



Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Севастопольский национальный технический университет

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по дисциплине
«Системы и сети телевидения»
(Цифровое телевидение, часть 2)

для студентов специальности 7.050901 — «Радиотехника»
дневной и заочной форм обучения

Севастополь

2012

УДК 621.397

Конспект лекций по дисциплине «Системы и сети телевидения. Цифровое телевидение, ч. 2» для студентов специальности 7.050901 «Радиотехника» дневной и заочной форм обучения / Ю.П. Михайлюк. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. — 100 с.

Целью данной методической разработки является оказание помощи студентам очной и заочной форм обучения в изучении дисциплины «Системы и сети телевидения».

Рассмотрено и утверждено на заседании научно-методического семинара кафедры радиотехники и телекоммуникаций (протокол № 12 от 2 июля 2011 г.)

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент:

доцент кафедры РТ, канд. техн. наук, доцент Слёзкин В.Г.

Ответственный за выпуск:

заведующий кафедрой РТ, д-р техн. наук, проф. Гимпилевич Ю.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Стандарт представления медиа-объектов <i>MPEG-4</i>	5
1.1. Предпосылки создания стандарта	5
1.2. Описание сцены	7
1.3. Доставка потоков данных	9
1.4. Кодирование визуальных объектов	12
1.5. Кодирование звуковых объектов	21
1.6. Профили и уровни стандарта <i>MPEG-4</i>	24
2. Передача телевизионного сигнала в цифровой форме	35
2.1 Канальное кодирование	35
3. Цифровые способы модуляции	38
3.1. Предварительные замечания	38
3.2. Сигнальные созвездия	40
3.3. Амплитудная модуляция	46
3.4. Квадратурная амплитудная модуляция	49
3.5. Относительная фазовая модуляция	54
3.6. Иерархические режимы модуляции	57
3.7. Способ модуляции <i>OFDM</i>	59
4. Принципы построения и структура цифровых систем наземного ТВ вещания	69
4.1 Стандарт цифрового телевизионного вещания <i>DVB</i>	69
4.2. Общая характеристика систем цифрового наземного ТВ вещания	70
4.3. Система цифрового наземного ТВ вещания <i>DVB-T</i>	73
4.4. Система цифрового наземного ТВ вещания <i>ISDB-T</i>	85
4.5. Система цифрового наземного ТВ вещания <i>8-VSB ATSC</i>	92
Библиографический список	100

ВВЕДЕНИЕ

Телевизионное вещание является одним из самых распространенных средств информационного обслуживания и находит широкое в различных сферах деятельности общества. Известно, что сегодня происходит слияние средств вещания, телекоммуникаций и компьютерных технологий. Радикальным способом на пути достижения этих целей является переход вещания от аналоговых к цифровым методам формирования и передачи сигналов.

Применение цифровых методов позволяет упростить многие недостатки аналоговых систем вещания, в том числе искажения сигналов при их формировании, обработке и передаче, накапливающиеся с увеличением числа преобразований, переприёмов и перезаписей. Разработанные эффективные методы сжатия данных и цифровой модуляции обеспечили возможность многопрограммного телевизионного вещания, включая и телевидение высокой чёткости (ТВЧ). Одновременно открывается возможность предоставления интерактивных, мультимедийных и других услуг, в том числе Интернета.

Данное учебное пособие предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения и всех интересующихся перспективными системами ТВ вещания.

Материалы учебного пособия сгруппированы в четырех разделах, в которых рассматриваются:

- стандарт сжатия *MPEG-4*;
- передача телевизионного сигнала в цифровой форме;
- цифровые способы модуляции;
- принципы построения и структура систем наземного телевизионного вещания.

1. СТАНДАРТ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МЕДИА-ОБЪЕКТОВ *MPEG-4*

1.1. Предпосылки создания стандарта

Стандарт *MPEG-4* базируется на трех основах:

- цифровое телевидение;
- интерактивные графические приложения;
- интерактивные мультимедийные приложения.

Тенденция последних лет — сближение, слияние этих источников аудиовизуальной информации, появление новых источников как натурального, так и синтезированного *контента* (содержания). До недавнего времени в вещании преобладала концепция «телевидения»: программа готовилась в студии и передавалась как периодическая последовательность строк изображения и сопутствующих звуков. Все усовершенствования, включая появление цифрового вещания и стандарта *MPEG-2*, не изменили эту концепцию в корне, хотя добавили к ней некоторые новые аспекты — многопрограммность, подписку, дополнительные услуги, зачатки интерактивности. Однако похоже на то, что сейчас традиционная концепция телевидения не удовлетворяет уже пользователей аудиовизуальных услуг. Зрители хотят иметь доступ к видео- и аудиопрограммам, как они уже имеют доступ к мультимедийному контенту через Интернет и World Wide Web.

В последние годы мультимедийные и графические средства все чаще вторгаются в область классического ТВ вещания, которое, в свою очередь, проникает в сферу мультимедиа (значительная часть ТВ и звуковых программ транслируется в Интернете). Аудиовизуальное содержание все чаще используется в интерактивных приложениях, таких, например, как игры или дистанционное обучение. Заметно размывается граница между компьютерными изображениями, виртуальной реальностью и телевидением. Все чаще возникает необходимость перемещать один и тот же контент из одной сети в другую, из одной сферы в другую, и требуются унифицированные форматы представления и передачи информации.

Все эти факторы сформировали потребность в едином стандарте, который бы определял формат представления аудиовизуальной информации, совместимый с любой средой распространения, и механизмы интерактивного взаимодействия с мультимедийным контентом. В стандарте должны быть предусмотрены возможности передачи различных видов видео- и аудиоданных — текста, графики, двумерных (2D) и трехмерных (3D) изображений, натурального и синтезированного видео и аудио, в потоковой форме или в виде загружаемых файлов. Необходимо обеспечить высокое качество при очень низких скоростях передачи, гибкий доступ к контенту (с любого места, в ускоренном и замедленном режимах), средства интерактивного взаимодействия с объектами, вплоть до возможности абонента влиять на развитие сюжета, совместимость с любой транспортной средой.

Основное отличие *MPEG-4* от ранее принятых стандартов — объектно-ориентированное представление медиа-информации. В стандарте вводится ключевое понятие *медиа-объекта* — единицы звукового, визуального или аудиовизуального контента. Любая сцена разделяется на объекты, которые соотносятся в пространстве и времени и описываются отдельными элементарными потоками (*ES*). Объекты могут быть натуральными — записанными с видеокамеры или микрофона, и синтетическими — синтезированными в компьютере. Такой подход имеет ряд преимуществ: более экономно расходуются биты для описания сцены, отдельные объекты легко использовать в других сценах, упрощается построение масштабируемых объектов и взаимодействие с объектами, появляются широкие возможности взаимодействия пользователя с выбранным объектом, например, вывод дополнительной информации об объекте, изменение его параметров (цвета, текстуры, громкости звучания или языка), исключение объекта из сцены, создание пользователем новых сцен из объектов, полученных от разных источников или хранящихся в памяти терминала. Все

эти операции требуют лишь изменить описание сцены, а это вполне под силу процессору абонентского терминала.

1.2. Описание сцены

Для описания сцены и ее динамического изменения в *MPEG-4* используется специально разработанный двоичный язык *BIFS (Binary Format for Scenes* — двоичный формат описания сцен). Описание сцены указывает декодеру, где и когда воспроизводить объекты, входящие в сцену, и как реагировать на воздействие пользователя. Чтобы увязать *ES* с медиа-объектами в сцене, используются дескрипторы объекта. Они переносят информацию о числе и свойствах *ES*, связанных с конкретными медиа-объектами. Сами дескрипторы также переносятся в одном или нескольких *ES*, поэтому нетрудно добавить или удалить объект во время сеанса. Потоки дескрипторов могут рассматриваться как описания потоковых ресурсов для представления, а описание сцены служит для изменения пространственно-временного размещения объектов в сцене. *MPEG-4* определил специальный язык *синтаксических описаний* для точного описания синтаксиса потоков, переносящих информацию о медиа-объектах и описания сцен. Он представляет собой расширение языка *C++* и позволяет дать точное описание синтаксиса и в то же время упростить проверку на соответствие.

BIFS оперирует двумя протоколами модификации сцены во времени — командным (*BIFS-Command*) и анимационным (*BIFS-Anim*). Командные потоки *BIFS* позволяют загружать новую сцену, изменять свойства объектов, вводить и уничтожать объекты. Потоки *BIFS-Anim* управляют процессами анимации сцены, например, изменением точки взгляда, перемещением, трансформацией размера, плавным изменением цвета, освещенности и т.д. Синхронизация потоков осуществляется путем временной привязки. Как и в предыдущих стандартах *MPEG*, один вид временной метки обеспечивает синхронизацию тактовых частот кодера и декодера, метки другого вида, привязанные к функциональным единицам аудиовизуальных данных,

содержат желаемое время декодирования (для единиц доступа) или время завершения компоновки (для компоновочных единиц).

Основные принципы *BIFS* заимствованы из языка *VRML* (*Virtual Reality Modelling Language* — язык моделирования виртуальной реальности), разработанного для создания 3D графики. Это широко распространенный и в значительной степени бесплатный язык программирования, точнее, эффективный 3D формат обмена, как бы объемный аналог *HTML*. Некоторые виды информации лучше воспринимаются в объемном виде — игры, результаты научных исследований, архитектурные решения. *VRML* обеспечивает интеграцию трехмерных, двумерных, текстовых и мультимедийных объектов в связную модель. Он оперирует объектами, каждый из которых имеет различные *атрибуты*. Объект называется узлом, а атрибуты — полями. Число полей зависит от типа узла. Полный перечень узлов и полей известен как *граф* (разветвленная древообразная структура). *VRML* включает большинство используемых в 3D приложениях средств: иерархические трансформации, источники света, выбор точки взгляда, анимацию, свойства материала, отображение текстуры и т.д.

Язык *BIFS* позаимствовал у *VRML* структуру описания сцены в виде графа, модели поведения, графические примитивы для построения 3D-изображений: конусы, сферы, сетки, текстовые примитивы, текстурирование и подсветку (всего их 36). В то же время *BIFS* имеет существенные отличия от *VRML*, в него внесены новые решения:

1) *VRML* — язык высокого уровня, *BIFS* — двоичный, благодаря этому объем сообщений в нем в 10...15 раз меньше, чем в *VRML*; хотя объем описаний сцены обычно меньше, чем аудиовизуальной информации, эти описания передаются непрерывно и могут в результате составить заметную часть передаваемых данных, поэтому сжатие потоков *BIFS* достаточно актуально;

2) *VRML* работает с файлами, предварительно загружаемыми в процессор, а *BIFS* предназначен в первую очередь для потоковой передачи в реальном времени;

3) *BIFS* позволяет работать как с *2D*, так и с *3D* объектами, осуществлять масштабирование, перемещение, вращение, более того, впервые решена задача представления в одной сцене и *2D*, и *3D* объектов.

1.3. Доставка потоков данных

Полученные в результате кодирования элементарные потоки необходимо доставить к декодеру. Для этого *MPEG-4* предлагает двухуровневый механизм мультиплексирования, схема которого показана на рисунке 1.1. Элементарные потоки поступают на мультиплексирование, пройдя уровень синхронизации *SL* (*Sync Layer*), где в заголовки пакетированных элементарных потоков (*PES*) вводятся временные метки.

