществляется демодуляция COFDM и восстанавливаются передаваемые символы. Данные с блока ДПФ используются для АРУ, а также поступают в блок синхронизации, в котором восстанавливаются несущая частота и тактовые импульсы для АЦП. В блоке коррекции канала анализируются принятые пилот-сигналы, в результате чего оценивается передаточная функция канала связи. Затем выполняется коррекция канала – сигнал каждой несущей умножается на величину, обратную значению найденной передаточной функции канала для этой несущей. В следующем блоке выполняются демперижение второго (внутреннего) перемещения и сборка – операция, обратная раскладке битов по символам. В

результате получается последовательность битов, которая далее поступает на блок коррекции ошибок, аналогичный соответствующему блоку приемника спутникового цифрового ТВ. Все последующие операции такие же, как для кабельного ТВ.

DVB-T не единственная система наземного цифрового ТВ-вещания. В США принят свой стандарт наземного цифрового ТВ, называющийся ATSC (Advanced Television Systems Committee – Комитет по усовершенствованным системам телевидения). В основе этого стандарта также лежит метод сжатия движущихся изображений MPEG-2, позволяющий передавать как ТВ-программы обычной четкости, так и ТВЧ. Для сжатия звукового сопровождения применен метод Dolby AC-3. Для передачи по обычным радиоканалам в ATSC применяется 8-позиционная амплитудная манипуляция с частично подавленной боковой полосой, обозначаемая 8VSB. Имеется несколько ступеней помехоустойчивого кодирования. Для подавления отраженных сигналов при многолучевом приеме в приемнике используется адаптивный эквалайзер, представляющий собой цифровой фильтр с настраиваемыми коэффициентами. В передаваемый сигнал вводятся специальные опорные импульсы, форма и положение которых точно известны. В процессе приема адаптивный эквалайзер автоматически настраивается так, чтобы параметры опорных импульсов на его выходе максимально соответствовали заданным значениям. Тем самым обеспечивается коррекция искажений, создаваемых отраженными сигналами. Так как все сигналы в радиоканале передаются в одинаковых условиях, то в результате настройки эквалайзера по опорным импульсам обеспечивается подавление отраженных составляющих и в остальном цифровом телевизионном сигнале [7.8.2.].

Сравнение стандартов DVB-T и ATSC.

Параметры передаваемых изображений в обоих стандартах одинаковы, так как определяются стандартом MPEG-2. По качеству звукового сопровождения стандарты также эквивалентны, так как в DVB звук тоже может кодироваться с применением стандарта AC-3. Основное различие заключается в применяемых методах модуляции и проявляется в различной устойчивости к действию помех.

Опубликованные результаты испытаний показывают, что DVB-T имеет ряд преимуществ перед ATSC:

- DVB-T обеспечивает реальное уменьшение мощности ТВ-передатчиков в условиях городской застройки;
- при использовании DVB-T прием на комнатные антенны и антенны переносных телевизоров не создает проблем, а при использовании ATSC – это в большинстве случаев невозможно;
- DVB-T обладает высокой устойчивостью к помехам, создаваемым аналоговым ТВ-вещанием, и может сосуществовать с ним;
- DVB-T дает возможность создания одночастотных сетей с перекрытием зон приема сигналов соседних передатчиков.

Еще один стандарт наземного цифрового ТВ-вещания был разработан в Японии; в нем, как и DVB-T, используется COFDM.

Основное отличие японского цифрового стандарта ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting – Цифровое вещание с интеграцией служб) заключается в интеграции различных телекоммуникационных служб. Поэтому телевизор ISDB будет использоваться для цифрового телевидения стандартной и высокой четкости, для цифрового радиовещания, а также для передачи сигналов цифрового телевидения и радиовещания в разнообразных комбинациях и в сочетании с текстом, статическими изображениями, графикой и другими данными – такими, например, как компьютерные программы.

В стандарте ISDB планируется передача дополнительных данных для создания электронного путеводителя по телевизионным программам. В техническом отношении в стандарте ISDB концепция передачи данных является общей для различных вещательных сред – таких, как спутниковое, наземное и кабельное телевидение. В качестве способа передачи данных в системе выбрано частотное уплотнение с ортогональными несущими – OFDM. Стандарт ISDB интегрирует сигналы изображения, сигналы звука и информацию дополнительных служб, передавая их в одном канале связи одновременно, но способ модуляции и параметры кодирования могут устанавливаться независимым образом для сигнала каждой службы. Это помехоустойчивая и гибкая схема, пригодная для работы с дан-

ными разных прикладных служб в различных условиях прохождения радиосигналов.

Стандарт DVB-T2.

Как подтвердила практика, вторая версия спутникового стандарта DVB-S2 по сравнению с первой обеспечивает увеличение пропускной способности канала до 30%. В связи с этим, для передачи ТВЧ повсеместно используется DVB-S2. При попытке внедрить ТВЧ в эфирные сети их ограниченные ресурсы окажутся перегруженными еще быстрее. И так как ТВЧ в любом случае потребует смены абонентских приставок, был поднят вопрос о разработке нового эфирного стандарта, который позволил бы повысить пропускную способность эфирных каналов. В феврале 2006 года в рамках консорциума DVB был создан исследовательский комитет (Study Mission), который определил набор коммерческих требований, определяющих рамки разработки стандарта:

- трансляции должны приниматься на существующие домашние антенны, и переход на новый стандарт не должен требовать изменения инфраструктуры передающей сети.

- обеспечение, как минимум, 30% прироста пропускной способности каналов относительно DVB-T при идентичных условиях передачи.

- улучшение работы одночастотных сетей (SFN).

- возможность сосуществования в одном РЧ-канале услуг, передаваемых с разной степенью помехоустойчивости. Например, часть услуг, транслируемых по одному каналу шириной 8 МГц, может быть предназначена для приема на направленные антенны, установленные на крышах, а часть – для приема на комнатные портативные антенны.

- гибкость использования полосы и частот.

Базовые принципы

Основной принцип разработки стандартов семейства DVB заключается в том, что они должны, максимально, быть совместимы друг с другом. То есть преобразование сигнала при его переводе из одного формата в другой (например, из DVB-S2 в DVB-T2) должно быть максимально

простым. Соответственно, при разработке новых стандартов, по возможности, должны использоваться те же механизмы, что и в существующих стандартах.

Поэтому две ключевые технологии DVB-T2 позаимствованы из стандарта DVB-S2. Это:

- системная архитектура транспортных потоков, в первую очередь, инкапсуляция данных в низкочастотные Base Band (BB) пакеты.

- использование помехозащитного кода с низкой плотностью проверок на четность Low Density Parity Check Codes –LDPC.

Тестовая имитация работы помехозащиты на базе LDPC показала существенное повышение помехозащищенности по сравнению с защитой, используемой в DVB-T, то есть сверточным кодированием в сочетании с кодом Рида-Соломона. Выигрыш в уровне C/N за счет нового FEC может составлять до 3 дБ для типичного уровня ошибок и при одинаковой доле контрольных символов. По существу, это улучшение позволяет повысить пропускную способность канала примерно на 30% (например, за счет применения более высокого уровня констелляции).

При разработке DVB-T2 проводились сравнения нескольких вариантов модуляции с одной или множественными несущими. В результате был выбран вариант OFDM с защитными интервалами (GI-OFDM), который используется в DVB-T. В GI-OFDM каждый символ передается при помощи большого количества ортогональных несущих, модулируемых одновременно по фазе и амплитуде. В частности, DVB-T предусматривает два режима – 2К и 8К. Эти цифры отражают размерность БПФ (FFT), используемого для формирования сигнала с множественными несущими. Фактическое количество несущих, используемых для передачи данных, несколько меньше. Для защиты сигналов (то есть каждой несущей, используемой для передачи данного символа) от искажения в условиях многолучевого распространения введено дублирование конца каждого символа в защитном интервале, предшествующем передаче этого символа. Длина защитного интервала выбирается в зависимости от расчетной протяженности эфирного тракта и других параметров сети передачи. Более длинные защитные интервалы требуются в одночастотных сетях, где сигналы с соседних передатчиков могут приходиться на приемник со значительным опоз-

данием относительно основного сигнала. Защитный интервал представляет собой надстройку, съедающую долю транспортного ресурса.

В DVB-T эта надстройка может занимать до 1/4 общего объема передаваемых данных. Для возможности удлинить защитный интервал без увеличения его доли в общем объеме данных в DVB-T2 были введены два новых режима – 16К и 32К – с соответствующим увеличением числа ортогональных несущих. В данном случае абсолютная величина защитного интервала сохраняется, но его доля в общем объеме снижается.

Таким образом, DVB-T2 предлагает более широкий ряд размерностей БПФ и защитных интервалов. А именно:

- размерности БПФ: 1 К, 2 К, 4К, 8К, 16К, 32К;
- относительная длительность защитных интервалов:
1/128, 1/32, 1/16, 19/256, 1/8, 19/128, 1/4.

Как уже отмечалось, в OFDM каждая несущая модулируется по фазе и амплитуде. Высшая модуляция стандарта DVB-T, 64 QAM обеспечивает передачу 6 бит одним символом. Высшая модуляция в DVB-T2 увеличена до 256 QAM: она позволяет передавать одним символом 8 бит. Несмотря на то, что этот тип модуляции более чувствителен к ошибкам, обусловленным шумом, тестовая имитация показала, что LDPC FEC обеспечивает 30% увеличения эффективности использования канала по сравнению с DVB-T при типовых условиях передачи. Появившиеся в DVB-T2 новые режимы – 16К и 32К имеют значительно более крутой спад внеполосных составляющих, чем режим 2К.

В DVB-T2 используется три каскада перемежений. Это практически гарантирует, что искаженные элементы, в том числе при пакетных ошибках, после деперемежения в декодере будут раскиданы по LDPC FEC-кадру. Это должно позволить кодеру LDPC выполнить восстановление.

В DVB-T2 используется новаторская техника поворота констелляционного созвездия на определенный круговой угол. Такой поворот может существенно повысить устойчивость сигнала при типичных проблемах эфира. За счет поворота диаграммы на точно подобранный угол каждая точка созвездия приобретает уникальные координаты (u_1 и u_2), неповторяемые остальными точками. Принцип показан на Рис. 5.

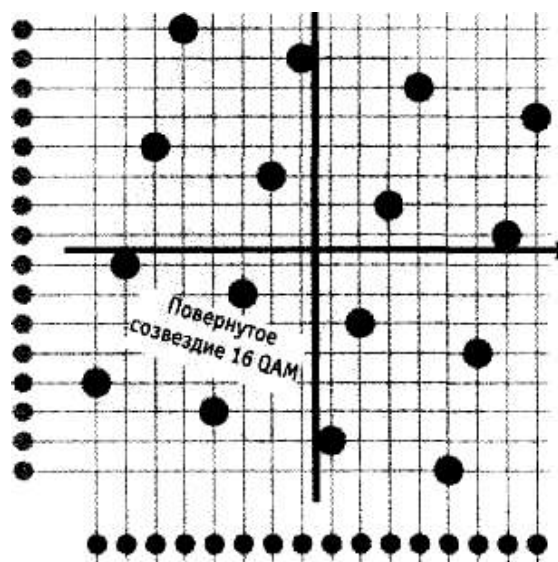


Рис. 5. К принципу поворота констелляционного созвездия.

Каждая координата точки обрабатывается в модуляторе отдельно, и они передаются в OFDM-сигнале отдельно друг от друга, замешиваясь с u_2 и u_1 другого символа (то есть u_2 и u_1 могут передаваться на разных OFDM-несущих и в разных OFDM-символах). В приемнике u_2 и u_1 опять объединяются, формируя исходное констелляционное созвездие, сдвинутое по кругу. Таким образом, если одна несущая или символ будут потеряны в результате интерференции, сохранится информация о другой координате, что позволит восстановить символ, хотя и с более низким уровнем сигнал/шум. При использовании симметричного (не повернутого) констелляционного созвездия разнесение u_2 и u_1 смысла не имеет потому, что символ может быть распознан только по сочетанию двух координат. Каждая из них в отдельности имеет двойников, и уникально только их сочетание. Тестовая имитация показала, что выигрыш в C/N за счет применения этой техники может достигать до 5 дБ.

Значительную долю расходов на передачу составляет стоимость электричества, питающего передатчики. OFDM-сигналы характеризуются относительно высоким отношением пиковой и средней мощностей. В связи с этим в DVB-T2 включены две технологии, позволяющие снизить это отношение примерно на 20%. Речь о следующих двух технологиях:

- **резервирование тона.** В этом случае 1% несущих остается в резерве, не перенося никаких данных, но может использоваться передатчиком для введения сигналов, размазывающих пики.