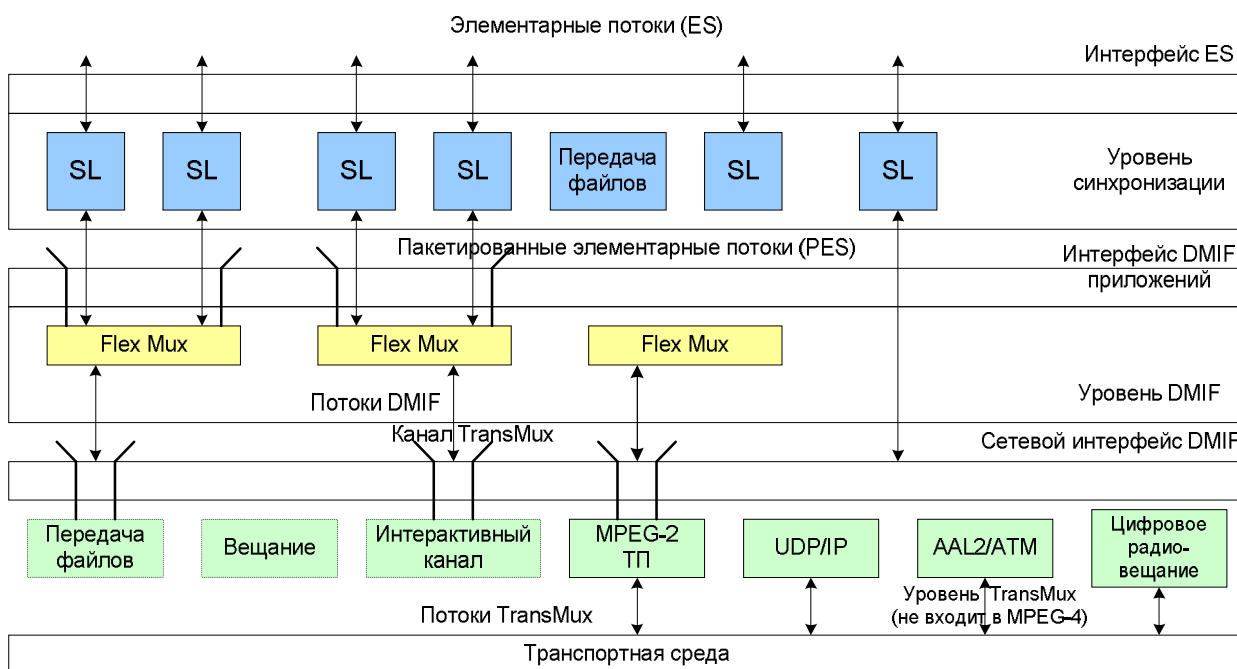


Рисунок 1.1 — Схема двухуровневого механизма мультиплексирования цифрового потока в стандарте *MPEG-4*

Первый уровень, названный *FlexMux*, играет вспомогательную роль в мультиплексировании, он объединяет низкоскоростные потоки с одинаковыми требованиями к качеству передачи, чтобы уменьшить их число

в сложных сценах и сократить время передачи. Использование *FlexMux* не является обязательным, и он может быть пустым, если следующий уровень обеспечивает все необходимые функции. *FlexMux* не имеет собственных средств защиты от ошибок.

Второй уровень, *TransMux* (*Transport Multiplexing*), предлагает транспортные услуги по передаче потоков с заданным качеством обслуживания. Условия передачи предполагают необходимую пропускную способность, допустимый уровень ошибок, максимальное время задержки, приоритет и т.д. *TransMux* не является транспортным протоколом как таковым, он представляет собой скорее интерфейс между кодером *MPEG-4* и стандартным транспортным протоколом. В качестве такового могут использоваться протокольные стеки *RTP/UDP/IP*, *AAL5/ATM*, транспортный поток *MPEG-2*.

Взаимодействие с транспортной средой управляется протоколом *DMIF* (*Delivery Multimedia Integration Framework* — мультимедийная интегрированная система доставки). *DMIF*, как его определяет стандарт, — сеансовый протокол для управления потоковой передачей в произвольных средах. После запуска он устанавливает соединение с удаленным абонентом, выбирает подлежащие передаче потоки и посылает запрос на их передачу. Порт *DMIF* посылает отметки к тем точкам, откуда будут передаваться потоки, и устанавливает соединение. Функции *DMIF* по связи с транспортными протоколами реализуются через интерфейс *DAI* (*DMIF Application Interface*), который получает *PES* от уровня синхронизации и переводит запросы *DMIF* в команды, воспринимаемые конкретным протоколом. Команды для разных протоколов могут быть различными.

На приемном конце индивидуальные *ES* выделяются из пришедшего транспортного потока путем демультиплексирования (см. рисунок 1.2).

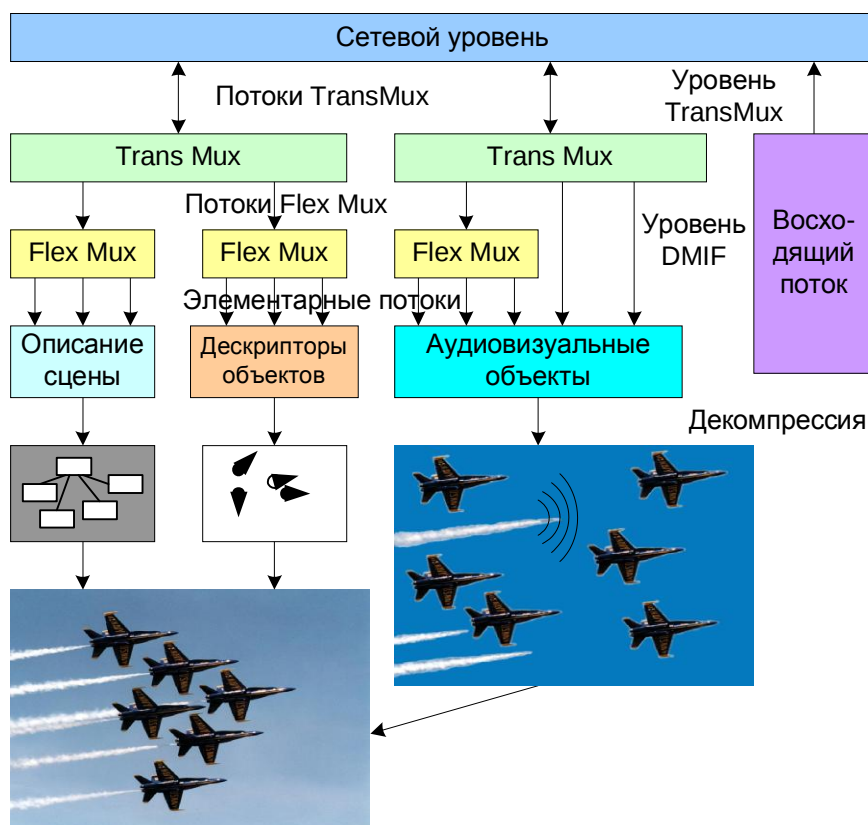


Рисунок 1.2 — Структура терминала *MPEG-4*

На этом этапе *DMIF* не отвечает за работу транспортного протокола, он подключается только при наличии потоков *FlexMux*. Выделенные после демультиплексирования пакеты *PES* обрабатываются с целью извлечения из них информации о синхронизации. Эта информация переносится в заголовках пакетов, генерируемых на уровне синхронизации.

Во второй версии стандарта введены два дополнительных механизма, облегчающие транспортировку и опознавание элементарных потоков. Первый предназначен для организации передачи файлов и имеет вид специального файлового формата представления контента с расширением *.mp4*. Он содержит большой объем описательной информации, позволяющей передавать файлы с помощью любых протоколов, редактировать их содержимое и воспроизводить его на разных терминалах. В основу положен формат *Quick Time*.

Второй механизм — интерфейс программных приложений *MPEG-4* с кодами известного языка программирования *Java* — призван облегчить

интеграцию *Java*-приложений в структуру *MPEG-4*. Он будет принимать *ES Java*-приложений, обрабатывать их и направлять к соответствующим компонентам *MPEG-4* плеера.

Усовершенствование протокола *DMIF* во второй версии стандарта касается введения возможности работы с мобильными средствами связи, обеспечения более широкого класса параметров качества обслуживания (*QoS*), поддержания сеансовой работы одновременно с несколькими сетевыми провайдерами, имеющими собственные порты, и т.д.

1.4. Кодирование визуальных объектов

Первоначально предполагалось ограничить пределы скорости цифрового потока *MPEG-4* видео значениями 4,8 кбит/с снизу и 64 кбит/с сверху. В ходе разработки выяснилось, что заложенные принципы кодирования значительно мощнее, чем только кодирование на сверхнизких скоростях. Предел сверху был расширен до 10 Мбит/с в первой версии и до 38 Мбит/с во второй версии. Тем не менее, визуальная часть стандарта не предназначена для вещательного телевидения, хотя и может обеспечить очень высокое качество изображения.

Основные требования, заложенные в разработку второй части стандарта, сводились к трем условиям: эффективное кодирование натуральных и синтетических изображений; высокая функциональность в интерактивном окружении; устойчивость в среде распространения с ошибками.

Средства представления натурального видео в *MPEG-4* обеспечивают стандартизованную технологию обработки, хранения и передачи текстуры, изображений и видео для мультимедийных применений. В отличие от *MPEG-2*, где вся сцена раскладывалась до пиксела и затем осуществлялось однородное кодирование всего изображения, в *MPEG-4* сцена разбивается на видеообъекты, для каждого объекта описываются его форма, текстура, местоположение, оптические характеристики (яркость, цвет, положение светотени), параметры движения — перемещение, вращение, изменение

масштаба, данные кодируются со сжатием, упаковываются в отдельные *ES* (по несколько потоков на каждый объект), мультиплексируются и передаются декодеру. Визуальная сцена может состоять из одного или нескольких объектов. Каждый объект характеризуется пространственной и временной информацией в виде формы, текстуры и движения. Для некоторых приложений введение понятия визуального объекта оказывается неоправданно сложным, для них *MPEG-4* допускает кодирование прямоугольными кадрами, которые представляют собой вырожденный случай объекта произвольной формы.

Пользователь может восстановить сцену в ее исходном виде, а может произвести определенные манипуляции — исключить часть объектов или ввести новые, изменить точку взгляда, масштаб, цвет и т.д. Разумеется, пользователь может внести только те изменения, которые предусмотрел автор.

Стандарт обработки визуальных объектов поддерживает широкий диапазон изменения входных параметров видеопоследовательности. Развертка может быть прогрессивной и чересстрочной, пространственное разрешение по яркости — от 8×8 до 2048×2048 пикселей (*SQCIF*, *QCIF*, *CIF*, *4CIF*, Рек. *BT.601*); в цветовом пространстве допускаются сигналы монохромный и Y , C_B , C_R ; пространственное разрешение по цветности «4:0:0», «4:2:0» и «4:2:2» (только в студийном профиле); частота кадров может изменяться от 0 до 30 Гц и более, причем может меняться от кадра к кадру; разрядность квантования — 8 бит с возможностью изменения от 4 до 12 бит. Нетрудно убедиться, что возможности выбора параметров значительно шире, чем даже в *MPEG-2*.

В зависимости от скорости цифрового потока могут использоваться алгоритмы, относящиеся к одной из трех групп:

- 1) Низкоскоростное видео (*VLBV* — *Very Low Bit-rate Video*) — скорость (5...64) кбит/с, разрешение не выше *CIF*, частота кадров до 15 Гц; основное назначение — кодирование обычных прямоугольных изображений

с высокой эффективностью для мультимедийных приложений реального времени, а также системы случайного доступа к мультимедийным базам данных с быстрым поиском «вперед» и «назад»;

2) Высокоскоростное видео — скорость 64 кбит/с...10 Мбит/с; те же применения, но с более высоким пространственным и временным разрешением, вплоть до Рек. ВТ.601, также мультимедийное вещание или обратный канал в интерактивных системах с качеством, сравнимым с цифровым вещанием; системы с чересстрочной разверткой;

3) Кодирование, основанное на контенте, — поддерживает отдельное кодирование и декодирование натуральных объектов в сценах с гибридным кодированием; эта группа допускает смешение некоторого числа видеообъектов с синтетическими объектами (виртуальные задники).

Визуальный цифровой поток *MPEG-4* можно изобразить иерархической последовательностью уровней, как показано на рисунке 1.3.