- **активное расширение конstellационного созвездия.** В этом случае часть крайних точек созвездия отводится дальше от центра так, что это уменьшает пики сигналов. Так как изменения касаются только крайних точек, уводимых в область, свободную от других точек, это не оказывает существенного влияния на способность ресивера декодировать данные.

Таблица 3.

Сравнительные характеристики систем DVB-T и DVB-T2.

	<i>DVB-T (вариант, применяемый в Великобритании)</i>	<i>DVB-T2</i>
Модуляция	64 QAM	256 QAM
Размерность FTT	2K	32K
Защитный интервал	1/32	1/128
FEC	2/3 CC + RC (8%)	3/5 LDPC + BCH (0,3%)
Распределенные пилот-сигналы	8%	1%
Постоянные пилот- сигналы	2.6%	0.35%
Заголовок кадра	1%	0,7%
Полоса	Нормальная	Расширенная
Пропускная способность	24,1 Мбит/с	35,9 Мбит/с

Стандарт также включает сигнализацию, необходимую для будущего применения частотно-временного деления на слоты (TFS – Time Frequency Slicing). Хотя основная спецификация предусматривает прием без применения TFS, в сигнализацию включены отметки, которые позволят будущим ресиверам, оснащенным двумя тюнерами, работать с TFS-сигналами. Такой сигнал будет занимать несколько РЧ-каналов, и разные фрагменты каждой из услуг будут в общем случае передаваться на раз-

ных частотах. Ресивер будет скачками перестраиваться с канала на канал, собирая фрагменты данных, относящихся к принимаемой услуге. Это позволит формировать пакеты с размерами, значительно превышающими допустимые для одного РЧ-канала, что, в свою очередь, даст возможность выигрыша за счет статистического мультиплексирования значительного количества каналов и гибкости частотного планирования.

Сравнительные характеристики систем приведены в Таблице 3.

Из рассмотренного видно, что ожидаемый теоретический прирост пропускной способности при применении нового стандарта составит около 49%.

Стандарты мобильного вещания

Сегодня существует 8 форматов вещания, ориентированных на прием мобильными терминалами.

Во-первых, это форматы DVB-T и DVB-H.

Во-вторых, MediaFLO, закрытая система разработки компании Qualcomm.

В третьих, группа форматов, базирующихся на системе радиовещания DAB. К ней относятся Movio System, разработанная British Telecom, корейские форматы T-DMB и S-DMB, а также европейский профиль формата T-DMB. И, наконец, существует японский стандарт эфирного вещания ISDB-T, по своей гибкости пригодный для любых видов эфирного вещания на любые терминалы.

Поскольку обычно мобильные приемники имеют небольшие экраны, позволяющие воспроизвести картинку формата не более чем 1/4 CIF или 1/8 CIF, питаются от слабых аккумуляторных батарей, которые желательно эксплуатировать в максимально экономичном режиме и используют ненаправленные приемные антенны с небольшим коэффициентом, часто принимающие сигнал в неблагоприятных условиях; для них была разработана специальная система DVB-H (Digital Video Broadcasting-Handheld), по возможности, совместимая с DVB-T, но, одновременно, учитывающая перечисленные особенности приема. На физическом уровне система DVB-H максимально приближена к DVB-T. Поэтому укажем только дополнительные возможности появившиеся в DVB-H.

Во-первых, к режимам модуляции 2К и 8К был добавлен еще один – 4К. Это дало дополнительную степень свободы в плане обмена максимальной скорости передвижения приемника на радиус охвата одной соты. Чем меньшее количество ортогональных несущих используется при COFDM-модуляции, тем больший частотный интервал образуется между соседними несущими, и, соответственно, тем выше скорость движения терминала, при котором прием срывается из-за Допплеровского смещения частот.

С другой стороны, чем меньше несущих, тем короче период, выделенный для передачи каждого COFDM-символа и, соответственно, короче защитный интервал. А сокращение защитного интервала снижает возможности отстройки от многолучевого приема, то есть уменьшает допустимый радиус соты. Для сетей DVB-T, рассчитанных в основном на стационарный прием, значительно более важным фактором является зона охвата. Что же касается сетей DVB-H, то там большую значимость приобретает возможность приема на скорости, а зона охвата в сильной мере ограничивается уровнем сигнала на входе тюнера. Поэтому для возможности выбора компромиссного варианта был добавлен режим модуляции 4К, заполняющий нишу между 2К и 8К. Трансляции в режиме 4К могут приниматься только приемниками DVB-H.

Вторым дополнением на физическом уровне стала возможность более глубокого перемежения данных в режимах 4К и 2К. Канальное кодирование DVB-T предусматривает перемежение данных внутри одного COFDM символа. Оно в основном предназначено для компенсации селективных замираний несущих при многолучевом приеме. В то же время мобильные терминалы с большей вероятностью могут оказаться в зоне действия широкополосных импульсных помех. И, как уже отмечалось, при приеме на скорости появляется Допплеровское смещение частоты, также приводящее к искажениям сигнала. Поэтому в стандартах мобильного вещания на базе COFDM (DAB, ISDB-T) для борьбы с последствиями длительных помех в цикл канального кодирования введено перемежение длинных серий данных, охватывающее десятки, а то и сотни OFDM-

символов. Чем длиннее последовательность данных, участвующих в перемежении, тем эффективнее оказывается борьба с последствиями затуханий. Но для DVB-H такой путь невозможен.

Во-первых, восстановление длинных последовательностей потребовало бы непрерывного приема, в то время как для целей энергосбережения в DVB-H реализован описанный ниже импульсный режим передачи.

Во-вторых, для его осуществления необходимы большие объемы памяти, удорожающие приемник.

В-третьих, это противоречит требованию совместимости с DVB-T.

Поэтому было выбрано компромиссное решение. Для режима модуляции 8К, наиболее актуального для DVB-T, в DVB-H сохранено перемежение битов в рамках одного символа. А в режимах 4К и 2К, где каждый COFDM символ переносит меньшее количество информации, в качестве опции введена возможность временного перемежения, допускаемого объемами выделенной для этих целей памяти. Для 4К перемежение выполняется с глубиной в 2 COFDM-символа, а для режима 2К – с глубиной в 4 COFDM – символа. При активизации этой опции совместная передача трансляций DVB-H и DVB-T невозможна. Одновременно предусматривается опция дополнительной помехозащиты, реализованная на базе IP-дейтаграмм и позволяющая в сильной мере компенсировать отсутствие глубокого перемежения.

Остальные механизмы внешнего и внутреннего канального кодирования, используемые в DVB-T, без изменения перенесены в DVB-H.

Третье дополнение касается транспортной сигнализации (TPS – Transmission Parameter Signalling), в которую добавлены два бита, индицирующие наличие в потоке услуг, передаваемых в формате DVB-H, а также наличие дополнительной кодозащиты, реализуемой на базе IP-дейтаграмм.

Четвертым дополнением стала возможность использования полосы 5 МГц при условии, что она выделяется не в вещательном диапазоне.

7.9. СИСТЕМЫ УСЛОВНОГО ДОСТУПА

Стандарты DVB обеспечивают условный доступ (Conditional Access – CA) к передаваемым телевизионным программам, что позволяет организовывать платное ТВ-вещание. Система условного доступа включает механизм скремблирования ТВ-программ – так называемый общий алгоритм скремблирования (CSA – Common Scrambling Algorithm), подсистему хранения данных о пользователях (Subscriber Management System – SMS) и подсистему шифровки и пересылки ключей, обеспечивающих правильное дескремблирование принимаемых программ пользователям, внесшим соответствующую оплату (Subscriber Authorization System – SAS). Для SMS и SAS определены общие принципы построения. Конкретная реализация системы условного доступа определяется фирмами, ведущими ТВ-вещание и производящими аппаратуру [7.9.1.].

Стандартизирован только алгоритм CSA, причем, эта информация недоступна для простых пользователей, а его реализация скрыта внутри БИС скремблеров и дескремблеров, выпускаемых ограниченным числом фирм. Ключом для дескремблирования является 64-разрядное контрольное слово (КС). Оно время от времени, обычно через несколько секунд, изменяется в процессе передачи программы. Для разных элементарных потоков, входящих в транспортный поток (ТП), могут задаваться разные КС. Этот ключ, в свою очередь, зашифровывается с помощью ключа более высокого уровня – сеансового, который сменяется один раз в несколько недель или месяцев и также передается в цифровом потоке. Контрольные слова передаются в транспортном потоке в особых пакетах, называемых ECM (Entitlement Control Message – сообщение управления предоставлением права). КС передаются зашифрованными, причем, шифр в DVB не определен и может устанавливаться вещательной компанией.

Сеансовые ключи передаются в других пакетах, называемых EMM (Entitlement Management Message – сообщение управления предоставлением права). “Management” – управление более высокого уровня, чем “Control”. EMM могут быть адресованы отдельному абоненту или группе абонентов. Для этого в начале EMM после заголовка есть поле адреса.

ЕММ содержат также другую информацию по управлению условным доступом, в том числе о разрешении просмотра этим абонентом (абонентами) определенных программ в определенные сроки. Информация, передаваемая в ЕММ, так же зашифрована, но иначе, чем КС. В соответствии со стандартом MPEG-2 идентификаторы пакетов ТП, содержащих ЕСМ, передаются в составе таблиц программ РМТ, а идентификаторы пакетов, содержащих ЕММ, – в составе таблиц условного доступа САТ.

Важной частью системы условного доступа являются абонентские карты, продаваемые вещательными компаниями. Абонентские карты относятся к смарт-картам (Smart Card), как и электронные кредитные карточки и т.п. Смарт-карта содержит микроконтролер, имеющий ПЗУ и энергонезависимое ОЗУ (флэш-ЗУ). В соответствии со стандартом ISO 7816, смарт-карта имеет 8 контактов для подключения к цепям устройства, в которое она вставляется. Питание смарт-карты осуществляется от источника напряжения этого устройства, а обмен информацией производится в последовательной форме через два контакта (линия данных и линия тактовых импульсов). Протокол обмена информацией установлен указанным стандартом.

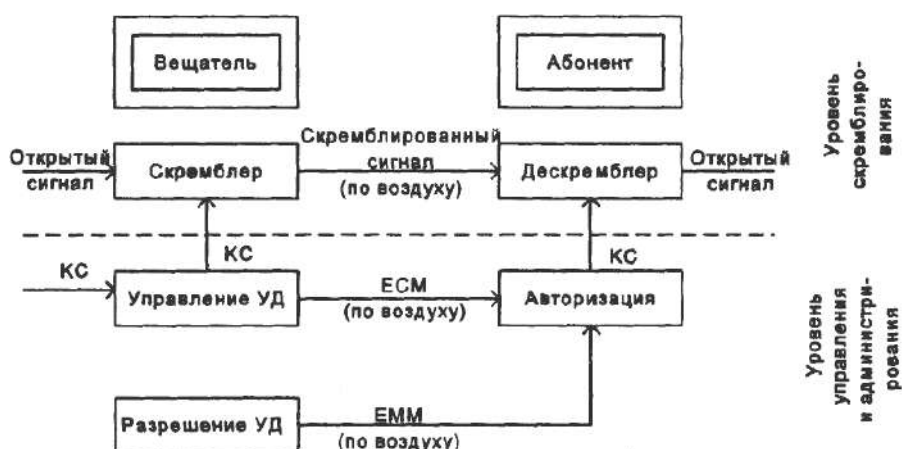


Рис. 1. Схема системы условного доступа.

В абонентской карте ПЗУ микроконтролера записаны алгоритмы дешифрации контрольных слов, сеансовых ключей и другой зашифрован-

ной информации, а в энергонезависимом ОЗУ – сведения о программах, которые может принимать данный абонент, сроках, в течение которых это возможно, и другая информация. Абонентская карта определяет адрес данного абонента, что дает возможность направлять информацию о предоставлении доступа индивидуально каждому абоненту. Обобщенная схема системы условного доступа приведена на Рис. 1.

Рассмотрим более детально процесс скремблирования на передающей стороне (Рис. 2).



Рис. 2. Процесс скремблирования в кодере.

DVB скремблер устанавливается обычно на выходе мультиплексера и скремблирует каждый компонент цифрового потока в соответствии с указаниями управляющего компьютера. Текущее контрольное слово для скремблера и всей системы задает генератор КС. Документы DVB предъявляют жесткие требования к схеме генерации КС, так как оно непосредственно используется для скремблирования цифрового потока. Должна применяться техника, гарантирующая чисто случайный характер цифровой последовательности с минимальной детерминированностью.

Предложены три критерия проверки случайной последовательности на криптографическую надежность:

1) она должна производить на наблюдателя впечатление совершенно случайной;

2) наблюдатель не должен быть в состоянии предсказать следующий бит, даже зная полностью алгоритм и устройство генерирующего прибора;

3) данная последовательность не должна воспроизводиться при повторном запуске генератора от того же входного сигнала.

Обычные ПСП удовлетворяют критериям (1) и (2) и не удовлетворяют критерию (3). Это не значит, что ПСП вообще непригодны для генерации КС, но любой ПСП алгоритм, в первую очередь, становится предметом атаки, и надо следить, чтобы последовательность не только казалась, но и была случайной.

Наилучший метод генерации случайных последовательностей – использование физических процессов (теплового шума, шумового диода) для воспроизведения Гауссова белого шума с плоским амплитудным спектром (например, ± 1 дБ в полосе 100 Гц...120 кГц). Подавая шумовой сигнал на быстродействующий компаратор, получим истинно случайную цифровую последовательность, удовлетворяющую всем трем критериям.

Генератором ЕСМ формирует Сообщения Управления Доступом и передает их мультиплексору. В генераторе ЕСМ происходит зашифровка контрольного слова. Чтобы повысить общий уровень защищенности всей системы, эту функцию передали пластиковой карте с микросхемой, похожей по внешнему виду на абонентскую и имеющей те же степени защиты. Эта карта называется «материнской».

Ввод сообщений ЕММ в мультиплексер осуществляет ЕММ инжектор. Это устройство получает информацию от системы авторизации абонентов SAS, которая, в свою очередь, связана с системой управления подпиской SMS. Первая система отвечает за авторизацию приемника абонента для приема выбранных программ, она хранит в базе данных системные адреса абонентов и ставит им в соответствие права доступа. Во второй системе накапливаются сведения об абонентах (имя, адрес, тип подписки, оплаченное время) и устанавливается связь этих сведений с системным адресом абонента (номером приемника, карточки или абонентского договора).

Приведенное здесь описание функционирования системы УД содержит только общие сведения и описывает процессы, примерно одинаковые для различных систем. Детальное описание алгоритмов и устройств компании-провайдеры услуг УД считают конфиденциальной информацией и не публикуют эти данные.

Один из других связанных с ним блоков телевизионного приемника [7.9.2.], обеспечивающих условный доступ к принимаемым программам, показан на Рис. 3.

Большая интегральная схема дескремблера содержит блок анализа транспортного потока (ТП), ЗУ для хранения нескольких идентификаторов пакетов (ЗУ PID), ЗУ для хранения контрольных слов (ЗУ КС), блок, в котором непосредственно осуществляется дескремблирование, интерфейс для связи с внешним микроконтроллером, и выходной интерфейс.

На вход БИС дескремблера поступает скремблированный ТП с блока коррекции ошибок. После дескремблирования ТП направляется на демультимплексор транспортного потока (ДМП ТП). Важно отметить, что внешний микроконтроллер выполняет только функции управления и связи с абонентской картой, а все операции по дескремблированию выполняются внутри БИС.

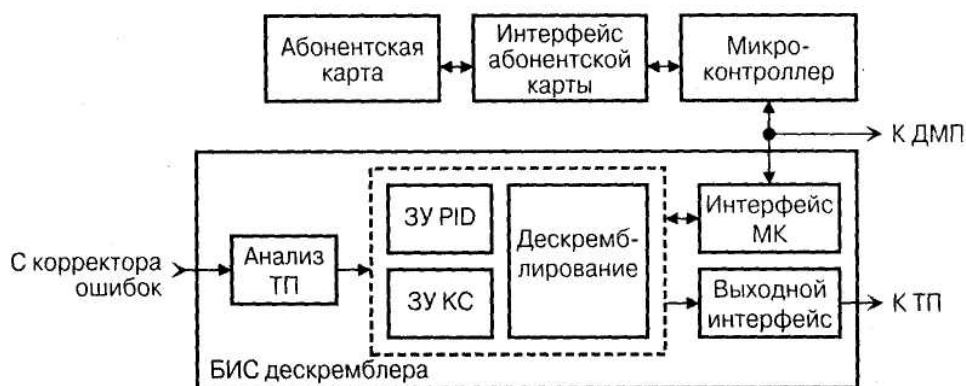


Рис. 3. Вариант построения дескремблера декодера.

Блок анализа ТП содержит так называемые «фильтры», которые обнаруживают в транспортном потоке пакеты с сообщениями условного

доступа (ЕСМ и ЕММ). Данные из этих пакетов сохраняются в буферных ЗУ фильтров. Для выполнения указанной функции микроконтроллер загружает в фильтры идентификаторы пакетов, содержащих ЕСМ и ЕММ, относящиеся к выбранным программам, и адреса длиной 7 или 17 байтов, служащие для выделения сообщений ЕММ, адресованных этому абоненту или группе абонентов, в которую он входит. Одновременно из транспортного потока может выделяться несколько (по числу фильтров) различных ЕСМ и ЕММ, относящихся к разным элементарным потокам. Микроконтроллер считывает данные из буферов фильтров и пересылает их в абонентскую карту, где выполняется дешифровка сеансовых ключей, а с их помощью – контрольных слов. Это возможно только для тех программ, которые абонент оплатил, и, следовательно, информация о разрешении доступа к которым содержится в абонентской карте.

При оплате абонентом новых программ информация об этом поступает в составе адресованных ему ЕММ и записывается в энергонезависимое ОЗУ абонентской карты. Тем самым обеспечивается доступ к просмотру этих программ. После расшифровки микроконтроллер записывает контрольные слова для выбранных программ в ЗУ КС. Кроме того, он записывает в ЗУ PID идентификаторы пакетов выбранных программ. Эти идентификаторы извлекаются из таблиц программно-зависимой информации РАТ и РМТ. Контрольные слова в ЗУ КС обновляются в процессе приема программы по мере их поступления в составе ЕСМ. Для каждого дескремблируемого потока, характеризуемого определенным идентификатором, записанным в ЗУ PID, в ЗУ КС записывается пара 64-битовых контрольных слов, одно из которых называется «нечетным», а другое – «четным». ЗУ КС содержит также контрольное слово «по умолчанию». В заголовке каждого пакета ТП есть 2-битовое поле скремблирования. Комбинация 00 означает, что пакет нескремблирован, 01 – скремблирован с использованием КС «по умолчанию», 10 – скремблирован с использованием четного КС и 11 – скремблирован с использованием нечетного КС. Если пакет скремблирован с помощью КС «по умолчанию», то он дескремблируется вне зависимости от того, записан его идентификатор в ЗУ PID или нет. В других случаях дескремблируются только пакеты, иденти-

фикаторы которых есть в ЗУ PID, и притом с помощью соответствующих этим идентификаторам контрольных слов. Предусмотрена возможность выбора пакетов для дескремблирования по неполному совпадению их идентификаторов с записанными в ЗУ PID. Если пакет ТП успешно дескремблирован, то в его поле скремблирования устанавливается значение 00.

Помимо скремблирования пакетов ТП стандарт MPEG-2 и основанные на нем стандарты DVB предусматривают возможность скремблирования пакетизированного элементарного потока (ПЭП) до включения его в ТП. Заголовок ПЭП содержит двухбитовое поле, показывающее наличие и режим такого скремблирования. Дескремблирование на уровне ПЭП выполняется тем же дескремблером, что и для уровня ТП. Одновременное скремблирование на уровнях ПЭП и ТП не допускается.

Прием сигналов в нескольких системах УД

Отсутствие унификации систем УД приводит к тому, что абонент, желающий принимать программы в нескольких вещательных сетях (например, программы со спутников Hot Bird в точке 13° восточной долготы), должен приобрести для каждой сети отдельный приемник или в лучшем случае отдельную абонентскую карточку (если сети по совпадению используют одну и ту же систему УД). В DVB с самого начала стандартизации была поставлена задача: дать возможность абоненту принимать программы в разных сетях на один приемник [7.9.1.]. Одно из первых решений было найдено путем организации вещания программ одновременно в нескольких системах УД, оно получило название Simulcrypt (Рис. 4).

Для этого на передающей стороне устанавливают оборудование генерации и ввода ЕСМ и ЕММ для каждой из систем и вводят в транспортный поток соответствующее количество управляющих сообщений. При этом каждая программа вещается на несколько популяций приемников с различными системами УД, а каждый приемник-декодер выбирает из цифрового потока ЕСМ и ЕММ сообщения, соответствующее встроенной в него системе УД, игнорируя все остальные. Система позволяет легко перевести вещание на другую систему УД в случае, например, вскрытия компьютерными пиратами. Режим Simulcrypt удобен для абонента, но не

для вещателя, поскольку неэффективно расходуется ресурс пропускной способности канала, снижается надежность системы УД (одновременное вещание означает для каждой системы такую устойчивость, которую имеет самая слабая из систем).

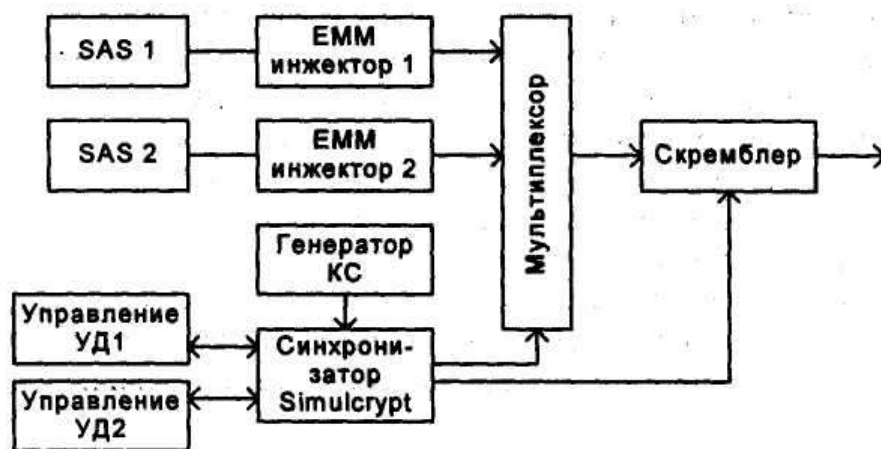


Рис. 4. Система УД Simulcrypt.

Второй путь, предложенный для приема в нескольких системах УД, заключается в том, чтобы выделить в приемнике-декодере все узлы, так или иначе имеющие отношение к УД, в отдельный модуль и сделать этот модуль сменным, легко вставляемым и удаляемым. За приемником остаются функции приема, демодуляции и декодирования MPEG-сигнала, а также возможность приема нескремблированных программ. Этот метод получил название Единый интерфейс (CI – Common Interface). Абонент, желающий принимать программы в разных системах УД, каждый раз при переходе в другую сеть заменяет модуль одной системы на модуль другой. Модуль соединяется с устройством-«хозяином» 68-контактным соединителем, по которому происходит весь обмен информацией УД. Абонентская карточка вставляется в модуль и заменяется вместе с ним. Структурная схема подключения модуля к приемнику приведена на Рис. 5.

Логически интерфейс состоит из двух частей. Первая переносит весь демодулированный сигнал к дескремблеру, находящемуся в модуле, и возвращает часть потока декодеру с дескремблированными компонен-

тами, соответствующими выбранному сервису. Интерфейс допускает цепочечное соединение нескольких модулей CI, каждый из которых обрабатывает в цифровом потоке компоненты, скремлированные «своей» системой УД.

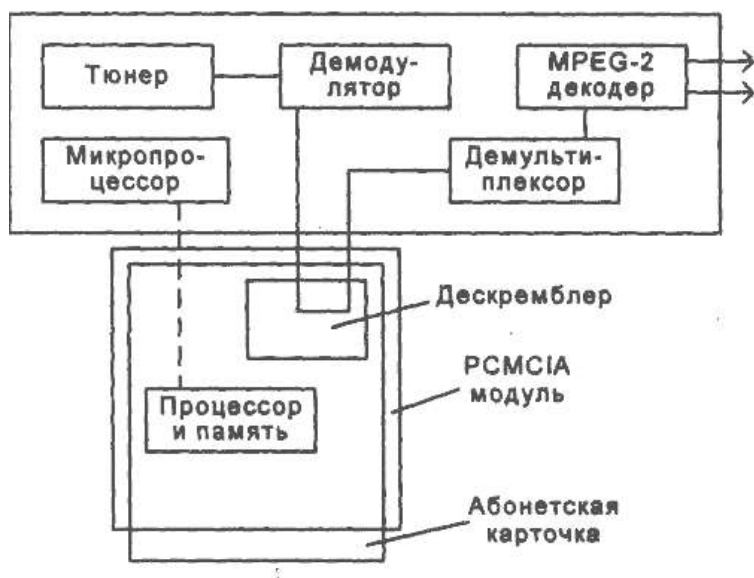


Рис. 5. Структурная схема подключения модуля к приемнику.