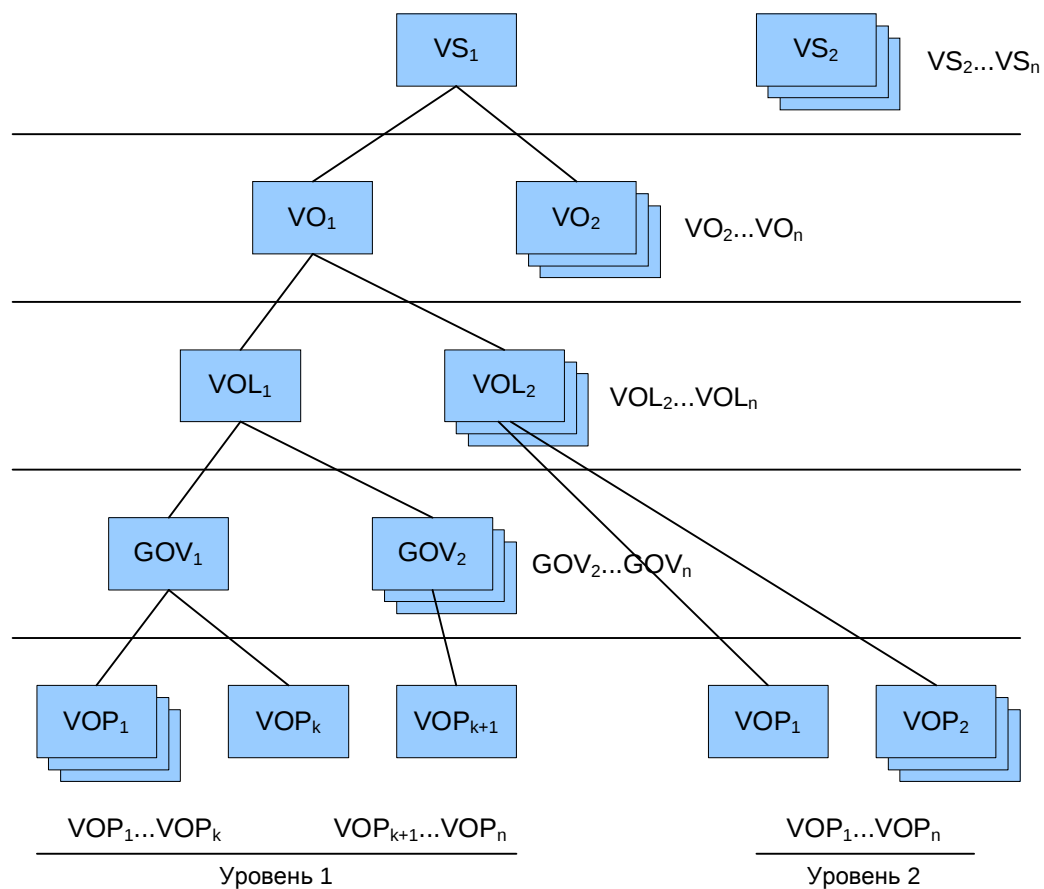


Рисунок 1.3 — Структура визуального цифрового потока

Последовательность визуальных объектов (*VS — Visual Object Sequence*) в этой иерархии соответствует видеопоследовательности в *MPEG-2* и отображает сцену с произвольным числом 2D и 3D натуральных и синтетических объектов и их улучшающих слоев. *Видеообъект (VO)* соответствует обычному двумерному объекту в сцене. В самом простом случае он может быть прямоугольным кадром, в общем случае — объектом произвольной формы. *Слой видеообъекта (VOL)* — соответствует каждому *ES*, описывающему видеообъект. *VOL* может быть полнофункциональным или с укороченным заголовком, в этом случае он совместим с потоком стандарта *H.263*. Каждый видеообъект дискретизируется во времени и такой временной срез (отсчет) видеообъекта называется *плоскостью видеообъекта (VOP)*. Несколько плоскостей могут объединяться в *группу плоскостей видеообъекта (GOV)*. Плоскости видеообъекта могут кодироваться независимо (*I*-кодирование), или совместно, с применением компенсации движения (*P*- и *B*-кодирование). Обобщенная схема кодера *MPEG-4* показана на рисунке 1.4.

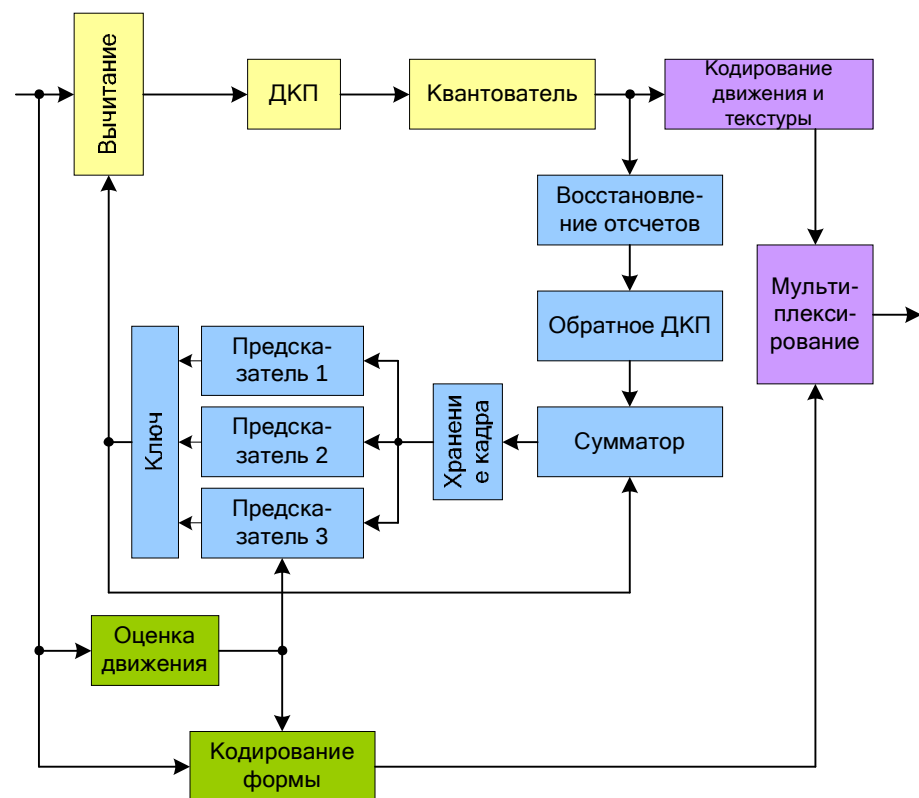


Рисунок 1.4 — Обобщенная структурная схема видеокодера *MPEG-4*

Схема предполагает кодирование формы и компенсацию движения, а также кодирование текстуры, базирующееся на ДКП (стандартное или адаптивное к форме объекта). Каждый видеообъект кодируется отдельно, затем цифровые потоки объединяются.

В стандарте *MPEG-4* применяются два метода кодирования информации о форме объекта — бинарное и градационное. При бинарном кодировании оперируют матрицей того же размера, что и плоскость видеообъекта, элементы которой могут принимать значения только 1 или 0 в зависимости от того, находятся ли они внутри объекта или вне его. Градационное кодирование более гибкое, оно описывает элементы матрицы 8-битовыми словами и позволяет кодировать «полупрозрачные» и «затуманенные» изображения.

Для цифрового сжатия плоскости видеообъектов, содержащие информацию о перемещении и текстуре, разбиваются на макроблоки размером 8×8 или 16×16 пикселей, содержащие блоки отсчетов яркости и цветности, к этим последним применяется ДКП с последующим квантованием и кодированием квантованных разностей. Процесс схож с обычным цифровым сжатием из предыдущих стандартов *MPEG*.

При кодировании текстуры поступают следующим образом. На плоскость видеообъекта накладывают решетку с ячейками 8×8 элементов. Те ячейки, которые полностью разместились внутри объекта, кодируются обычным ДКП, за исключением того, что после квантования производится дополнительное предсказание коэффициентов блока на основе соседних блоков. Блоки, которые оказались на границе видеообъекта, дополняются до размера 8×8 по определенным правилам и только после этого кодируются (так называемое *Shape-Adaptive DCT* — ДКП, адаптивное к форме).

Эффективный метод кодирования текстуры и неподвижных изображений поддерживается специальным режимом кодирования в *MPEG-4*, основанным на *волновом преобразовании с нулевым деревом*. Наряду с высокой эффективностью сжатия этот метод обеспечивает пространственную

масштабируемость (до 11 уровней) и непрерывную масштабируемость по качеству.

Масштабируемость в *MPEG-4* обеспечивается передачей для видеообъекта нескольких цифровых потоков — *VOL*, один из которых базовый, остальные — улучшающие. При пространственном масштабировании может быть достигнуто улучшенное пространственное разрешение, временное масштабирование сглаживает движение.

На рисунке 1.5 показано, как в этом случае кодер и декодер обрабатывают поступающие потоки.

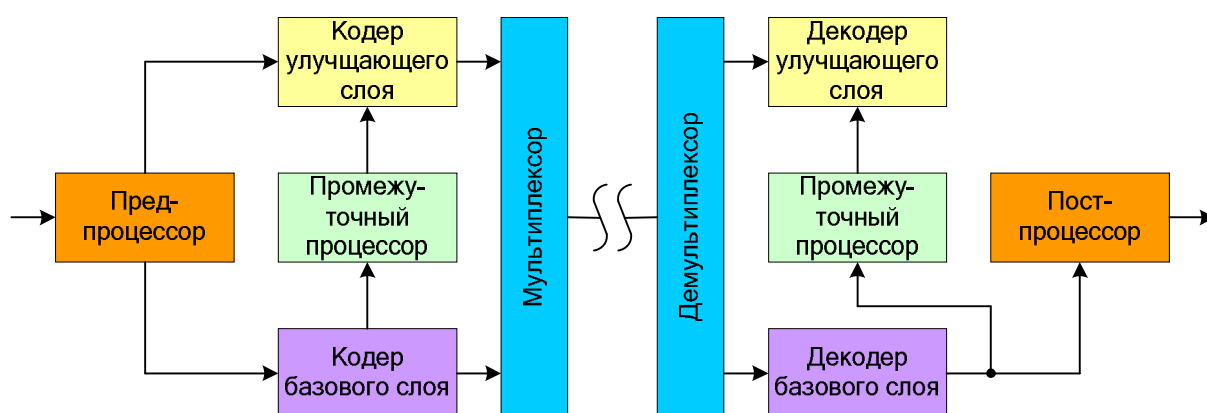


Рисунок 1.5 — Масштабируемое кодирование/декодирование в стандарте *MPEG-4*

Предпроцессор субдискретизирует поступающие *VOP* и разделяет их на базовый и улучшающий слои. Поток базового слоя передается обычным путем, а в канале улучшающего слоя передается только разность между сигналом, поступившим от процессора, и сигналом, восстановленным промежуточным процессором путем повышающей дискретизации. На приеме процессы происходят в обратном порядке.

Дальнейшему сокращению цифрового потока способствует глобальная компенсация движения, основанная на передаче статических *спрайтов*. Спрайтом называется часть видеообъекта, которая устойчиво присутствует в нем практически без изменений на протяжении довольно длительного времени. Это могут быть, например, панорамный задний план или группа

неподвижных предметов, закрывающая значительную часть кадра. Такое почти статическое изображение может быть передано полностью один раз, в начале трансляции, а затем корректироваться декодером по мере необходимости. Информация о форме и текстуре спрайта кодируется как *I-VOP*. Для каждого следующего изображения в последовательности кодируются только 8 параметров глобального движения, описывающих движения телекамеры. Чтобы снизить задержку, сначала передают часть информации спрайта с грубым квантованием, а затем добавляют более тонкие структурные особенности. Можно также передать часть изображения, необходимую для реконструкции первых *VOP*, а затем дослать по частям остальные участки спрайта. На практике применяется сочетание обоих методов.

На рисунке 1.6 схема декодера показана более детально. Здесь видно, как обрабатываются и затем объединяются данные о форме и текстуре изображения.

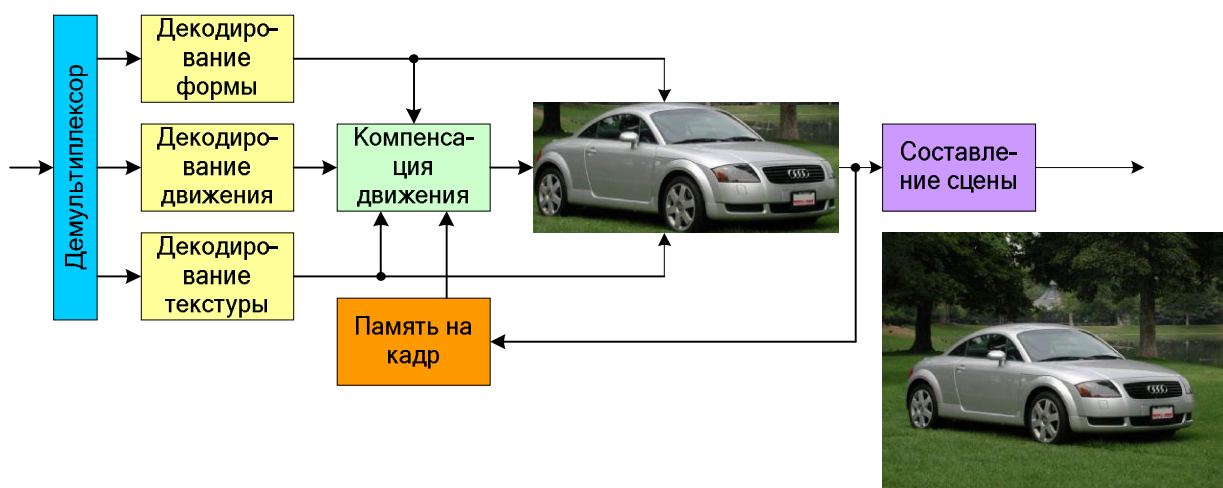


Рисунок 1.6 — Декодирование видеокadra *MPEG-4*

В цифровом потоке визуальной информации применяются дополнительные меры для повышения устойчивости к ошибкам.

Ресинхронизация: после определенного количества битов в поток вводятся маркеры, отмечающие точки, к которым декодер переходит при потере части битов в потоке.

Разделение данных: данные о перемещении и о текстуре разделяются на более мелкие порции для облегчения маскирования.

Код расширения заголовка: вводится дополнительная кодозащита в заголовок пакета, повышающая его устойчивость к ошибкам.

Реверсивное кодирование с переменной длиной: кодовые слова реверсивного кода могут декодироваться как с начала, так и с конца. Если декодер встречает поврежденные биты, он не отбрасывает всю оставшуюся часть слова, а декодирует его с противоположного конца до поврежденного участка, минимизируя потери.

Синтетические объекты представляют значительный раздел компьютерной графики. В стандарт *MPEG-4* включены следующие операции с объектами такого рода: параметрические описания синтезированного лица и фигуры; кодирование статических и динамических сеток с отображением текстуры; кодирование текстуры для проективных приложений.

Метод анимации предполагает однократную передачу базового статического образа и последующую досылку сообщений, описывающих динамические изменения объекта. В первой версии стандарта этот метод используется для передачи синтезированного человеческого лица. За основу берется обобщенный шаблон лица с нейтральным выражением — один из хранимых в базе или специально загружаемый на передающей стороне. Он дополняется индивидуальными чертами, текстурой, выражением с помощью управляющих параметров (*Facial Definition Parameters* — параметры, определяющие лицо), другая группа параметров (*Facial Animation Parameters* — параметры анимации лица) изменяет выражение лица, вводит мимику, артикуляцию. Параметры передаются в отдельных потоках, для сжатия используется кадровое кодирование с ДКП.

Двумерная сетка представляет собой часть плоскости, поделенную на полигональные (многоугольные) участки. Точки пересечения линий называются узлами. *MPEG-4* рассматривает только треугольные сетки. Сетка может быть заполнена текстурой, тогда ее называют контентно-наполненной (*content-based*). Для описания сетки в динамике достаточно передать геометрию сетки и описать движение всех ее узлов. При этом треугольные участки текущего кадра получаются путем деформации треугольных участков опорного кадра, текстура также деформируется путем параметрического отображения векторов перемещения узлов сетки.

Двумерное моделирование может быть использовано для эффективного сжатия, если передавать опорные ключевые кадры и посылать векторы перемещения и информацию о текстуре для восстановления промежуточных кадров.

Во второй версии стандарта добавлены новые технологии и алгоритмы, позволившие повысить эффективность кодирования, устойчивость к ошибкам, улучшить временное разрешение при малой задержке в буфере. В частности, введен режим глобальной компенсации движения, точность компенсации повысилась до $1/4$ пиксела, внедрены три новых инструмента кодирования текстуры и неподвижных изображений: волновое кодирование с разделением на небольшие самостоятельно кодируемые участки, масштабируемое кодирование формы, сегментация и пакетирование для повышения устойчивости к ошибкам.

Интересным новшеством второй версии является возможность кодирования кратных изображений (стереоскопических или полученных с близких точек) с устранением избыточности между ними. Этот режим основан на методе градиационного кодирования формы объекта и использует дополнительные возможности данного метода.

В области синтетических изображений основными нововведениями второй версии можно считать средства анимации человеческой фигуры (теми

же методами, что и лица в первой версии) и кодирование трехмерных полигональных сеток.

1.5. Кодирование звуковых объектов

Широкие возможности представляет стандарт *MPEG-4* для кодирования звука. Впервые используются отдельные алгоритмы для кодирования звуков музыкального происхождения и речи, введены мощные средства создания и обработки синтезированного звука.

Наиболее широкий круг звуковых объектов, от низкоскоростных моно до многоканального звука вещательного качества, относится к категории *универсального звука (GA — General Audio)*. В качестве основного алгоритма кодирования звуков различного происхождения принят известный из *MPEG-2* алгоритм *AAC* с незначительными усовершенствованиями. Одно из них касается введения режима *PNS (Perceptual Noise Substitution —* перцептуальное замещение шумом). Суть данного метода заключается в обнаружении в входящем сигнале шумоподобных составляющих и исключении их из общего процесса кодирования. Декодеру передается информация о мощности шумовых компонентов в отдельных участках спектра, и он подменяет соответствующие спектральные коэффициенты псевдослучайными сигналами с требуемой мощностью. Режим *PNS* иллюстрируется структурной схемой, показанной на рисунке 1.7.

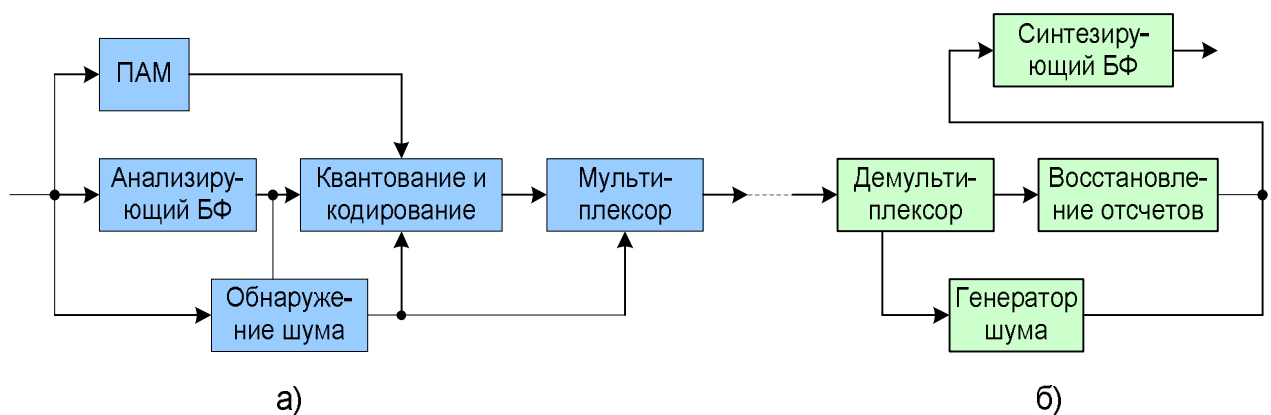


Рисунок 1.7 — Схема реализации режима *PNS*:

а) кодер; б) декодер

Еще одно усовершенствование связано с введением алгоритма *BSAC* (*Bit-Sliced Arithmetic Coding* — арифметическое кодирование с побитовым расщеплением). Чтобы получить масштабируемый поток, *BSAC* использует альтернативный по отношению к *AAC* модуль кодирования квантованных коэффициентов с точным управлением скоростью потока в пределах от 16 кбит/с до 64 кбит/с с шагом 1 кбит/с.

Существенный выигрыш в скорости потока для стационарных гармонических и квазигармонических сигналов позволяет получить метод *долговременного предсказания LTP (Long Term Prediction)*. В технике кодирования речи этот метод широко используется во временной области. В стандарте *MPEG-4* он интегрирован в схему универсального кодера (см. рисунок 1.8), где операции квантования и кодирования осуществляются над спектральными представлениями входного сигнала.

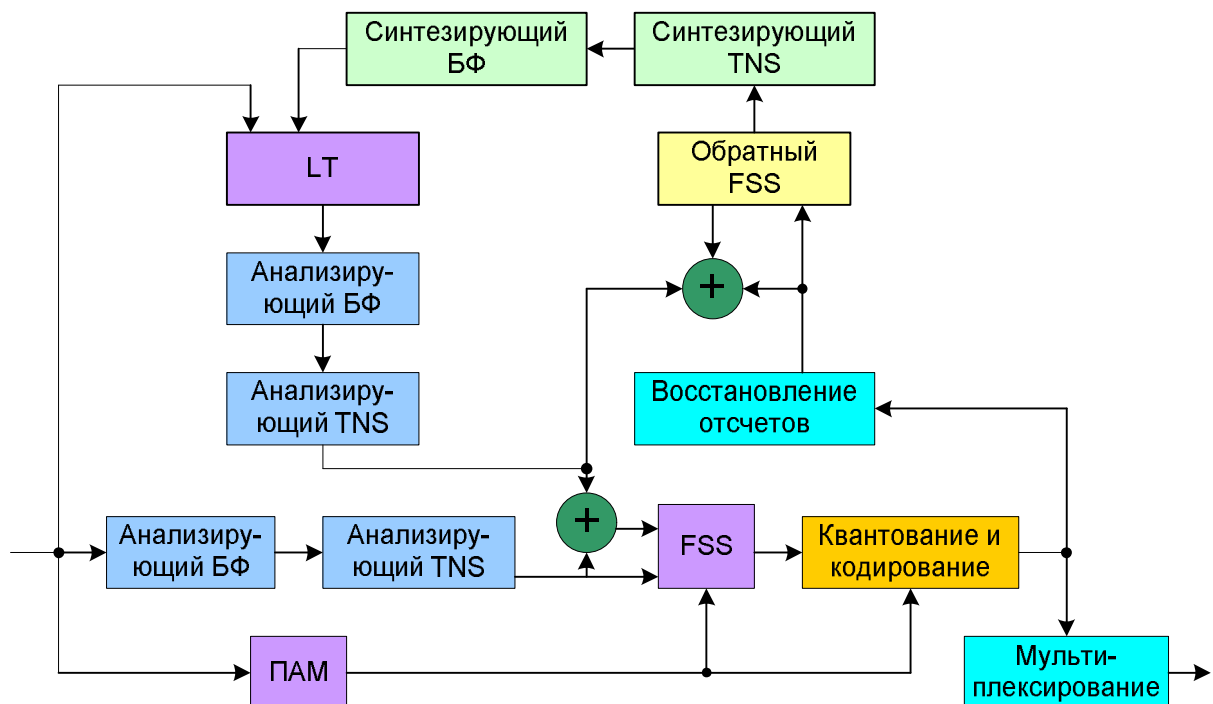


Рисунок 1.8 — Схема универсального кодера с *LTP*

Для работы схемы *LTP* кодированный сигнал предыдущего кадра переводится обратно во временную область с помощью инверсного преобразования *TNS* и синтезирующего БФ, в блоке *LTP* он сравнивается с

приходящим сигналом, а полученная разность опять переводится в спектральную область. Специальный переключатель *FSS* (*Frequency Selective Switch* — переключатель с частотной избирательностью) выбирает исходный или разностный сигнал в зависимости от того, какая альтернатива в данный момент предпочтительнее. По сравнению с предсказанием из *MPEG-2 AAC* данный метод предсказания требует вдвое меньших ресурсов памяти и производительности процессора.

Для увеличения эффективности кодирования музыкальных сигналов на низких скоростях разработан алгоритм *Twin VQ* (*Transform-domain Weighted Interleave VQ* — взвешивающее векторное квантование с перемежением и преобразованием областей). Основная идея — заменить обычное кодирование спектральных компонентов в *AAC* перемежающим векторным квантованием, приложенным к нормализованному спектру (см. рисунке 1.9).

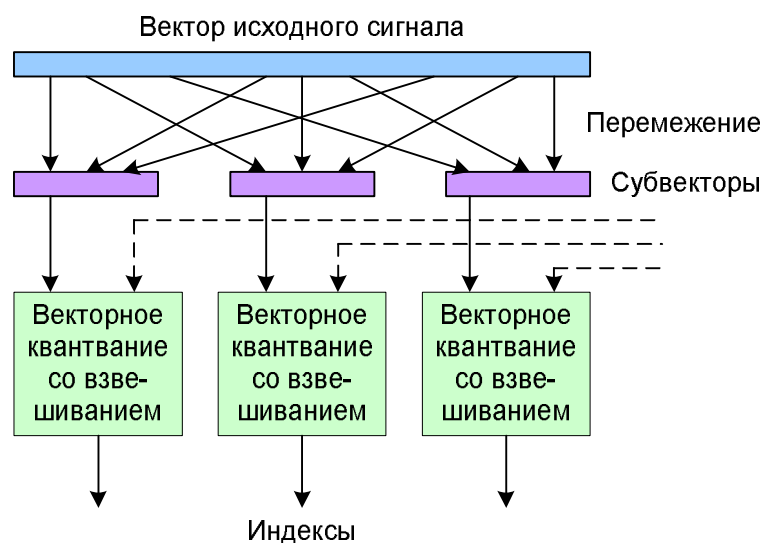


Рисунок 1.9 — Алгоритм *Twin VQ* векторного квантования спектральных компонентов

Квантование спектральных коэффициентов осуществляется в два шага: на первом они нормализуются к некоторому пределу, на втором — квантуются с использованием векторного квантования. Процесс нормализации включает оценку спектра по шкале Барка, извлечение периодических компонентов и оценку мощности спектральных

составляющих. В результате нормализации спектральные коэффициенты выравниваются и нормализуются вдоль частотной оси. Затем нормализованные коэффициенты описываются как многомерный вектор, чередуются в субвекторы, как показано на рисунке 1.9, и квантуются с использованием векторного квантования. Остальная часть алгоритма AAC остается неизменной.