Вторая часть более сложная и выполняет функции командного интерфейса между модулем и терминалом-«хозяином». Модуль может обращаться к ресурсам хозяина (модему, дисплею), не информируя его о своих намерениях. Через общий интерфейс также идет взаимодействие высокого уровня «человек-машина» между модулем и абонентом. Например, при запросе IPPV человек может реагировать с помощью пульта дистанционного управления на вопросы, задаваемые модулем, а модуль через модем может связываться с операционным центром сети, и терминал в этих диалогах не участвует. На более низком уровне диалога модуль может посылать на дисплей простые текстовые и графические сообщения.

Гибкость CI позволяет расширять его функции для выполнения других задач.

Управление УД при смене среды вещания

Одним из нерешенных вопросов условного доступа остается управление доступом при смене среды вещания («трансконтроль» по терминологии DVB). Выше упоминалось, что более 60% абонентов в Европе получают ТВ программы со спутников не непосредственно, а через сети кабельного телевидения. При этом оператор кабельной сети, естественно, стремится ввести свою систему условного доступа, которая позволила бы ему сохранять контроль над базой данных абонентов, управлять подключением к сети абонентских блоков и таким образом возмещать свои затраты. Передача управления доступом из одних рук в другие может происходить двумя путями:

- полное дескремблирование сигнала и повторное скремблирование в той же или иной системе УД – крайне неэкономичное решение, требующее установки на всех головных станциях сети дорогостоящего оборудования условного доступа;

- вместо того, чтобы размещать ЕСМ генераторы на всех головных станциях кабельной сети, их можно разместить на нескольких передающих станциях спутникового вещания, чьи программы транслирует кабельная сеть, и дать в спутниковом транспортном потоке дополнительные ЕСМ сообщения, которые затем ретранслируются в цифровой поток кабельной сети. ЕСМ сообщения едины для всей кабельной сети. Их можно генерировать в одном месте и рассылать по головным станциям по низкоскоростным каналам связи. Подсчеты показывают, что это решение более экономичное. Вопросы трансконтроля пока не стандартизованы в DVB.

8. ПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА

8.1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПРИЕМНИКОВ

Телевизионный приемник является универсальным устройством воспроизведения изображения и звукового сопровождения. Он обеспечивает прием цветных и черно-белых передач в метровом и дециметровом диапазонах, имеет устройство декодирования практически всех рассмотренных выше систем телевизионного вещания, вход для видеосигнала и др. Современный телевизор включает ряд сервисных устройств (дистанционное управление, вывод на экран информации о режимах, устройство связи с ЭВМ и др.) [8.3.]. В телевизорах применяют интегральные микросхемы и большие гибридные интегральные микросборки с высокой степенью интеграции. Конструкция, как правило, носит модульный характер. Упрощенная структурная схема цветного телевизионного приемника приведена на Рис. 1. Высокочастотные сигналы с антенны поступают на входы электронных селекторов каналов метровых и дециметровых волн. В селекторе каналов осуществляются переключение диапазонов и перестройка телевизионных каналов в пределах диапазона. Селектор имеет связь с пультом дистанционного управления телевизором. Для обеспечения работы телевизора в различных условиях приема используют схемы автоматической регулировки усиления (АРУ) усилителя высокой частоты селектора. С выхода селектора каналов сигнал поступает на усилитель промежуточной частоты (УПЧ изображения). Промежуточная частота сигнала изображения – 38,0 МГц, а звукового сопровождения – 31,5 МГц. Вторая промежуточная частота звукового сопровождения – 6,5 МГц (разностная частота между несущими $f_{\text{нз}}$ и $f_{\text{зв}}$). В системе SECAM поднесущая частота сигнала $E_{\text{R-Y}}$ составляет 4,406 МГц, $E_{\text{B-Y}}$ – 4,25 МГц. Сигнал

с выхода УПЧ поступает на детектор видеосигнала и – далее в канал яркости, где для установления временного соответствия между сигналом яркости и цветности включена линия задержки ($x = 0,6 \dots 0,8$ мкс). Это устройство служит для компенсации задержки сигналов цветности относительно сигнала яркости, образующейся за счет низкочастотной фильтрации и других преобразований сигналов в канале цветности. В канале яркости, наряду с усилением сигнала изображения, осуществляются его высокочастотная коррекция за счет увеличения коэффициента усиления на высоких частотах, введение гасящих импульсов во время обратного хода, привязка сигнала изображения к уровню черного (путем регулировки этого уровня устанавливается яркость изображения), ограничение предельного тока пучков кинескопа, режекция сигнала, подавляющая компоненты цветowych поднесущих в яркостном сигнале (при передаче черно-белых изображений схема режекции автоматически отключается, что увеличивает их четкость на экране кинескопа). Сигнал яркости отрицательной полярности E'_Y подается на катод кинескопа.

В канал цветности сигнал изображения подается с одного из первых каскадов усиления яркостного канала. Во входных цепях канала цветности осуществляется обратная коррекция предискажений цветоразностных сигналов. С выхода корректора цветоразностные сигналы поступают в прямой канал преобразования (коммутатор) и канал задержанного сигнала. Коммутатор и устройство задержки вместе с детекторами R-Y и B-Y формируют цветоразностные сигналы, которые после усиления подаются на модуляторы кинескопа. Для формирования сигнала E'_{G-Y} используют матрицу G-Y. В канале цветности, наряду с упомянутыми элементами, используют ограничители, формирователи и другие схемы. Коммутатор синхронизируется генератором коммутирующих импульсов, который управляется сигналами схемы опознавания цвета. Использование в канале цветности двух линий задержки на ПЗС позволяет реализовать двухстандартный (SECAM/PAL) прием сигналов. На элементах ПЗС реализуют и другие узлы приемника – полосовые и режекторные фильтры, частотные детекторы.

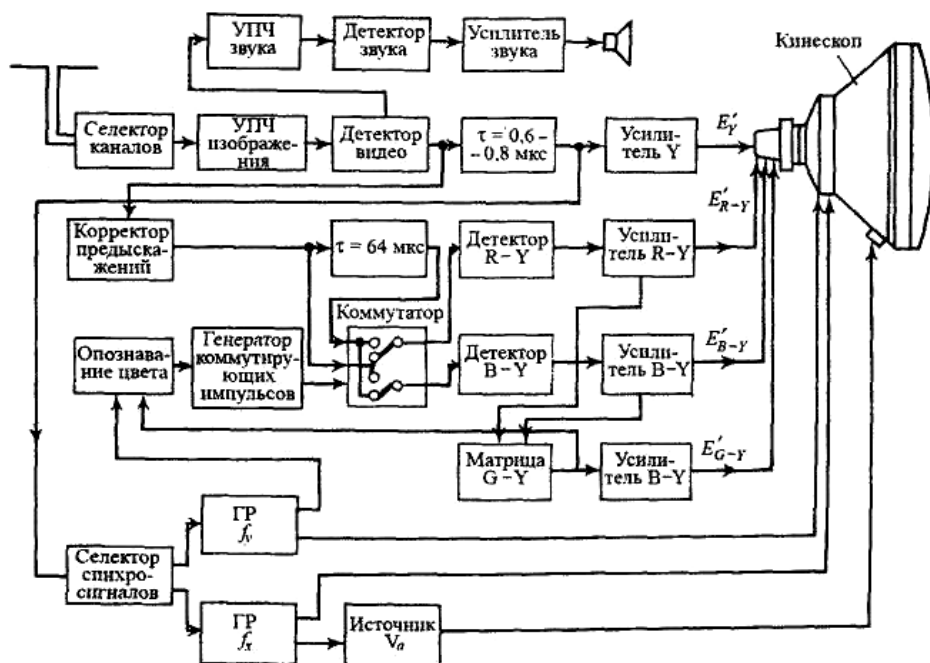


Рис. 1. Структурная схема цветного телевизионного приемника.

В канале синхронизации видеосигнал, поступающий из канала яркости на селектор синхросигналов, подвергается фиксации на уровне амплитуд синхроимпульсов и амплитудному ограничению на уровне селекции. Точность синхронизации определяется схемой фиксации и особенностями ограничителя сигнала изображения. Дальнейшее разделение кадровых и строчных синхросигналов осуществляется различными способами, наибольшее распространение среди которых нашли основанные на дифференцировании и интегрировании сигналов синхронизации. Сигналы опознавания для схемы цветовой синхронизации выделяются путем временной селекции, базирующейся на синхронизации кадровыми синхросигналами. Генераторы строчной и кадровой разверток ($\text{ГР } f_x$, $\text{ГР } f_k$), управляемые соответствующими синхросигналами, формируют токи, питающие отклоняющие катушки вертикального и горизонтального отклонения электронных пучков кинескопа. Для коррекции искажений раstra, возникающих при больших углах отклонения электронных пучков

(вследствие нарушения пропорциональности между значениями отклоняющего тока и углами отклонения), в генераторах развертки формируют дополнительные токи, добавляемые к токам развертки и компенсирующие указанные искажения раstra. Для создания высокого напряжения главного анода кинескопа $U_a = 22,5 \dots 25$ кВ используют схему, связанную со строчным трансформатором, – умножитель напряжения (выпрямление импульсов обратного хода строчной развертки и импульсного напряжения, трансформируемого в высоковольтную обмотку).

Канал звукового сопровождения включает УПЧ звука ($f_{зв} = 6,5$ МГц), частотный детектор, усилитель низкой частоты и динамический громкоговоритель.

Ряд задач, связанных с обработкой сигнала изображения, управлением телевизионным приемником и др. успешно решаются цифровыми методами. Такие телевизоры относят к классу аналого-цифровых. Практически все современные телевизионные приемники, используемые в системах телевизионного вещания, относятся именно к этому классу устройств. Применение цифровых методов обработки и преобразования сигналов приводит к повышению качества формируемого изображения, реализации дополнительных функций, а также к возможности широкого использования больших интегральных микросхем, микропроцессоров, схем памяти и др. Цифровая обработка сигналов в телевизионном приемнике, т.е. на заключительном этапе формирования изображения, привела к созданию систем телевидения повышенного качества.

К числу дополнительных функций, реализуемых в таких телевизорах можно отнести:

- дистанционное управление;
- повышение помехоустойчивости;
- удвоение частоты полей (50/100 Гц);
- преобразование чересстрочной развертки в прогрессивную;
- цифровую развертку;
- автоматическую регулировку яркости и контрастности изображения;
- внутренние интерфейсы, реализующие блочную структуру;
- цифровые интерфейсы для обеспечения работы ЖК или ПП-экранов;

- интерфейсы для подключения внешних устройств (компьютера, видеомagnetофона, фотоаппарата и др.);
- обработку сигналов звука;
- телетекст и др.

Управление устройствами, реализующими перечисленные функции, осуществляется микроконтроллером, включающим микропроцессор, микросхемы памяти, программируемые устройства, порты ввода/вывода и др. Функциональную схему аналого-цифрового приемника условно можно разделить на аналоговую и цифровую части. Основными элементами аналоговой части являются: на входе – селектор каналов, УПЧ-изображения, УПЧ-звука, на выходе – усилители Y , $R-Y$, $B-Y$ и $G-Y$.

Цифровая часть включает следующие основные структурные элементы:

- центральный процессор (реализует управление всеми процессами цифровой части телевизора);
- видеопроцессор (осуществляет цифровую обработку сигналов изображения, в том числе преобразование полного цветного сигнала в сигналы яркости, цветности и синхронизации и др.);
- процессор разверток (формирование аналоговых или цифровых разверток, конверсия режимов развертки 50/100 Гц, изменение формата кадра – $4 : 3, 16 : 9$, управление и реализация режима «картинка в картинке» и др.);
- аудиопроцессор (реализует различные режимы звукового сопровождения, такие, как монофонический, стереофонический, псевдостереозвука, различные режимы коррекции звуковоспроизведения и др.).

В аналого-цифровых телевизионных приемниках используют системы дистанционного управления. Такие системы включают пульт управления и приемник сигнала управления, который располагают непосредственно в телевизоре. Пульт состоит из клавиатуры, кодирующего устройства и передатчика, излучающего инфракрасный сигнал. Сигнал, принятый инфракрасным приемником телевизора, декодируется и поступает на соответствующее исполнительное устройство через интерфейсы выбора каналов, аналогового интегратора (регулировки контрастностью, яркостью, громкостью и другими параметрами изображения и звука).