Алгоритм *Twin VQ* дает хорошие результаты в интервале скоростей от 6 кбит/с до 24 кбит/с и используется в основном в универсальных кодеках *MPEG-4* с масштабированием для формирования базового слоя.

1.6. Профили и уровни стандарта *MPEG-4*

MPEG-4 представляет собой обширный набор средств и алгоритмов кодирования аудиовизуальных объектов. Чтобы сделать реализацию декодера экономически оправданной и облегчить проверку на соответствие стандарту, в некоторых разделах определены ограниченные наборы инструментов, называемые *профилями*. Для каждого из профилей установлены один или несколько уровней, ограничивающих требования к вычислительным способностям декодера. Понятие профиля введено для визуальных объектов, аудио, системы и описаний сцены. Однако специфика *MPEG-4* потребовала некоторых дополнений по сравнению с предшествующими стандартами. В *MPEG-2* видеокадр можно представить себе как один прямоугольный объект, занимающий всю сцену, и для него достаточно определить один профиль. В *MPEG-4* объектов может быть несколько, для каждого оптимальным будет свой профиль, поэтому введена дополнительная градация, как промежуточная между уровнем и профилем — *тип объекта*. Этот параметр определяет синтаксис (структуру) цифрового потока для одиночного объекта. Профиль же определяет набор типов объектов, которые могут присутствовать в сцене.

Для натуральных объектов определены пять типов объектов:

1) простой — прямоугольный объект с произвольным форматом, использует простые средства кодирования, основанные на *I*- и *P-VOP*;

2) простой масштабируемый — прямоугольный объект с пространственным и временным масштабированием;

3) базовый — производный от простого, с добавлением *B-VOP*; чересстрочная развертка не поддерживается;

4) основной — обеспечивает высшее качество, по сравнению с базовым дополнительно поддерживает градационное кодирование формы, спрайты, чересстрочное разложение;

5) *N*-битовый — аналогичен базовому, но допускает квантование плоскостей яркости и цветности с разрядностью от 4 до 12 бит.

Для кодирования неподвижных натуральных визуальных объектов существует специальный тип объекта:

6) неподвижная масштабируемая текстура — неподвижное изображение произвольной формы, использует волновое кодирование и пошаговую загрузку и восстановление.

Для синтетических объектов определены следующие три типа объектов:

7) анимированная двумерная сетка — объединяет синтетическую сетку (прямоугольную или топологии Делоне) с натуральным видео, кодируемым по базовому типу. Видео может отображаться на сетку и деформироваться путем перемещения ее узлов — это дает интересные анимационные возможности. Визуальный объект может быть любой формы;

8) базовая анимированная текстура — анимация неподвижных изображений (таких, как в типе 6);

9) примитивное лицо — средство анимации человеческого лица. Этот тип объекта не определяет конкретное лицо, анимация может быть применена к любой выбранной модели.

Профили определяют, какие типы визуальных объектов могут присутствовать в сцене. В первой версии стандарта определено 9 профилей; допустимые сочетания профилей и типов объектов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Профили и типы объектов *MPEG-4* видео

Профиль Тип объекта	Простой	Простой масштабируемый	Базовый	Основной	N-битовый	Масштабируемая текстура	Простой, анимация лица	Базовая анимированная структура	Гибридная
Простой	•	•	•	•	•				•
Простой масштабируемый		•							
Базовый			•	•	•				•
Основной				•					
N-битовый					•				
Масштабируемая текстура				•		•		•	•
Анимированная D-сетка									•
Базовая анимированная структура								•	•
Примитивное лицо							•	•	•
Число уровней	3	2	2	3	1	3	2	2	2

Простой профиль допускает присутствие только объектов простого типа и предназначен в первую очередь для мобильных служб и Интернета. Профиль поддерживает до 4-х объектов в сцене с максимальным разрешением *QCIF*, три уровня ограничивают скорость потока в пределах от 64 кбит/с до 384 кбит/с, максимальную площадь, занимаемую объектом, и число макроблоков в секунду, которое декодер должен обработать. Простой

масштабируемый профиль может осуществлять кодирование с масштабированием при тех же предпосылках, имеет два уровня.

Базовый профиль воспринимает типы объектов простой и базовый, полезен для интерактивных приложений. Основной профиль создавался с учетом вещательных служб. Самый высший уровень основного профиля поддерживает до 32 объектов простого, базового или основного типа и максимальную суммарную скорость потока до 38 Мбит/с. *N*-битовый профиль работает с объектами простого, базового и *N*-битового типа и полезен в специальных системах наблюдения и медицинского контроля, где требуется широкий динамический диапазон яркости и насыщенности.

Из остальных профилей наибольший интерес представляет гибридный, объединяющий натуральные (базовый) и синтетические (все три) типы объектов. Он полезен при помещении «реального» объекта в синтетический мир и, наоборот, синтетического объекта в реальное окружение.

В нижней строке таблицы 1.1 указано число уровней, определенных в стандарте для каждого профиля. В таблице 1.2. показаны параметры потока для некоторых уровней.

В стандарте установлены следующие точки соответствия: простой профиль и базовый профиль с размерами сцены *QCIF* и *CIF*, скоростями потока 64, 128, 384 кбит/с и 2 Мбит/с. Для основного профиля нормируются форматы *CIF*, Рек. ВТ.601, ТВЧ со скоростями 2, 15 и 38,4 Мбит/с.

Вторая версия стандарта добавила три профиля к натуральному видео:

1) простой усовершенствованный профиль реального времени — обеспечивает эффективное кодирование с использованием обратного канала (видеотелефония, телеконференции, дистанционное наблюдение);

2) базовый масштабируемый профиль — поддерживает пространственное и временное масштабирование в базовом профиле;

3) профиль с улучшенной эффективностью кодирования — подходит для мобильного приема вещательных передач и других применений, где требуется высокая эффективность кодирования.

Таблица 1.2 — Параметры потока для некоторых профилей *MPEG-4* видео

Профили и уровни		Типовой размер сцены	Скорость потока, бит/с	Максимальное число объектов	Общая ёмкость памяти, макроблоков
Простой профиль	<i>L1</i>	<i>QCIF</i>	64 к	4	198
	<i>L2</i>	<i>CIF</i>	128 к	4	792
	<i>L3</i>	<i>CIF</i>	384 к	4	792
Базовый профиль	<i>L1</i>	<i>QCIF</i>	384 к	4	594
	<i>L2</i>	<i>CIF</i>	2 М	16	2376
Основной профиль	<i>L2</i>	<i>CIF</i>	2 М	16	2376
	<i>L3</i>	Рек. 601	15 М	32	9720
	<i>L4</i>	1920×1088	38,4 М	32	48960

Три новых профиля введены в синтетическое видео, в том числе простой профиль анимации лица и фигуры.

Общее число визуальных профилей достигло 15.

После принятия второй версии работа над дополнениями к стандарту продолжена. В частности, предполагается ввести студийный профиль, в котором *VOP* с кодированием формы могли бы передаваться со скоростью несколько сот мегабит в секунду.

В таблице 1.3 показаны основные параметры студийного профиля стандарта *MPEG-4*.

Низкий уровень этого профиля мог бы соответствовать высокому уровню профиля «4:2:2» из стандарта *MPEG-2*, в двух других уровнях предлагается ввести два подуровня — с дискретизацией «4:2:2» и «4:4:4». Группа *MPEG* изучает кодирование 2D и 3D анимаций, цифровой кинематограф и другие вопросы.

Таблица 1.3 — Параметры студийного профиля стандарта *MPEG-4*

Уровень		Максимальный размер изображения и частота кадров	Максимальная скорость отсчетов	Скорость цифрового потока, Мбит/с	Квантование, дискретизация
Низкий (совместим с 4:2:2 <i>P@HL</i>)		1920×1088 30Гц	125337600	300	10 битов 4:2:2
Основной	4:2:2	2048×2048 60Гц	250675200	600	10 битов 4:2:2
	4:4:4		376012800	800	10 битов 4:2:2 4:4:4
Высокий	4:2:2	4096×4096 120Гц	805306368	1200	10/12 битов 4:2:2
	4:4:4		1207959552	2500	10/12 битов 4:2:2 4:4:4

Как и для видеообъектов, в стандарте введена классификация типов объектов для звука. В общей сложности первая версия определила 15 типов объектов, часть из них базируется на алгоритме *AAC*, один на алгоритме *Twin VQ*, три типа объектов связаны с алгоритмами кодирования речи, еще четыре определяют типы объектов для синтезированных звуков.

Определены 4 профиля кодирования звука.

Речевой профиль — совместим с тремя «речевыми» типами объектов, имеет два уровня, допускает до 20 объектов в сцене одновременно.

Масштабируемый профиль — обеспечивает высококачественное кодирование при низкой скорости цифрового потока и гибкое приспособление к изменениям скорости в канале, наилучшим образом приспособлен для передачи звука в Интернете. Число объектов в сцене, число потоков и частоты дискретизации определяются четырьмя уровнями, определенными в условных «единицах сложности» — производительности процессора в миллионах операций в секунду (*PCU*) и объеме памяти в тысячах слов (*RCU*): уровень 1 — один моно объект любого типа, частота

дискретизации до 24 кГц; уровень 2 — один стерео или два моно объекта, частота до 24 кГц; уровень 3 — один стерео или два моно объекта, частота до 48 кГц; уровень 4 — один объект 5.1 или группа объектов, частота до 48 кГц, сложность до 30 *PCU* и 19 *RCU*.

В качестве примера в таблице 1.4 приведены требования к декодеру, работающему в одном из уровней данного профиля.

Таблица 1.4 — Требования к декодеру звука масштабируемого профиля

Тип объекта	Тактовая частота, кГц	Быстродействие процессора, млн. операций/с	Емкость памяти, тыс. слов
<i>AAC</i> основной	48	5	5
<i>AAC</i> простой	48	3	3
<i>AAC</i> с масштабируемой тактовой частотой	48	4	3
<i>AAC</i> с долговременным предсказанием	48	4	4
<i>AAC</i> масштабируемый	48	5	4
<i>Twin VQ</i>	24	2	3
<i>CELP</i>	8	1	1
<i>CELP</i>	16	2	1
<i>CELP</i>	8/16	3	1
<i>HVXC</i>	8	2	1

Синтетический профиль — группирует типы объектов синтезированного звука, может использоваться в тех случаях, когда источником звука служит не микрофон и требуется обеспечить передачу при очень низких скоростях.

Основной профиль — наиболее сложный профиль, объединяющий возможности всех остальных; пригоден для звуков всех видов, обеспечивает высочайшее качество звучания. Примеры применения — запись на *DVD* и мультимедийное вещание. Профиль имеет 4 уровня.

Соответствие звуковых профилей и типов объектов *MPEG-4* показано в таблице 1.5.

Таблица 1.5 — Профили и типы объектов *MPEG-4* аудио

Профили Типы объектов	Речевой	Масштабируемый	Основной	Синтетический
<i>AAC</i> основной			•	
<i>AAC</i> с масштабируемой тактовой частотой			•	
<i>AAC</i> простой		•	•	
<i>AAC</i> с долговременным предсказанием		•		
<i>AAC</i> масштабируемый		•	•	
<i>Twin VQ</i>		•	•	
<i>CELP</i>	•	•	•	
<i>HVXC</i>	•	•	•	
<i>TTSI</i>	•	•	•	
Основной синтетический			•	•
<i>Wavetable</i> синтезатор			•	•
Общий <i>MIDI</i>			•	•
Алгоритмический синтез			•	•
Число уровней	2	4	4	3

Во второй версии стандарта введены 4 новых профиля: высококачественный (*High Quality*), *LD* (*Low Delay*) — профиль с малой задержкой, натуральный (*Natural*) и межсетевой мобильный (*Mobile Audio Internetworking*).

Большое число возможных алгоритмов заставило ввести также три графических профиля, четыре профиля описаний сцены и один профиль дескрипторов объектов. Эти профили перечислены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 — Профили графических средств и описаний сцены в *MPEG-4*

Средство	Профиль
Графика	Простой 2D
	Полный 2D
	Полный
Описание сцены	Звуковой
	Простой 2D
	Полный 2D
	Полный
Дескриптор объекта	Базовый

Стандарт *MPEG-4* не предназначен на замену *MPEG-2* в ТВ вещании в его нынешнем виде, но в наш век быстрых изменений можно представить себе, что и традиционная концепция ТВ вещания будет заметно изменяться. Начало этим изменениям положено переходом на цифровое вещание, предоставляющее новые возможности по количеству программ, качеству изображения и звукового сопровождения, передаче дополнительных данных и предоставлению новых услуг. Можно с определенной степенью уверенности прогнозировать слияние ТВ приемника, телефона, спутникового и кабельного терминалов (в дальнейшем к ним присоединится и персональный компьютер) в единое информационное устройство, получающее информацию из общей информационной сети по высокоскоростному цифровому каналу (проводному, оптическому или спутниковому). Большая часть ТВ программ может передаваться по такому каналу в свободное от нагрузки (ночное) время, загружаясь в емкую память

информационного блока, в реальном времени будут передаваться только новости и программы, рассчитанные на интерактивное взаимодействие со зрителем.