Следует отметить, что известны различные концепции построения функциональных схем аналого-цифровых приемников. Различные фирмы используют и разрабатывают различные комплекты микросхем: это приводит к существенному различию структуры телевизоров. Общей тенденцией является постепенная замена аналоговых функциональных элементов цифровыми.

Следует учесть, что в телевизионном вещании используются не только различные способы передачи сигналов (спутниковое, кабельное и наземное вещание), но и различные стандарты (ATSC, DVB, ISDB). Это ограничивает степень унификации цифрового телевизионного приемника, однако использование единых принципов кодирования цифровых сигналов изображения, основанных на стандарте MPEG-2, позволяет создать универсальную структуру цифрового приемника [8.1.].

Основные элементы приемника-декодера системы цифрового вещания, используемого в качестве «приставки» к аналого-цифровому телевизору, приведены на Рис. 2.

Модулированные высокочастотные сигналы (радиосигнал) поступают на вход канального декодера, который включает цифровой демодулятор и схему коррекции ошибок. На его выходе формируется цифровой транспортный поток, включающий пакеты нескольких мультиплексированных программ. В демультимплексоре транспортного потока формируются два потока цифровых сигналов (видео и звука), соответствующие выбранной программе. Сигналы изображения поступают на видео-декодер.

Сигналы звука, формируемые на выходе демультимплексора транспортного потока, поступают на аудио-декодер (MPEG-2). Формируются сигналы левого и правого звуковых каналов и в сумматоре сигнал монофонического канала. Как видно из Рис. 7, образованные сигналы каналов изображения и звука подаются на модулятор, на выходе которого формируется высокочастотный сигнал, соответствующий используемой системе аналогового телевидения (на Рис.7 – системе PAL). Этот сигнал подается непосредственно на антенный вход телевизионного приемника.

В числе дополнительных элементов на схеме указан модуль условного доступа, с помощью которого идентифицируются пакеты программ, и проводится сопоставление с правами пользователя на прием той или

иной программы (платное телевидение). В необходимых ситуациях дальнейшая обработка сигналов выбранного канала прекращается.

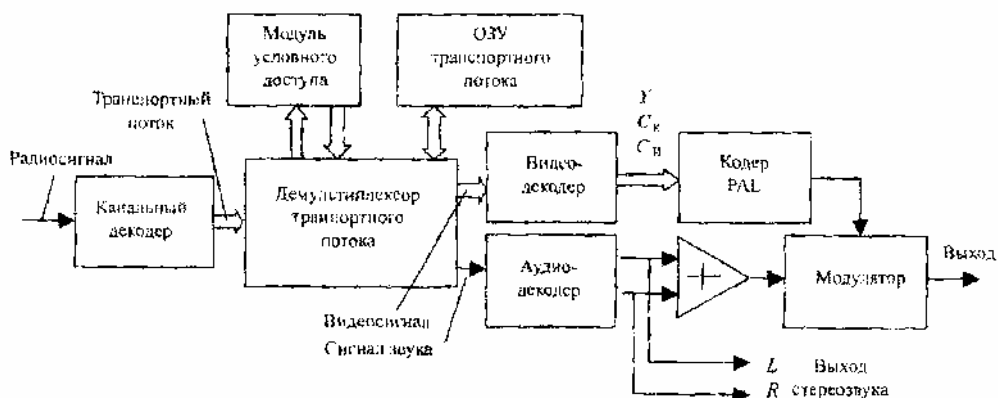


Рис. 2. Структурная схема декодера системы цифрового вещания.

На схеме Рис. 2. не указаны такие функциональные узлы, как элементы управления канальным декодером, кодером PAL, шина микропроцессора, элементы оперативной памяти видео- и аудио-декодеров, элементы временного согласования сигналов изображения и звука, микроконтролер системы управления декодером и др. Рассмотренные элементы приемника-декодера могут быть интегрированы в единую конструкцию с аналоговым телевизионным приемником.

Разработка универсального и полностью цифрового телевизионного приемника возможна, но, наряду с отдельными инженерными проблемами, она затрагивает экономические аспекты и интересы как производителей, так и пользователей.

8.2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКИЕ

Кинескоп

Для формирования черно-белого телевизионного изображения чаще всего используют электронно-лучевую трубку-кинескоп (Рис. 1). Основ-

ными элементами кинескопа являются электронный прожектор, формирующий электронный пучок, плотность тока которого изменяется под действием изменяющегося потенциала модулятора (управляющего электрода), система фокусировки и отклонения электронного пучка и слой люминофора, нанесенный на внутреннюю, практически плоскую или абсолютно плоскую поверхность колбы. Этот слой образует экран, на котором формируется телевизионное изображение.

В современных кинескопах используют электростатическую фокусировку электронного пучка. Для этого применяют трехэлектродные или более сложные системы, включающие термокатод, модулятор, ускоряющий электрод, аноды и фокусирующий электрод [8.3.].

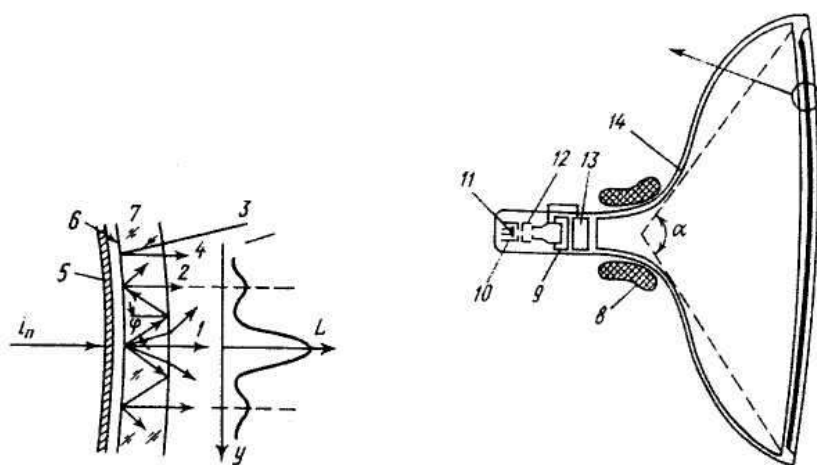


Рис. 1. Кинескоп (черно-белый).

- 1–4 – лучи; 5 – алюминиевое покрытие; 6 – люминофор; 7 – стекло;
8 – отклоняющая система; 9 – фокусирующий электрод;
10 – модулятор; 11 – термокатод; 12 – ускоряющий электрод;
13 – анод; 14 – главный анод.**

Модуляцию тока электронного пучка (яркости экрана) осуществляют изменением разности потенциалов между термокатодом и модулятором. С этой целью на модулятор подается сигнал изображения в положительной полярности или на катод – в отрицательной.

В качестве люминофоров используют силикаты, сульфиды, оксиды и фосфаты металлов цинка, кадмия, магния и т.д. с добавками активаторов (меди, серебра, марганца и др.) для обеспечения требуемой спектральной характеристики излучения.

Построение телевизионного раstra, формируемого электронным пучком, осуществляется благодаря отклонению его с помощью магнитного поля, создаваемого двумя парами отклоняющих катушек (см. Рис. 1). Пара строчных отклоняющих катушек служит для отклонения электронного пучка в горизонтальной плоскости, а пара кадровых обеспечивает отклонение его по вертикали. Строчные и кадровые отклоняющие катушки располагаются во взаимно перпендикулярных плоскостях. Основным достоинством электромагнитного отклонения является возможность получения больших углов отклонения более 110° , что приводит к созданию удобной конструкции колбы кинескопа.

Для увеличения контрастности и яркости изображения на люминофор с внутренней стороны наносят тонкое алюминиевое покрытие. Такой слой практически «прозрачен» для электронного пучка: вместе с тем, световой поток, отраженный от алюминиевой пленки, приводит к существенному увеличению яркости изображения. Алюминиевое покрытие, таким образом, препятствует проникновению светового потока от люминофора внутрь колбы, который мог бы снизить контрастность формируемого изображения за счет отражения света от внутренних поверхностей колбы кинескопа в сторону экрана.

Заметное снижение контрастности мелких и средних деталей изображения возникает вследствие засветки участков изображения светом, претерпевающим полное внутреннее отражение от границы раздела стекло-воздух. Это снижает контрастность смежных деталей изображения. Для существенного уменьшения рассмотренного явления увеличивают поглощение света в стекле, на которое наносится слой люминофора (используют дымчатое стекло). Использование в кинескопах дымчатого стекла уменьшает влияние на качество изображения внешней засветки. Световые лучи от внешних источников света 3 отражаются от слоя люминофора 4 и повышают яркость темных участков изображения, что приводит к снижению его контрастности.

В телевидении используется аддитивный метод формирования цветного изображения, который основан на сложении цветов. В цветном кинескопе возможность раздельного управления структурами R, G, B реализуется с помощью теневой маски (Рис. 2, а). Конструкция кинескопа и его электронно-оптической системы обеспечивает сведение трех пучков в общей точке, лежащей в плоскости теневой маски. Мозаичный люминофор находится на некотором расстоянии от маски, что создает условия для возбуждения сигналами соответствующих элементов мозаичного экрана. Отклонение всех пучков осуществляется одновременно и непрерывно, в связи с чем необходимо обеспечить прерывание электронных пучков в отрезки времени перехода их с одной триады люминофоров на другую. Это и осуществляется с помощью маски. Высокие требования предъявляются к изготовлению узла электронных прожекторов. Сложность конструкции и существенное влияние ее на качество цветного изображения приводят к необходимости использования дополнительных устройств коррекции траекторий электронных пучков. Например, неточность установки электронных прожекторов приводит к возбуждению не только люминофора заданного цвета, но и части соседних. Это, естественно, снижает чистоту цвета. Для устранения подобных дефектов служат постоянные магниты чистоты цвета, имеющие форму кольца, которые устанавливаются на горловину кинескопа. Другим источником искажений является несведение электронных пучков в одно отверстие маски при отклонении их от оси трубки, что приводит к существенным искажениям в виде цветовых окантовок и искажениям цвета мелких деталей изображения. Для устранения этих искажений используют устройство сведения электронных пучков – постоянные магниты статического и электромагниты динамического сведения, которые располагают на горловине кинескопа.

Другой разновидностью трехлучевого кинескопа является трубка с теневой маской, имеющей щелевые отверстия, штриховой мозаичный экран и электронные прожекторы, расположенные компланарно в одной плоскости. Принцип действия щелевой маски поясняет Рис. 2, б. Маска представляет собой пластину с вертикальными прорезями, которые располагаются в шахматном порядке, что служит увеличению механической прочности маски.

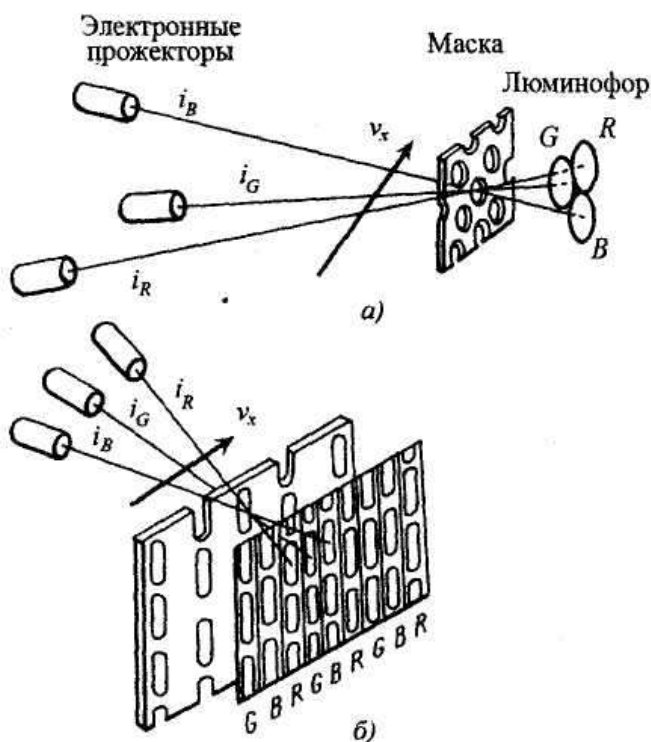


Рис. 2. Принцип действия щелевой маски.