Теперь представим себе, как расширит возможности восприятия добавление к традиционной программе дополнительной информации в форме наложенного текста, неподвижных изображений (возможно, полупрозрачных), двумерной и трехмерной графики, дополнительных зрительных и звуковых образов. Часть этих улучшений используется и сегодня, но это происходит по воле вещателя, и зритель не в состоянии что-либо изменить. В *MPEG-4* дополнительная информация передается вместе с объектом и ею легко управлять нажатием кнопки. Вы, например, можете вызвать на экран ответ на вопрос викторины, а можете убрать его и самостоятельно поломать голову над загадкой. Возможно изменить точку взгляда на сцену, как бы сменить положение камеры. Это дает возможность лучше воспринять спортивное соревнование или музыкальное шоу. В многоканальной звуковой системе можно выбрать число каналов, язык звукового сопровождения и даже самому включиться в оркестр, исполнив партию на любом понравившемся вам инструменте.

Широкие возможности открывает *MPEG-4* в интерактивной среде. Возможности *MPEG-4* позволят установить связь с несколькими людьми и организовать совместный просмотр программы, изменяя по договоренности ход сюжета, или поиграть в сетевые игры с трехмерными изображениями. А телемагазин?! Насколько расширятся здесь возможности покупателя по всесторонней оценке будущей покупки. Вы можете получить дополнительную информацию о заинтересовавшем вас объекте, например, новой марке автомобиля, подведя к нему курсор и нажав кнопку на пульте, можете рассмотреть автомобиль со всех сторон, пригласить консультанта (виртуального, разумеется) и выслушать его разъяснения, узнать цену и наличие модели на складе. Вы можете послать приятелю изображение

автомобиля и всю информацию о нем по электронной почте и тут же получить его совет.

2. ПЕРЕДАЧА ТЕЛЕВИЗИОННОГО СИГНАЛА В ЦИФРОВОЙ ФОРМЕ

2.1. Канальное кодирование

В процессе передачи информация подвергается кодированию. Существуют разные способы кодирования, предназначенные для решения требуемых задач. Существует так называемое «канальное кодирование». Оно позволяет, зная статистические свойства помех, закодировать передаваемую информацию таким образом, чтобы отрицательные последствия от действия помех были минимальны. Канальное кодирование, таким образом, необходимо исключительно для повышения помехоустойчивости передачи информации на приемную сторону.

Принцип канального кодирования заключается в использовании специальных кодов, предполагающих добавление к передаваемому сигналу избыточной информации. Простейший пример такого кодирования — добавление к передаваемому кодовому слову дополнительного разряда, позволяющего осуществить так называемую «проверку на четность». Однако эта проверка является достаточно примитивной — она позволяет лишь обнаружить наличие ошибки в передаваемой кодовой последовательности, но не скорректировать ее. Существуют коды, позволяющие не только обнаруживать ошибки при передаче, но и исправлять их (см. рисунок 2.1).

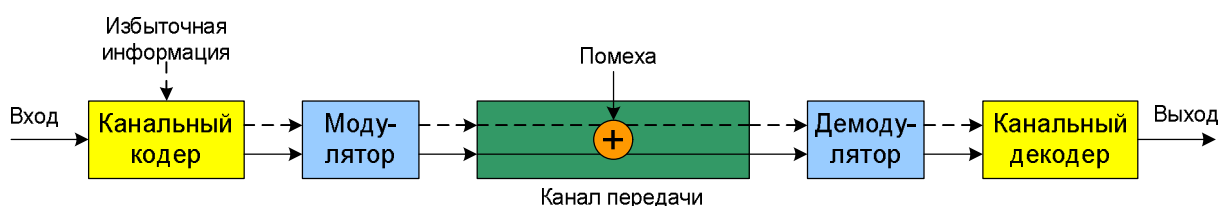


Рисунок 2.1 — Принцип канального кодирования

Коды, корректирующие ошибки передачи, применяются последовательно, с учетом их различных свойств и способности корректировать ошибки различного характера. При этом код, применяемый на передающей стороне первым, должен декодироваться на приемной стороне в последнюю очередь. Такой

код называется *внешним*. Соответственно код, применяемый на передающей стороне последним и декодируемый в приемном устройстве в первую очередь, называется *внутренним*. Возможная последовательность операций по отношению к передаваемому цифровому ТВ сигналу для коррекции ошибок передачи, показана на рисунке 2.2.

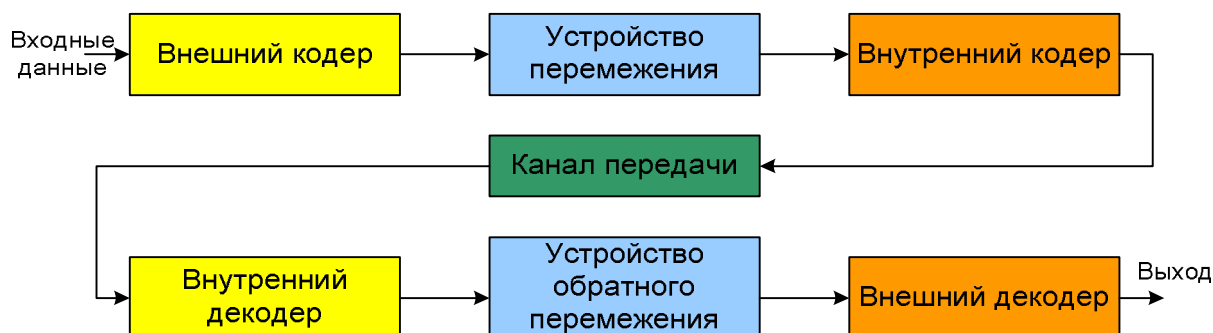


Рисунок 2.2 — Коррекция ошибок в цифровом ТВ сигнале

Применение нескольких канальных кодеров позволяет повысить помехозащищенность передачи и, что очень важно, — корректировать так называемые «пакетные» ошибки, которые представляют собой последовательность большого количества идущих друг за другом ошибочных посылок. Например, благодаря использованию буферной памяти между внешним и внутренним канальными кодерами и чередованию направлений записи в память и считывания из нее достигается «перемежение» символов и возможность коррекции сравнительно большой пакетной ошибки. Биты передаваемой информации, которые перед передачей были смежными во времени, в результате такого перемежения удаляются друг от друга в процессе передачи по каналу с помехами. На приемной стороне также имеется буферная память, осуществляющая «обратное» перемежение. Это происходит до поступления сигнала на декодер внешнего кода.

В качестве внешнего кода обычно используется код Рида-Соломона (*Reed-Solomon-Code, RS*), который требует двух проверочных символов на одну исправляемую ошибку. В процессе кодирования кодом Рида-Соломона,

используемым для передачи цифрового ТВ сигнала, на каждый пакет общего транспортного потока длиной 188 байт добавляется 16 проверочных байт.

Получается новый пакет, содержащий необходимую избыточность и имеющий длину 204 байта. Это позволяет исправить 8 байт, искаженных помехой в процессе передачи. Для этого кода в литературе принято следующее обозначение: (204, 188, 8).

3. ЦИФРОВЫЕ СПОСОБЫ МОДУЛЯЦИИ

3.1. Предварительные замечания

В технике цифровой связи методы модуляции играют весьма значимую роль. Помимо своей основной функции — преобразования символ-сигнал — процесс модуляции является составной частью общего процесса согласования сигнала с характеристиками канала. Современные методы многопозиционной модуляции в полном соответствии с теоремой Шеннона могут рассматриваться и как способ кодирования данных сообщения в символы канала.

Свойства цифрового сигнала не позволяют передавать такой сигнал по каналу связи непосредственно, то есть «в первичной полосе частот» из-за слишком высокой скорости передачи, оцениваемой в сотни мегабит в секунду. Кроме того, существующие сети ТВ вещания (спутниковые, кабельные или наземные), как правило, построены по принципу частотного уплотнения. Поэтому сигнал, предназначенный для передачи по таким сетям, должен быть точно ориентирован в принятой системе организации частотных каналов. Следует также иметь в виду, что передаваемый сигнал должен быть энергетически сосредоточен в определенной ограниченной области спектра. Как правило, несущей (модулируемой) частотой является гармонический сигнал. Изменяемыми параметрами в таком случае могут быть его амплитуда, частота и фаза. Если модулирующий сигнал имеет цифровую природу и изменяется дискретно, принимая фиксированные значения, то понятие «модуляция» иногда заменяется понятием «манипуляция».

Передаваемый сигнал, таким образом, в результате модуляции можно представить в следующей форме

$$U(t) = (\text{Амплитуда})\cos[2\pi(\text{Частота})t + (\text{Фаза})]. \quad (3.1)$$

Использование для передачи сигналов цифрового телевидения различных видов модуляции позволяет одновременно увеличить количество передаваемой информации в единицу времени, сократить используемую

полосу частот и повысить помехоустойчивость ТВ системы. В цифровом телевидении может применяться амплитудная модуляция (АМ), в иностранной литературе применительно к цифровому сигналу называемая *ASK (Amplitude Shift Keying)*; частотная модуляция (ЧМ), ее обозначают также *FSK (Frequency Shift Keying)*, и фазовая модуляция (ФМ), англоязычное обозначение *PSK (Phase Shift Keying)*.

На рисунке 3.1 иллюстрируется принцип работы каждого из применяемых видов модуляции для двухпозиционного модулирующего сигнала, то есть когда каждое состояние сигнала передает один бит информации. На рисунке 3.1 также показаны графики, поясняющие изменение сигнала во времени.

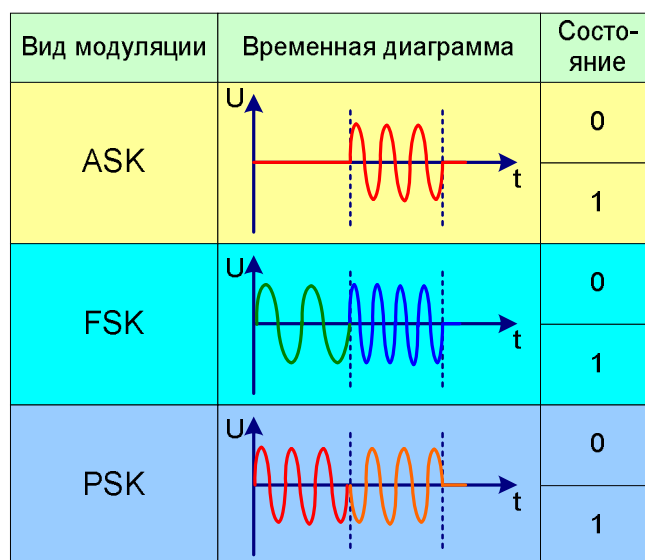


Рисунок 3.1 — Виды модуляции при двухпозиционном модулирующем сигнале

Демодуляция рассмотренных сигналов достаточно проста в техническом отношении, и для ее осуществления известно много способов. Качество того или иного способа модуляции при передаче цифровых сигналов оценивается обычно по следующим критериям:

- эффективности использования частотного спектра;
- минимально необходимого отношения сигнал-помеха;
- стойкости к ухудшению условий приема на отдельных частотах.

Эффективность использования частотного спектра увеличивается с

увеличением числа состояний, которые может принимать сигнал при передаче одного символа. Если модулирующим сигналом является сигнал, в котором каждый символ передается не двумя, а большим количеством возможных его значений, то количество информации, передаваемое с каждым символом, возрастает. Такие значения обычно выбираются равными 4, 16, 32, 64, 128 и т.д., то есть как ряд 2^n , где n — число возможных состояний передаваемого или модулирующего сигнала во время передачи одного символа.

Эта эффективность оценивается величиной, измеряемой в битах в секунду на один герц (бит/с/Гц). Такая размерность показывает, что в данном случае оценивается скорость потока, приходящаяся на единицу частоты.

Чем выше количество информации, переносимое одним символом, тем выше число возможных состояний, которое может принять изменяемый в процессе модуляции параметр модулируемого сигнала (виды модуляции с большим числом таких состояний называют *многопозиционными*), и соответственно тем выше эффективность использования частотного спектра. Однако, чем большее число состояний может принимать модулирующий сигнал, тем меньше существует отличий в параметрах этих состояний, а значит, демодуляция такого сигнала в условиях помех может стать затруднительной. Поэтому эффективность использования частотного спектра обычно связана с возможно достижимым отношением сигнал/помеха, и при выборе этих параметров необходим компромисс.

3.2. Сигнальные созвездия

3.2.1. Полярные диаграммы

Удобным средством анализа характеристик модулированных сигналов является отображение их с помощью полярных и квадратурных диаграмм в виде *сигнальных созвездий*.

В известных системах цифрового телевидения применяют многоуровневую амплитудную модуляцию с частично подавленной нижней

боковой полосой (8-, 16-VSB), четырехпозиционную квадратурную фазовую модуляцию (QPSK) и квадратурную амплитудно-фазовую модуляцию (16-, 64-, 256-QAM).

Наиболее простой способ отображения амплитудно-фазовых соотношений модулированного сигнала — это *полярная диаграмма*. При построении полярной диаграммы несущая является опорным элементом, относительно которого отсчитывается угол фазового сдвига и изменение уровня модулированного сигнала. Модуль радиус-вектора, исходящего из центра окружности (начала координат), характеризует относительный уровень элементарного сигнала, а угол наклона между радиус-вектором и некоторым начальным радиусом — текущий фазовый сдвиг. Математически это можно выразить стандартной записью модулированного сигнала

$$u(t) = A \cos(\omega t + \theta) = A \operatorname{Re}\{e^{j(\omega t + \theta)}\} = A \operatorname{Re}\{e^{j\omega t} e^{j\theta}\}. \quad (3.2)$$

Отображение сигнала $u(t)$ на полярной диаграмме соответствует его «замораживанию» во времени, когда фиксируются только амплитуда сигнала A и его начальный фазовый сдвиг θ . Экспоненциальная форма записи сигнала позволяет выделить сомножители, характеризующие частоту несущей $e^{j\omega t}$ и ее фазу $e^{j\theta}$. При построении полярной диаграммы частотный сомножитель исключается, а остается только фазовый.

Примеры полярных диаграмм, показывающих характерные изменения значащих параметров для амплитудной, фазовой и амплитудно-фазовой модуляций, показаны на рисунке 3.2. При чистой амплитудной модуляции переход между значащими позициями (M1 и M2) осуществляется по прямой линии (кратчайшему расстоянию) между ними. При чистой фазовой модуляции — по дуге окружности.

Соответственно изменяются либо уровень, либо фазовый сдвиг модулированного сигнала. При возникновении паразитной модуляции иного свойства переход будет характеризоваться некоторой кривой линией. При совместной амплитудно-фазовой модуляции переход осуществляется по прямой линии, связывающей точки с различными фазовыми углами.

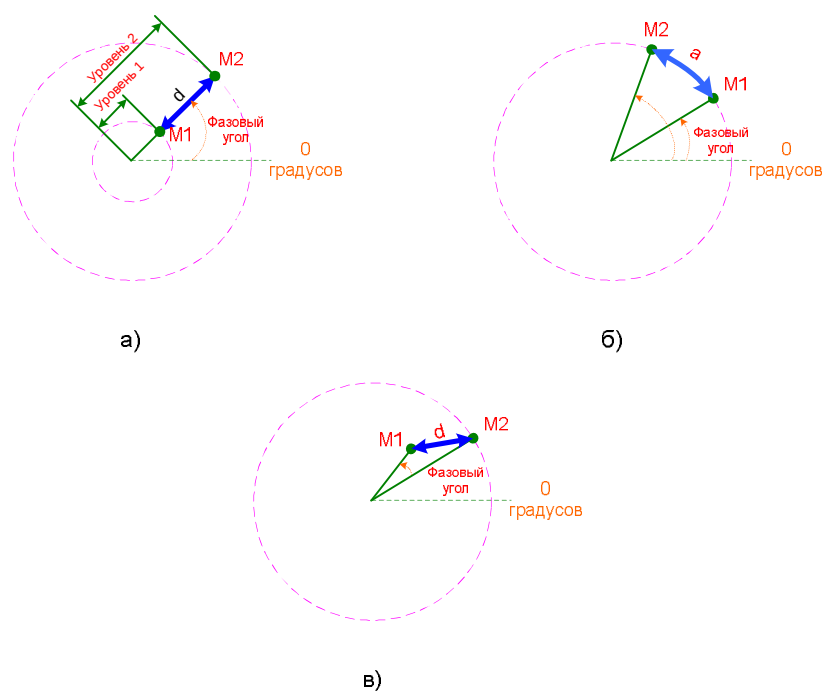


Рисунок 3.2 — Полярные диаграммы для амплитудной (а), фазовой (б) и амплитудно-фазовой (в) модуляций

3.2.2. Квадратурные диаграммы

Модуляторы для цифровых систем передачи строятся, как правило, по квадратурной схеме. В таком модуляторе выходной сигнал образуется суммированием двух различных модулированных сигналов, несущие которых имеют между собой фазовый сдвиг 90° . Входы двух модулирующих сигналов квадратурного модулятора обозначаются I и Q : I (синфазный) относится к каналу, в котором начальный фазовый сдвиг несущей принимается равным 0° ; Q — к каналу, несущая в котором сдвинута на 90° .

Для адекватного отображения пространства сигналов на выходе квадратурного модулятора полярные диаграммы преобразуют в прямоугольную систему координат, в которой по горизонтальной оси I откладывают уровень сигнала в синфазном канале, а по вертикальной оси Q — уровень сигнала в квадратурном канале. Все остальные построения соответствуют полярной диаграмме с учетом того, что ось I символизирует нулевой фазовый сдвиг, а ось Q — сдвиг на 90° . Проекции вектора сигнала на

оси I и Q , рассматривают как его квадратурные компоненты. Рисунок 3.3 поясняет переход от полярной диаграммы к квадратурной.

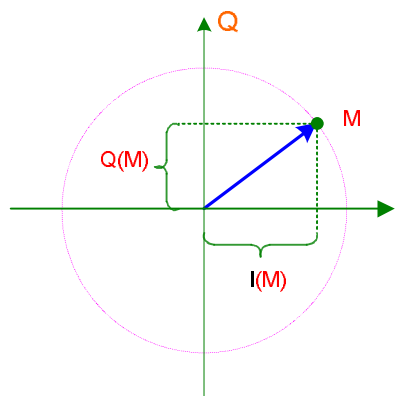


Рисунок 3.3 — К пояснению преобразования полярной диаграммы в квадратурную

Полные квадратурные диаграммы для 4-PSK и 8-PSK показаны на рисунке 3.4.

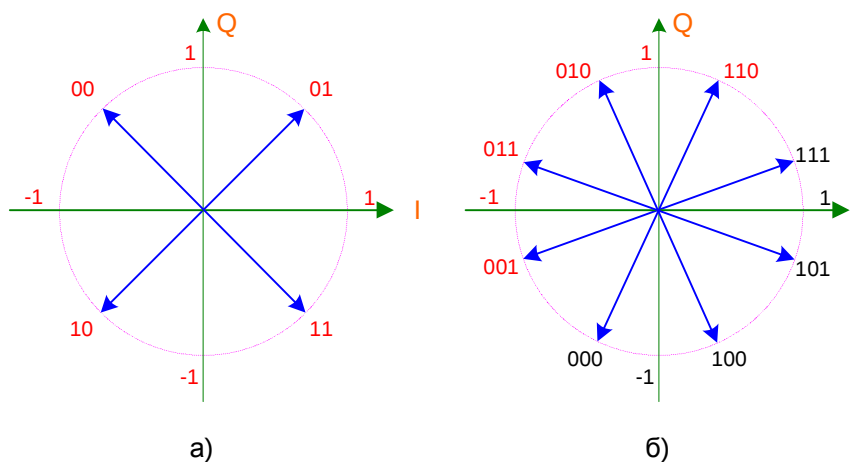


Рисунок 3.4 — Полные квадратурные диаграммы для модуляций 4-PSK (а) и 8-PSK (б)

Для упрощения рисунка квадратурной диаграммы, особенно при отображении сигналов современных многопозиционных видов модуляции, обычно изображают только конечные точки векторов, исходящих из начала координат, а сами векторы, как правило, опускают. Часто опускают и сами оси I и Q , подразумевая, что они проходят через центр симметрии фигуры.

Полное множество модулированных сигналов, изображенных на квадратурной диаграмме в виде точек, называют *сигнальным созвездием*, а сами сигналы — *точками созвездия*. Форма сигнального созвездия соответствует виду модуляции, а расстояния между точками созвездия характеризуют помехоустойчивость при приеме сигнала. Если требуется пометить точки созвездия, рядом с ними размещают значения битов модулирующих сигналов, которые порождают данный модулированный сигнал с конкретными значениями фазы и амплитуды.

В качестве примера на рисунке 3.5 показаны несколько простых созвездий: *одномерных* для амплитудной модуляции (AM) и *двумерных* для фазовой модуляции (PSK), геометрическим местом точек которых являются соответственно прямая и окружность.

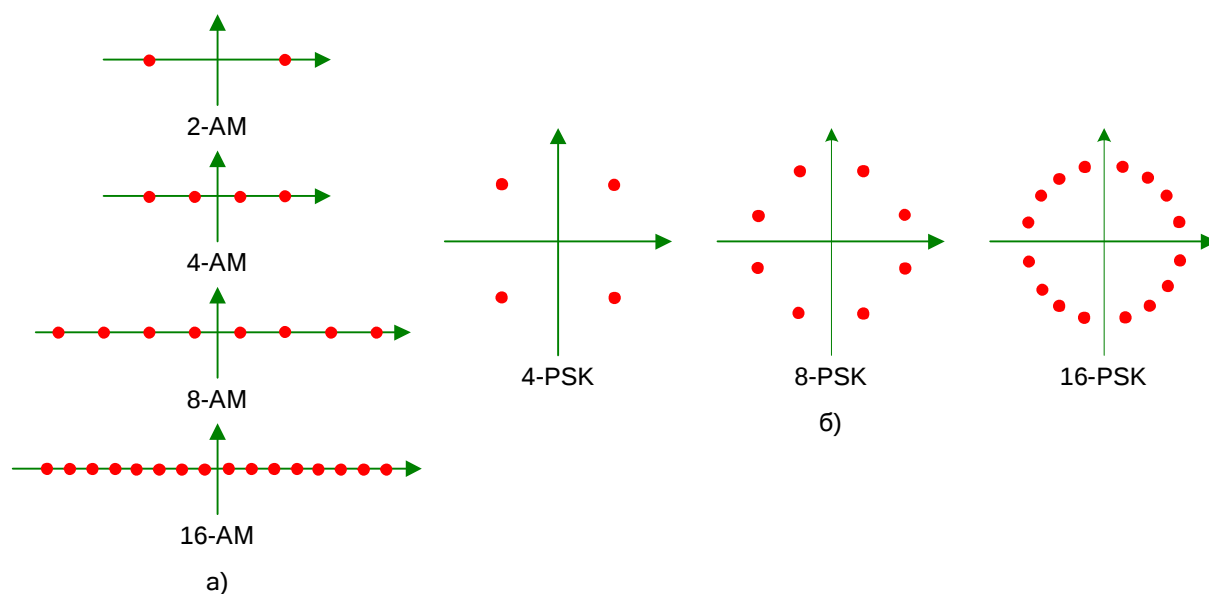


Рисунок 3.5 — Сигнальные созвездия для амплитудной (а) и фазовой (б) модуляций

Здесь следует заметить, что показанные созвездия AM получаются при использовании в качестве модулирующего сигнала биполярных импульсов, значащие уровни которых симметричны относительно нулевого уровня. При модуляции отрицательными импульсами одновременно изменяется на противоположную и фаза сигнала. Поэтому такая AM может

рассматриваться и как разновидность *PSK*. При классической АМ с пассивной паузой, когда состоянию 1 соответствует некоторый уровень несущей, а состоянию 0 — отсутствие несущей, созвездие будет иметь несимметричный характер: точка 0 будет расположена в центре координат, а точка 1 — в области положительных значений оси I . При однополярном многоуровневом модулирующем сигнале созвездие АМ представляется рядом точек на одной из полуосей I . При классической фазовой модуляции изменению подлежит только фаза сигнала при неизменной его амплитуде. Поэтому в зависимости от кратности модуляции созвездие *PSK* представлено соответствующим числом точек, расположенных на окружности. Двоичная фазовая модуляция ничем не отличается от двоичной АМ с биполярным модулирующим сигналом и имеет такое же одномерное созвездие.