Экран такого кинескопа состоит из чередующихся по три (R, G, B) полосок люминофоров. Их последовательность обратна расположению электронных прожекторов. В таких кинескопах упрощаются условия сведения электронных пучков, так как средний пучок направлен вдоль оси кинескопа, что приводит к необходимости только горизонтального сведения; большая прозрачность маски (более 20%) приводит к увеличению яркости изображения, улучшается чистота цвета, так как погрешности, вызывающие вертикальные сдвиги пучков, не приводят к возбуждению соседних люминофоров. Перечисленные особенности позволяют индивидуально подбирать форму магнитного поля отклоняющей системы для каждого конкретного кинескопа с последующей фиксацией отклоняющей системы на горловине.

Жидкокристаллические, плазменные и автоэмиссионные экраны

Внимание конструкторов телевизионной аппаратуры всегда привлекали устройства, имеющие вид плоской панели, обеспечивающие формирование изображений большого размера (диагональ экрана от метра до десятков метров). К числу преобразователей такого типа можно отнести плоские экраны на жидких кристаллах, плазменные экраны, матричные экраны на светодиодах и др. Не все приборы названных типов удовлетворяют требованиям ТВ-стандартов, но они широко используются в качестве компьютерных дисплеев, индикаторов различного вида, устройств мультимедиа, в видеоискателях ТВ камер и фотоаппаратов.

Жидкокристаллические устройства воспроизведения изображений

Жидкокристаллические матрицы (ЖК) можно разделить на два типа: с пассивными и активными элементами. Матрицы с активными элементами формируют цветное изображение более высокого качества, поэтому они нашли широкое применение в устройствах воспроизведения изображений. Основным отличием матриц этого типа является наличие ключевых транзисторов, которые управляют работой каждого из (R, G, B) цветоделенных участков любого элемента изображения матрицы. С этим связано и название матриц этого типа: TFT-LCD (Thin Film Transistor – Liquid Crystal Display – матрица на базе ЖК элементов с тонкопленочными транзисторами). Принцип работы ЖК модулятора поясняет Рис. 3, на котором изображен фрагмент матрицы, соответствующий одному элементу изображения.

Матрица является модулятором поступающего от внешнего источника светового потока, в результате чего формируется изображение. Для управления прозрачностью среды, соответствующей каждому элементу матрицы, используется явление поляризации света. Конструкция матрицы включает две стеклянные подложки толщиной около 1 мм. Зазор между подложками составляет единицы микрометров: он строго соблюдается по всей площади матрицы, для чего конструкция матрицы включает спе-

циальные зазорозадающие элементы: шарики или цилиндры из твердого материала – спейсеры. Именно в этот зазор вводится ЖК материал, обладающий эффектом вращения плоскости поляризации света при приложении к полупрозрачным электродам, между которыми он находится, электрической разности потенциалов. Эти электроды, а также электроды адресации и управления наносятся на внутренние поверхности стеклянных подложек. Естественно, вся конструкция с торцов герметизируется. На внешние поверхности подложек наклеиваются поляризационные фильтры с определенной ориентацией плоскости поляризации. Цветные светофильтры, как показано на Рис. 3, устанавливаются на внутренней поверхности внешней стеклянной подложки. Нетрудно увидеть, что при формировании цветного изображения используется, как и в масочном кинескопе, метод пространственного смешения световых потоков. Каждая тройка (R, G, B) составляет один элемент изображения. Для формирования просвечивающего светового потока применяется равномерная флуоресцентная или другая подсветка, освещающая экран изнутри.

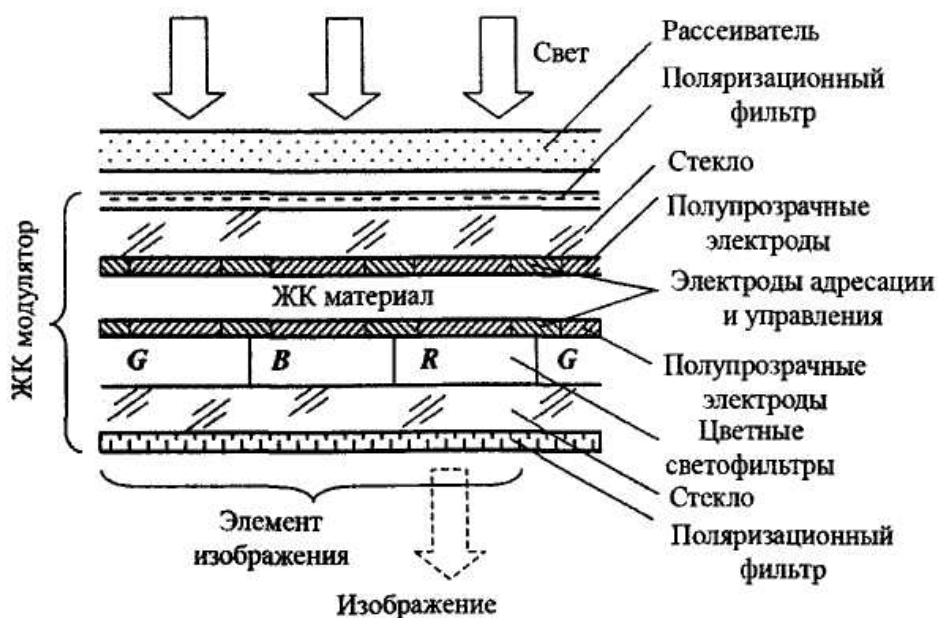


Рис. 3. Принцип работы ЖК модулятора.

Рассмотрим более подробно механизмы взаимодействия элементов ячейки матрицы, модулирующей световой поток. Векторы плоскостей поляризации первого (от источника света) и второго поляризационных фильтров повернуты один относительно другого на 90. При прохождении через первый поляроид теряется половина светового потока. В отсутствии внешнего электрического поля ЖК материал поворачивает плоскость поляризации оставшейся части светового потока на 90 градусов, т.е. плоскость поляризации совпадает с плоскостью поляризации второго поляроида, и свет практически без потерь проходит через него. Если между полупрозрачными электродами создать разность потенциалов, то можно реализовать условия, при которых плоскость поляризации проходящего через толщу ЖК материала не изменяется, и он будет полностью поглощаться во втором поляризационном фильтре. Таким образом, управляя разностью потенциалов между полупрозрачными электродами, можно осуществлять модуляцию проходящего светового потока. Для этого в матрицах рассматриваемого типа каждый элемент изображения включает тонкопленочные TFT-транзисторы или диоды, а также емкости памяти, которые формируют ключевой управляющий элемент.

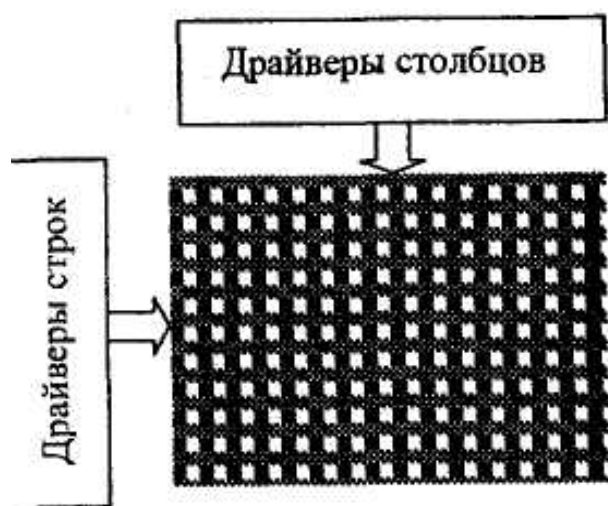


Рис. 4. Структура электродов адресации.

Рассмотренные элементы объединяются в матрицу. Используют различные форматы топологии матричных ЖК дисплеев, а также разные варианты синтеза структуры электродов адресации. На Рис.4 приведен наиболее простой и часто используемый вариант, основанный на применении двух скрещенных полосковых структур.

Структура электродов адресации определяется выбранным вариантом топологии цветных фильтров.

В ЖК модуляторах активного типа, благодаря наличию в каждом элементе емкости памяти, в отличие от ЭЛТ, имеется возможность управления длительностью «свечения» каждого элемента изображения. Это позволяет существенно изменить временную структуру смены кадров. Для формирования полутонового изображения на экране ЖК матрицы может использоваться управление длительностью свечения элементов, т.е. широтно-импульсная модуляция (ШИМ) или более сложные технологии.

Как было отмечено, непосредственно ЖК-матрица является модулятором светового потока, создаваемого источником задней подсветки. В качестве таких источников используют электролюминесцентные панели или лампы, панели светодиодов, лампы накаливания и др.

Естественным путем увеличения размера изображения стало создание составных видеопанелей (Рис. 5). Такие экраны используют как устройства коллективного пользования (аудитории, концертные залы, стадионы и др.).

Плазменные устройства воспроизведения изображений.

Плоские плазменные панели (ПП) – PDP (Plasma Display Panel) широко используются как элементы ТВС, а также в телевизионных приемниках различного конструктивного выполнения. Как и в ЖК-дисплеях, экран ПП представляет собой матрицу, включающую триады {R, G, B} элементов. Модель, раскрывающая процессы взаимодействия компонентов одного из цветовых элементов изображения (например, R) плазменной панели приведена на Рис. 5.

Принцип действия такого элемента основан на свечении люминофоров красного, зеленого и синего цвета при воздействии на них ультрафио-

летового излучения, которое возникает при электрическом разряде в среде разряженного газа. Люминофор каждой ячейки ПП покрывает заднюю и частично боковые стенки отдельных ячеек.

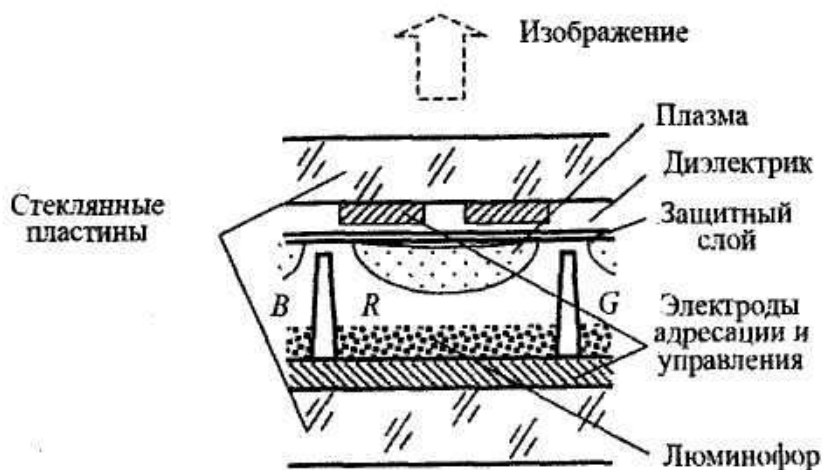


Рис. 5. Принцип действия PDP.

В конструкции плазменных панелей предусмотрено использование поверхностного разряда, который происходит между электродами, размещенными в одной плоскости. Этот разряд возникает под воздействием подводимого к электродам напряжения (на Рис.6 у верхних электродов). Эти электроды прозрачны для света. Электрический разряд приводит к ионизации газа и образованию плазмы. Плазма, как известно, представляет собой частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы. Плазма и является источником ультрафиолетового излучения. Вся конструкция плазменной панели заключена между двумя стеклянными пластинами. На внутренние поверхности этих пластин нанесена система полосковых электродов, слои диэлектрика, люминофоры и перегородки, отделяющие одну излучающую ячейку от другой. Пространство между пластинами заполнено рабочим газом, и вся конструкция герметизирована по периметру панели. Развертка изображения осуществляется под воздействием электрических сигналов, подводимых к электродам адресации. На экране матрицы формируется телевизионный растр.

Особенность формирования изображения на экране плазменной панели состоит в том, что яркость каждого элемента при возбуждении люминофора остается постоянной. Модуляция средней яркости свечения элемента (за время кадра) и, следовательно, формирование воспринимаемого наблюдателем полутонового изображения осуществляется за счет изменения длительности свечения: наиболее «яркие» элементы светятся практически в течение всего времени кадра, в то время как «темные», – в течение очень короткого времени. Управление яркостью каждого элемента изображения осуществляется посредством изменения времени свечения соответствующей ячейки плазменной панели. Конструкция и элементы панели обеспечивают формирование изображения в широком угле зрения: по горизонтали до 160° .

К числу недостатков ПП относится достаточно высокое энергопотребление, которое возрастает с увеличением размера панелей.

Автоэмиссионные устройства воспроизведения изображений

К числу устройств воспроизведения телевизионных изображений относятся плоские автоэмиссионные панели, в которых, как в кинескопах и плазменных панелях, используется явление электролюминесценции. Возбуждение люминофоров в устройствах этого типа осуществляется электронами, генерируемыми автоэлектронными эмиттерами; с этим связано и название приборов такого типа – FED (Field Emission Display).

Принцип действия FED-панели подобного типа поясняет на Рис. 6.

Плоская конструкция прибора между подложкой и стеклянной планшайбой содержит полосковые катоды с множеством эмиттеров игольчатого типа. Каждому из эмиттеров соответствует отверстие в управляющем электроде. В конструкции, указанной на Рис.6, на элемент изображения соответствующего цвета приходится 4 эмиттера. Путем изменения расстояния между эмиттерами и управляющими электродами устанавливается необходимая величина электрического поля, требуемая для возникновения автоэлектронной эмиссии. Изменяя разность потенциалов между эмиттерами и управляющими электродами, осуществляют регулировку плотности тока, достигающего соответствующего люминофора. Полоски люминофоров (R, G, B) нанесены на стеклянную планшай-

бу. Нетрудно увидеть, что, используя соответствующие переключения разности потенциалов между эмиттерами и управляющими электродами, можно осуществить коммутацию элементов телевизионного раstra и возбуждение соответствующих участков поля изображения. Адресация электронных пучков на люминофоры соответствующих цветов осуществляется путем отпираания эмиттеров только одного цвета. Большинство приборов рассмотренного типа работают при разности потенциалов между катодами и анодом порядка 300–5000 В. Как видно, в приборе отсутствует необходимость отклонения электронных пучков, так как расстояние между эмиттерами и люминофорами порядка одного миллиметра, и поэтому реализуется перенос электронов пучка от эмиттера к соответствующему участку люминофора непосредственно в электрическом поле. Таким образом, решаются проблемы не только обеспечения линейности развертки, но и совмещения цветоделенных изображений.

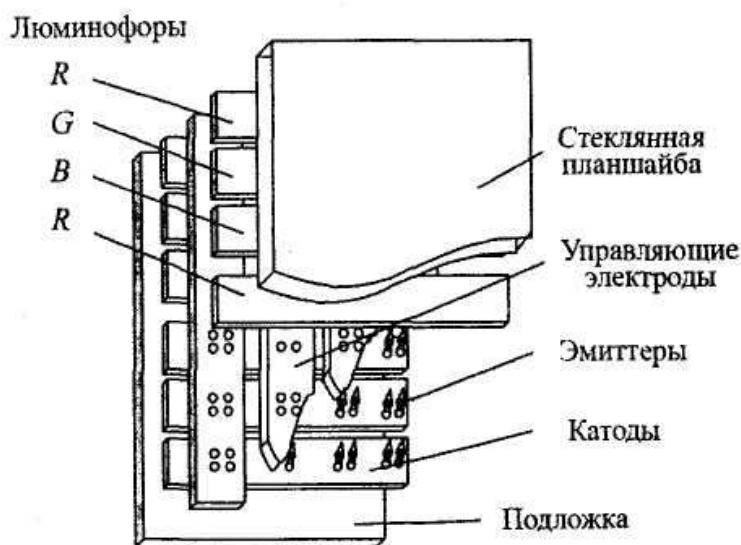


Рис. 6. Принцип действия FED-панели.

К числу основных достоинств приборов этого типа следует отнести высокую яркость воспроизводимого цветного изображения, большой угол диаграммы направленности излучения, малую инерционность. Толщина панели – 10 мм.

8.3. ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЬ В ТЕХНИКЕ ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Оценка качества телевизионных изображений с помощью испытательных таблиц

Большой объем технических средств, используемых в процессе телевизионного вещания, требует непрерывного контроля за его качеством. Широко распространенным средством постоянного контроля является наблюдение телевизионного изображения на экранах мониторов. Мониторы включаются во всех узловых точках видеотракта телецентра, начиная от телевизионной передающей камеры и кончая выходом на радиопередатчик.

В эксплуатационных условиях быструю оценку качества телевизионного изображения и тракта передачи производят с помощью испытательных таблиц (Рис. 7).

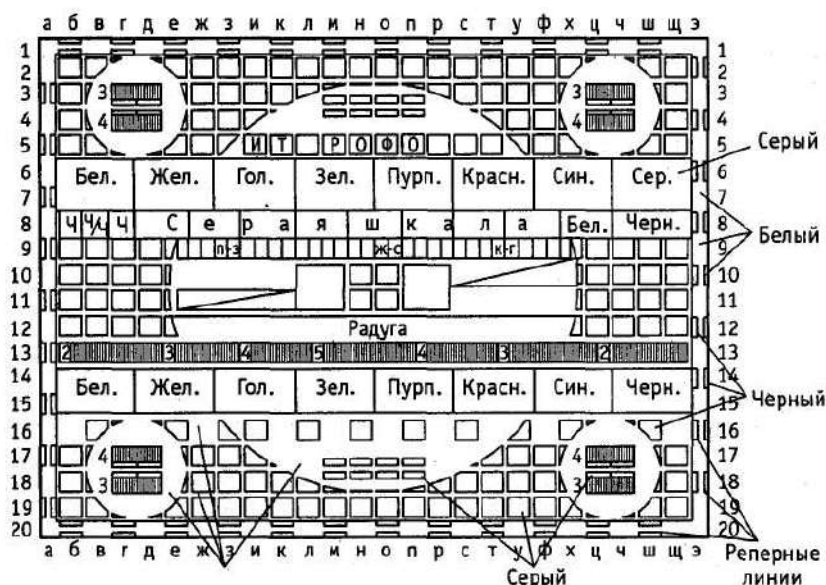


Рис. 7. Измерение качества изображения в цифровых телевизионных каналах с компрессией.

Наиболее часто оценку качества телевизионных изображений осуществляют с помощью универсальной электронной испытательной таблицы — УЭИТ. Если изображение таблицы соответствует установленным нор-

мам, то гарантируется номинальное качество при наблюдении реальных сюжетов. Таблицы содержат элементы, с помощью которых можно судить об искажениях сигналов и иметь представление о соответствующих изменениях параметров отдельных звеньев тракта. С помощью УЭИТ проверяются следующие параметры: геометрические размеры, формат кадра и центровка изображения; геометрические и нелинейные искажения раstra; яркость и контраст изображения; размах полного телевизионного сигнала и его составляющих; качество и устойчивость синхронизации; статическое и динамическое сведение лучей; линейные искажения сигналов; яркостная и цветовая четкость; баланс белого; воспроизведение градаций яркости; соответствие уровней яркостного и цветоразностных сигналов; установка нулей характеристик частотных детекторов; верность воспроизведения цветов; контроль коррекции предискажений по высокой частоте; совпадение во времени яркостного и цветоразностных сигналов.

Искажения и дефекты телевизионного изображения после компрессии-декомпрессии

В цифровом телевидении отсутствует ряд неприятных для восприятия дефектов на изображении, свойственных аналоговому телевидению. В то же время специфика обработки видеоданных в кодерах цифрового сжатия приводит к появлению других дефектов (артефактов), отсутствующих в исходном изображении. Например, для стандарта кодирования с информационным сжатием MPEG-2 представляют трудность сюжеты с мелкими статическими деталями и сложным движением в других частях изображения, с участками шума, с вращением и изменением масштаба, наплывами, полупрозрачными объектами. Для оценки влияния на качество телевизионного изображения процессов компрессии-декомпрессии рассмотрим более подробно некоторые, чаще всего возникающие, артефакты.

- **Заметность шумов квантования.** Эти шумы, присутствующие и в системах полноскоростного цифрового телевидения, становятся особенно заметными в системах со сжатием.
- **Потеря разрешающей способности** – обусловлена устранением избыточности, в первую очередь, в высокочастотной части спек-

тра пространственных частот. Мелкие детали либо размываются, либо полностью пропадают в изображении.

- **Блочность** – структура типа шахматной доски. Если кодирующему устройству не хватает битов, становится видимой структура блоков ДКП. Блочность особенно заметна, если глаз телезрителя следит за движущимися объектами.
- **Эффект мозаики** – выглядит подобно блочности, но воспринимается как различие яркости в поле соседних блоков, а не на границе. Возникает при слишком грубом квантовании коэффициентов ДКП, когда постоянные составляющие пространственных частот в соседних блоках заметно отличаются.
- **Шумы типа «москито»** – характерны для всех систем с ДКП и квантованием и проявляются на резких границах (например, надписях). При преобразовании из временной в частотную область влияние перепада отсчетов на границе распространяется на весь макроблок, при этом высокочастотные коэффициенты квантуются более грубо, чем низкочастотные. При обратном преобразовании в отсчеты и далее: в аналоговый сигнал, вдоль первоначальной границы, образуется характерный узор.
- **Окантовка на границах** – проявляется как возникновение окантовок на резких перепадах яркости изображения. При нехватке битов, в первую очередь, обрезаются высокочастотные коэффициенты, и это может повлиять на форму сигнала яркости вблизи ступеньки – вызвать колебательный процесс на вершине импульса.
- **Размытие цветов** – имеет такую же причину, что и эффект окантовки на границах, но проявляется на участках изображения с резкими скачками в сигнале цветности.
- **Артефакты, связанные с движением, такие, как подергивание или неправильное расположение блока пикселей**, могут появляться в системе, использующей усложненный алгоритм компенсации движения или просто пропускающей кадры из-за нехватки битов.
- **Ложные границы** – если при компенсации движения в опорном кадре заметна блочная структура, то она может переноситься в

новый кадр со смещением относительно границ блока (из-за не-точности компенсации), появятся ложные границы.

- **Эффект «грязного окна»** – проявляется как полосы или шумы, которые остаются неподвижными, в то время как объект движется за ними (как будто рассматриваешь сцену через грязное окно). Обычно является следствием недостатка битов для кодирования межкадровых разностей.
- **Неправильный цвет макроблока**, отличающийся от исходного и от соседних макроблоков. Причиной может быть тот факт, что сопряжение блоков ведется только по сигналу яркости. Опорный блок при высокой корреляции по сигналу яркости может иметь совсем другой цвет, и это отражается на цвете предсказанного блока.
- **Волнообразные шумы** – видны при медленном панорамировании по очень детализированной сцене, например, по изображению группы болельщиков на спортивном мероприятии. Как и mosquito, это результат грубого квантования высокочастотных коэффициентов, но движение вызывает рассеяние, и они появляются периодически как детали, движущиеся по блоку ДКП.

Оценка качества изображения методом субъективных экспертиз

Конечной целью телевизионного вещания является удовлетворение запросов телезрителей, поэтому приоритет в оценке качества отдается субъективной оценке. В цифровом телевидении с компрессией роль субъективных методов возрастает. Естественно, что для адекватной оценки качества телевизионного изображения недостаточно мнения одного человека о просмотренном видеоматериале. Разные люди имеют различное представление о качестве: оно зависит также от сюжета. Причем, для телевизионного изображения с цифровой компрессией, в отличие от обычного аналогового, недостаточно понаблюдать короткий отрезок сюжета и сделать вывод о всей программе, необходимо просмотреть сюжет полностью.

Субъективные экспертизы качества телевизионного изображения уже много лет проводятся по методикам Рекомендации МСЭ-Р ВТ.500

[18]. В ходе испытаний эталонные изображения оцениваются в баллах группой экспертов, принимающих решение о степени пригодности для данного применения. Методики нормируют виды тестовых изображений, условия тестирования, шкалу оценок и т.п. В группе должно быть не менее 15 экспертов, сеанс показа должен продолжаться не более 30 мин. Если тестирование проводится для оценки качества системы при оптимальных условиях функционирования, используется 5-балльная шкала оценки качества. Для оценки ухудшений при неоптимальных условиях работы применяется шкала ухудшений [8.2.]. Структуры обеих шкал приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Структура шкалы ухудшений.

Баллы	Оценка	
	качества	ухудшения
5	Отлично	Незаметно
4	Хорошо	Заметно, но не мешает
3	Удовлетворительно	Слегка мешает
2	Плохо	Мешает
1	Очень плохо	Сильно мешает

По результатам испытаний проводится статистическая обработка полученных измерений. Объемы экспертизы, в зависимости от поставленной задачи, могут варьироваться от единичных испытаний, проводимых группой из нескольких человек, до широкомасштабных полевых испытаний, проводимых многими сотнями экспертов в течение многих месяцев.

Оценка качества изображения после декомпрессии методом объективных измерений

Для аппаратурной оценки качества изображения на выходе цифрового телевизионного канала с компрессией необходимо оценить качество обработки сигнала на передающей и приемной сторонах (операции фильтрации, аналого-цифрового преобразования, устранения избыточности на передающей стороне и обратные операции на приеме). Канал передачи также

может вносить искажения, типа импульсной помехи, но чаще цифровой сигнал или передается, или не передается. Поэтому единственным критерием качества его работы можно считать достоверность передачи.

Поиски объективных методов оценки качества сосредоточились на двух направлениях:

- поиск цифровых испытательных сигналов, по результатам прохождения которых через цифровой телевизионный тракт можно было бы достоверно судить о влиянии качественных показателей тракта на любое реальное изображение;
- разработка методов непосредственной оценки качества изображения с учетом природы зрительного восприятия человека.

Первое направление развивает группа британских компаний во главе с фирмой Snell&Wilcox в проекте TCM (Test Card «М» – испытательная таблица «М»). Разработанная таблица содержит набор специально созданных цифровых потоков изменяющейся сложности со строго определенными параметрами. Каждый поток включает один или несколько подпотоков сжатого видео, звука, дополнительных данных. С их помощью можно протестировать устройства обработки компрессированных сигналов. Основное отличие предлагаемых испытательных сигналов от традиционных, статических – это воспроизведение подвижных изображений, которые содержат плавно движущиеся элементы, не прерывающиеся на границах цикла, что позволяет выявить такие дефекты декодирования, как рассыпание кадра, «замораживание», повтор кадров и т.д. Физическим носителем записи испытательных потоков тест-таблицы «М» является диск CD-ROM.

Второе направление в объективной оценке качества представляет анализатор качества изображения PQA-200 фирмы Tektronix (США). Специалисты данной фирмы считают, что для исключения влияния содержания программы на результат измерений следует не оценивать качество изображения непосредственно, а показать, как ухудшилось изображение воспроизводимой сцены по сравнению с эталоном. В результате проведенных исследований разработано два метода объективного измерения качества телевизионного изображения:

- сравнение фильтрованных эталонного и воспроизводимого изображений;
- извлечение особенностей из обоих изображений и их сравнение.

Первый метод – наиболее точный, он использует матричный алгоритм для обработки каждого телевизионного изображения или последовательности в фильтрованное изображение, похожее на исходное, но с меньшим объемом информации. Фильтрованное изображение эталона и испытуемого кадра или сюжета сравниваются по пикселям, и по специальному алгоритму вычисляется оценка.

Второй метод использует математический расчет для извлечения особенностей одиночного изображения (пространственные характеристики) или последовательности изображений (временные характеристики). Объем получаемой информации не превышает нескольких сотен байтов на изображение. Эту информацию нетрудно передать вместе с сжатым сигналом к удаленному месту испытаний, где она будет использована для сравнения с аналогичными особенностями изображения на выходе канала.

Исследования показали, что первый метод дает лучшую корреляцию с результатами субъективных испытаний.

Разработанный по первому алгоритму анализатор качества изображения RQA-200 работает в режиме сравнения изображений и предлагается как реальная замена субъективных методов оценки с помощью экспертов. Прибор содержит генератор эталонного тестового материала и анализатор. В процессе измерений двухсекундный отрезок тестовой видеопоследовательности пропускается через испытуемый кодер сжатия, записывается в память и анализируется с помощью быстродействующего процессора путем сравнения с оригиналом. Результат выдается в виде числа, называемого «оценкой качества изображения» (PQR – Picture Quality Rating). В качестве критерия оценки используется восприятие изображения человеком, основанное на модели человеческого зрения.

Оценки, данные прибором RQA-200, весьма близки к оценкам, полученным для тех же сюжетов в результате субъективных тестовых испытаний. Коэффициент корреляции достигает 0.9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемое вниманию читателя пособие составлено с целью сформировать понимание основных моментов современной теории цифрового радио и телевидения. В момент, когда в настоящее время во всем мире наблюдается тенденция перехода от аналогового к цифровым методам вещания, данное издание наиболее актуально.

Описанные выше стандарты передачи компрессированных сигналов используются в специализированных вещательных каналах систем телевидения. При подготовке данного учебного пособия не ставилась задача описания методов совместной передачи компрессированных сигналов по магистральным линиям связи и построения коллективных систем доступа к многопрограммному телевидению. В соответствии с этим в работе не приведена классификация сетей с общими принципами и стандартами их построения, а также с сетевыми технологиями, используемыми для передачи сигналов в магистральных линиях связи. Не рассмотрены вопросы построения комбинированных сетей коллективного приема сигналов телевидения, телефонии и Интернета, методы предоставления наиболее распространенных сервисов в данных сетях.

Однако, несмотря на это, автор надеется, что настоящее пособие, вместе с дальнейшим изучением цитируемой литературы, позволит успешно сформировать понимание основных моментов современной теории цифрового радио- и телевидения.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО РАЗДЕЛАМ

Раздел 2. Методы формирования радиосигналов и сигналов изображения.

- 2.1. *Быков Р.Е.* Основы телевидения и видеотехники. М.: Горячая линия-Телеком, 2006, гл. 2–4.
- 2.2. *Брайс Р.* Справочник по цифровому телевидению. М.: Эра, 2001, гл. 1.

Раздел 3. Цифровая обработка сигналов.

- 3.1. *Локишин Б.А.* Цифровое вещание: от студии к телезрителю. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001, гл. 1, 2.
- 3.2. *Смирнов А.В., Пескин А.Е.* Цифровое телевидение: от теории к практике. М.: Горячая линия-Телеком, 2005, гл. 2, 3.
- 3.3. *Быков Р.Е.* Основы телевидения и видеотехники. М.: Горячая линия-Телеком, 2006, гл. 5.
- 3.4. *Брайс Р.* Справочник по цифровому телевидению. М.: Эра, 2001, гл. 3.

Раздел 4. Цифровые методы сжатия телевизионных сигналов.

- 4.1. *Локишин Б.А.* Цифровое вещание: от студии к телезрителю. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001, гл. 2.
- 4.2. *Смирнов А.В., Пескин А.Е.* Цифровое телевидение: от теории к практике. М.: Горячая линия-Телеком, 2005, гл. 3.
- 4.3. *Быков Р.Е.* Основы телевидения и видеотехники. М.: Горячая линия-Телеком, 2006, гл. 5.

Раздел 5. Стандарты сжатия телевизионных сигналов.

- 5.1. *Локишин Б.А.* Цифровое вещание: от студии к телезрителю. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001, гл. 3–5.
- 5.2. *Смирнов А.В., Пескин А.Е.* Цифровое телевидение: от теории к практике. М.: Горячая линия-Телеком, 2005, гл. 4.

Раздел 6. Микширование, комбинирование и методы хранения телеинформации.

- 6.1. *Быков Р.Е.* Основы телевидения и видеотехники. М.: Горячая линия-Телеком, 2006, гл. 1, 8.
- 6.2. *Брайс Р.* Справочник по цифровому телевидению. М.: Эра, 2001, гл. 5.

Раздел 7. Формирование телесигналов для подачи в канал связи.

7.1. Системы аналогового цветного телевидения.

7.1.1. *Быков Р.Е.* Основы телевидения и видеотехники. М.: Горячая линия-Телеком, 2006, гл. 6.

7.1.2. *Варбанский А.М.* Передающие телевизионные станции. М.: Связь, 1980.

7.2. Стандарт DVB.

7.2.1. *Смирнов А.В., Пескин А.Е.* Цифровое телевидение: от теории к практике. М.: Горячая линия-Телеком, 2005, гл. 6.

7.3. Канальное кодирование.

7.3.1. *Локишин Б.А.* Цифровое вещание: от студии к телезрителю. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001, гл. 1.

7.3.2. *Смирнов А.В., Пескин А.Е.* Цифровое телевидение: от теории к практике. М.: Горячая линия-Телеком, 2005, гл. 5.

7.4. Методы модуляции.

7.4.1. *Смирнов А.В., Пескин А.Е.* Цифровое телевидение: от теории к практике. М.: Горячая линия-Телеком, 2005, гл. 5.

7.4.2. *Локишин Б.А.* Цифровое вещание: от студии к телезрителю. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001, гл. 1.

7.5. Стандарты спутникового телевидения DVB-S/S2.

7.5.1. *Локишин Б.А.* Цифровое вещание: от студии к телезрителю. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001, гл. 6.

7.6. Стандарты цифрового радиовещания DAB и DRM.

7.6.1. *Рихтер С.Г.* Цифровое радиовещание. М.: Горячая линия-Телеком, 2008.

7.7. Стандарты кабельного телевидения DVB-C/C2.

7.7.1. *Смирнов А.В., Пескин А.Е.* Цифровое телевидение: от теории к практике. М.: Горячая линия-Телеком, 2005, гл. 5.

7.7.2. *Локишин Б.А.* Цифровое вещание: от студии к телезрителю. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001, гл. 6.

7.8. Стандарт эфирного вещания DVB-T/T2.

7.8.1. *Смирнов А.В., Пескин А.Е.* Цифровое телевидение: от теории к практике. М.: Горячая линия-Телеком, 2005, гл. 5.

7.8.2. *Локишин Б.А.* Цифровое вещание: от студии к телезрителю. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001, гл. 6.

7.9. Системы условного доступа.

7.9.1. *Локишин Б.А.* Цифровое вещание: от студии к телезрителю. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001, гл. 8.

- 7.9.2. *Смирнов А.В., Пескин А.Е.* Цифровое телевидение: от теории к практике. М.: Горячая линия-Телеком, 2005.

Раздел 8. Приемные устройства.

- 8.1. *Смирнов А.В., Пескин А.Е.* Цифровое телевидение: от теории к практике. М.: Горячая линия-Телеком, 2005, гл. 7.
- 8.2. *Мамчев Г.В.* Основы радиосвязи и телевидения. М.: Горячая линия-Телеком, 2007, гл. 7.
- 8.3. *Быков Р.Е.* Основы телевидения и видеотехники. М.: Горячая линия-Телеком, 2006, гл. 7, 9.
- 8.4. *Локишин Б.А.* Цифровое вещание: от студии к телезрителю. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001, гл. 10.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Быков Р.Е.* Основы телевидения и видеотехники. М.: Горячая линия-Телеком, 2006.
2. *Брайс Р.* Справочник по цифровому телевидению. М.: Эра, 2001.
3. *Локишин Б.А.* Цифровое вещание: от студии к телезрителю. М. Компания «САЙРУС СИСТЕМС», 2001.
4. *Смирнов А.В., Пескин А.Е.* Цифровое телевидение: от теории к практике. М.: Горячая линия-Телеком, 2005.
5. *Мамчев Г.В.* Основы радиосвязи и телевидения. М.: Горячая линия-Телеком, 2007.
6. *Карякин В.Л.* Цифровое телевидение. М.: Солон-пресс, 2013.
7. *Тюхтин М.Ф.* Системы интернет-телевидения. М.: Горячая линия-Телеком, 2008.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Джакония В.Е., Гоголь А.А., Друзин Я.В. и др.*; Телевидение. М.: Радио и связь, 2004.
2. *Кривошеев М.И.* Основы телевизионных измерений. М.: Радио и связь, 1989.
3. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
4. *Зубарев Ю.В., Кривошеев М.И., Красносельский И.Н.* Цифровое телевизионное вещание. Основы, методы, системы. М.: НИИР, 2001.
5. *ЛаБарж Р.* DVD: авторинг и производство. М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2004.
6. *Грузман И.С., Киричук В.С. и др.* Цифровая обработка изображений в информационных системах. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002.
7. *Варбанский А.М.* Передающие телевизионные станции. М.: Связь, 1980.
8. Цифровое эфирное телевидение 2008. Под ред. Н. Орлова. С-Пб.: Взлет, 2009.
9. *Новаковский С.В.* Стандартные системы цветного телевидения. М.: Связь, 1976.
10. *Рихтер С.Г.* Цифровое радиовещание. М.: Горячая линия-Телеком, 2008.
11. *Сапожков М.А.* Электроакустика. М.: Связь, 1978.
12. *Гельгор А.Л., Попов Е.А.* Система цифрового телевизионного вещания стандарта DVB-T. С-Пб: Политехнический институт, 2010.

Самвел Рафикович Папян

ОСНОВЫ РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Главный редактор – М.Э. Авакян

Редактор – Э.А. Рухкян

Корректор – М.Р. Тадевосян

Компьютерная верстка – А.Г. Антонян

Адрес Редакции научных изданий
Российско-Армянского университета:

0051, г. Ереван, ул. Овсена Эмина, 123
тел/факс: (+374 10) 27-70-52 (внутр. 42-02)
e-mail: redaction.rau@gmail.ru
www.rau.am

Заказ № 24

Подписано к печати 22.04.2017г.

Формат 60х84¹/₁₆. Бумага офсетная № 1.

Объем 20,5 усл. п.л. Тираж 200 экз.