3.2.3. Диаграммы состояний

Полярным и квадратурным диаграммам иногда придают свойства диаграммы состояний, показывая стрелками допустимые пути перехода между точками созвездия. Центр квадратурной диаграммы соответствует нулевому уровню несущей. Поэтому, если переход из одной точки созвездия в другую происходит через начало координат, то это адекватно сильному изменению огибающей модулированной несущей с переходом ее через ноль. Большие изменения уровня несущей повышают требования к линейности тракта, иначе в спектре сигнала могут возникать дополнительные гармонические составляющие, приводящие к комбинационным искажениям и расширению спектра передаваемого сигнала. Сильные вариации уровня возникают при одновременной инверсии значений битов в каналах I и Q . Если инверсия битов возникает только в одном из квадратурных каналов, то уровень несущей изменяется мало, во всяком случае исключаются переходы через ноль. Для получения эффекта ограниченного изменения уровня несущей применяют специальные методы, связанные с преобразованием структуры и формы модулирующих сигналов: относительное кодирование,

сдвиг во времени (офсет) сигналов в каналах I и Q , найквистовскую фильтрацию.

3.3. Амплитудная модуляция

Как показано на рисунке 3.6, спектр сигнала U_{AM} , модулированного по амплитуде, состоит из спектральной составляющей $U_{нес}$, соответствующей несущей частоте, и двух частей — $U_{НБ}$ и $U_{ВБ}$ симметрично расположенных относительно несущей.

В своем «цифровом» варианте этот способ модуляции отличается от аналогового только тем, что модулирующий сигнал является дискретным. Значения, которые может принимать амплитуда A_n модулированного сигнала в процессе модуляции, определяются следующим образом:

$$A_n = 2n - 1 - M, \quad n = 1, 2, 3, \dots M, \quad (3.3)$$

где M — число возможных состояний модулирующего сигнала.

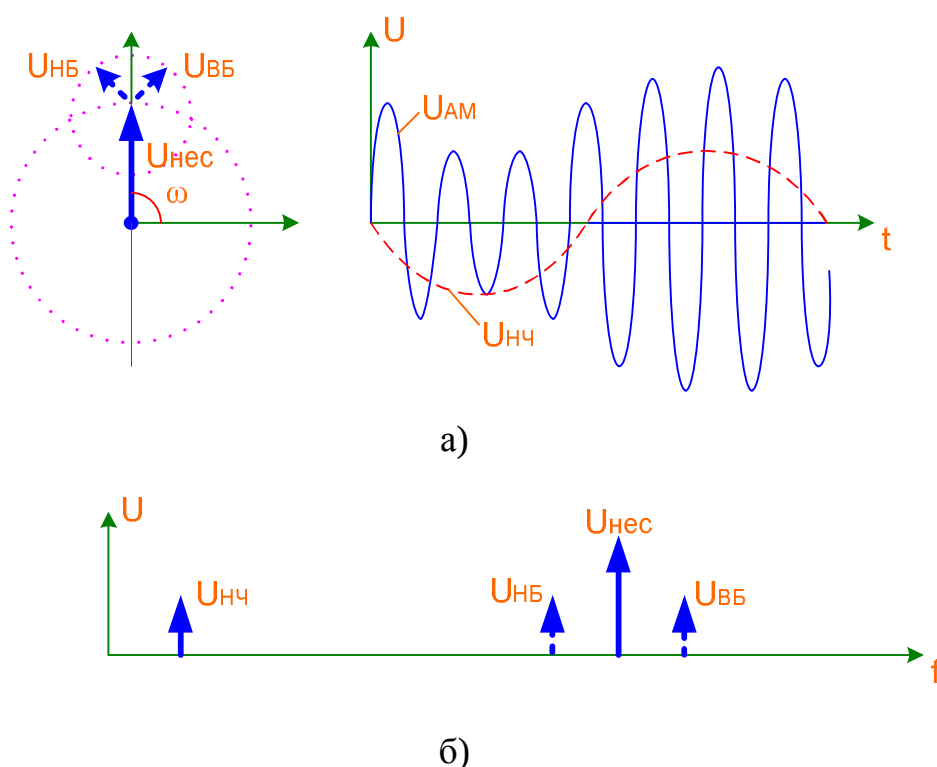


Рисунок 3.6 — Принцип амплитудной модуляции:

а) векторное представление; б) спектральное представление

Пример амплитудной модуляции для случая $M = 8$ (передача 8-мипозиционного цифрового сигнала) изображен на рисунке 3.7, где показаны соответственно форма модулированного и модулирующего сигналов при последовательности дискретных значений модулирующего сигнала: 1, 3, -5, 1, 3.

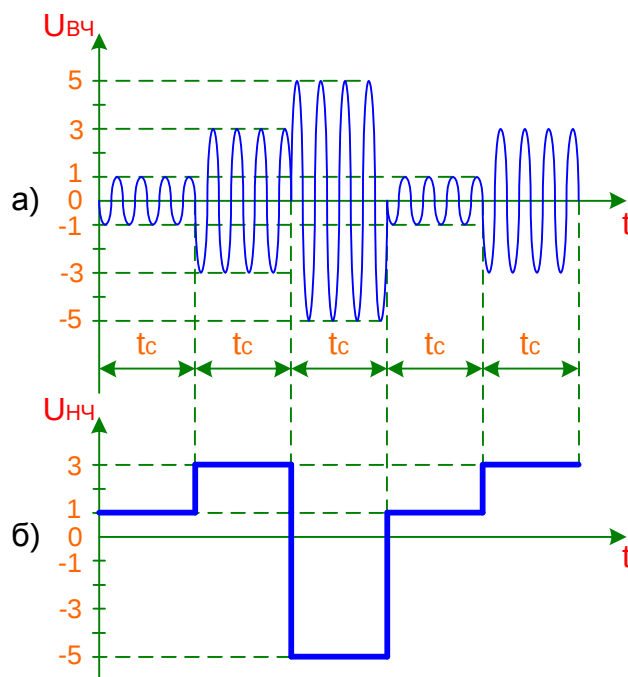


Рисунок 3.7. — Амплитудная модуляция при передаче 8-мипозиционного цифрового сигнала: а) модулированный сигнал; б) модулирующий сигнал

Уменьшение несущей относительно боковых частот приближает этот вид модуляции к так называемой балансной модуляции, при которой энергия сигнала сосредоточена не в самой несущей, а в боковых частотах. Переворот фазы модулированного сигнала объясняется тем обстоятельством, что изменяется соотношение между амплитудами несущей и боковых частот.

Однако в данном примере, показанном на рисунке 3.7, фаза сигнала может изменяться только на 180° , так как в спектре модулированного сигнала присутствуют обе боковые частоты, симметрично расположенные относительно несущей. При амплитудной модуляции обе эти симметричные части спектра несут одинаковую информацию, так как повторяют форму спектра модулирующего сигнала. Такая информационная избыточность в

современном аналоговом телевидении устраняется частичным подавлением одной боковой полосы частот. Этот способ передачи, называемый амплитудной модуляцией с одной боковой полосой (ОБП), в иностранной литературе обозначается аббревиатурой *VSB-AM* (*Vestigial Sideband Modulation*).

Кроме того, для сокращения полосы частот радиосигнала *VSB-AM* сокращают также полосу частот модулирующего сигнала. Делают это следующим образом. На рисунке 3.7,б показан модулирующий сигнал, который представляет собой последовательность прямоугольных импульсов с длительностью t_c , равной времени передачи одного цифрового символа. Такой сигнал имеет широкую полосу частот. Если эту полосу ограничить фильтром, то импульсы модулирующего сигнала потеряют прямоугольную форму и при декодировании будут создавать взаимные помехи. Если при этом, однако, воспользоваться фильтром нижних частот со специально выбранной частотой среза (фильтр Найквиста), то прямоугольные импульсы на выходе фильтра примут вид функции $(\sin x)/x$ (см. рисунок 3.8,а).

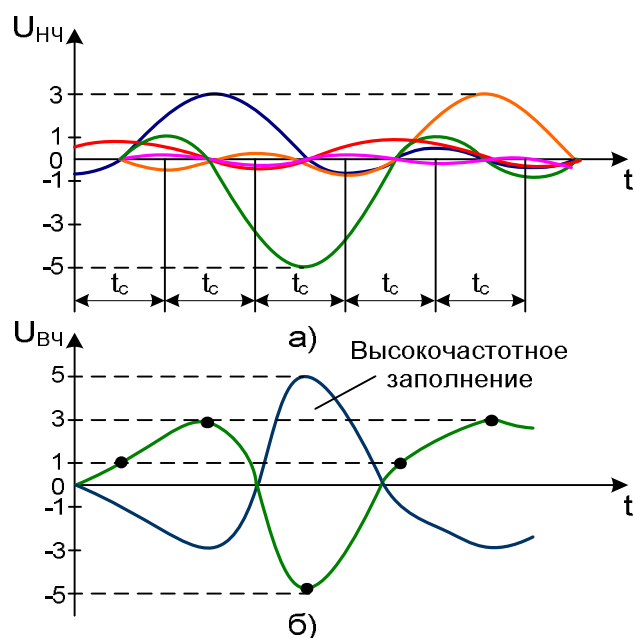


Рисунок 3.8 — Модуляция вида *VSB-AM*:

а) формирование модулирующего сигнала из импульсов вида $(\sin x)/x$;

б — осциллограмма радиосигнала *VSB-AM*

Каждый импульс такой формы имеет амплитуду своего максимума, соответствующую значению передаваемого цифрового символа. На рисунке показана амплитуда импульсов, соответствующая приведенному ранее примеру последовательности символов. Длительность импульса превосходит время передачи символа, однако это не вызывает межсимвольных искажений, так как каждый отфильтрованный таким образом импульс обладает положительным свойством — оказывается равным нулю в тот момент, когда должны быть зафиксированы следующие отсчеты (моменты времени 1...5 на рисунке 3.8). Таким образом, в промежутках между отсчетами и амплитуда, и фаза модулированного сигнала могут иметь произвольные значения: амплитуда — ввиду того, что модулирующий сигнал представляет собой сумму импульсов вида $(\sin x)/x$, а фаза — в силу того обстоятельства, что при подавлении одной боковой полосы исчезает равенство векторов $U_{\text{нб}}$ и $U_{\text{вб}}$ (см. рисунок 3.6), вследствие чего характер изменения фазы сигнала становится более сложным.

Подавление одной боковой полосы частот сигнала после амплитудной модуляции приводит к сокращению спектра передаваемого сигнала, и, следовательно, к повышению эффективности передачи информации, хотя и несколько ухудшает помехоустойчивость передачи.

Такой способ модуляции использован в американской системе цифрового ТВ вещания *ATSC*.

3.4. Квадратурная амплитудная модуляция

Требования к точности характеристик формирующих и полосовых фильтров тем выше, чем больше число позиций в модулированном сигнале.

При квадратурной амплитудной модуляции (*Quadrature Amplitude Modulation, QAM*) передаваемый сигнал модулирует и амплитуду, и фазу несущего колебания. Это происходит одновременно и независимо.

Можно сказать, что если немодулированная несущая имеет вид

$$u(t) = U_m \cos \omega t, \quad (3.4)$$

то в результате квадратурной амплитудной модуляции такой несущей сигналами u_I (*Inphase*) и u_Q (*Quadrature*) передаваемый сигнал будет представлен

$$u(t) = u_I \cos \omega t + u_Q \sin \omega t. \quad (3.5)$$

Представление сигналов в виде суммы квадратурных составляющих подсказывает простой способ их формирования в квадратурном модуляторе. Квадратурный модулятор является универсальным устройством, которое может быть использовано для получения сигнала линейно-модулированной несущей с двумя боковыми полосами, включая такие виды, как фазовая и амплитудно-фазовая модуляции.

Структурная схема квадратурного модулятора показана на рисунке 3.9.

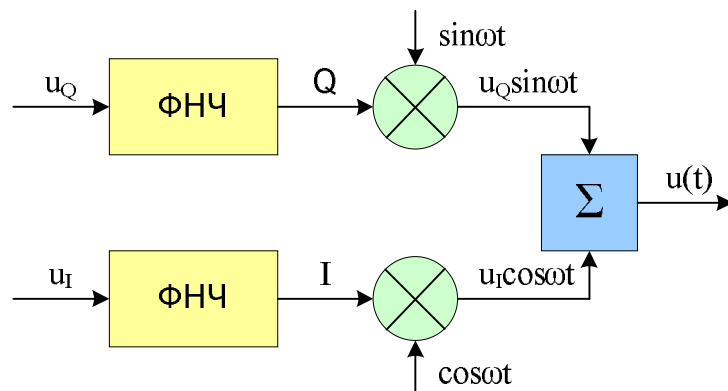


Рисунок 3.9 — Структурная схема квадратурного модулятора

Основу модулятора составляют два балансных модулятора и сумматор ВЧ сигналов, на выходе которого образуется квадратурномодулированный сигнал $u(t)$. Несущие, поступающие на опорные входы балансных модуляторов, имеют взаимный фазовый сдвиг 90° , то есть находятся в квадратуре. Входные модулирующие сигналы u_I и u_Q являются квантованными по уровню и дискретными во времени. Длительность их тактового интервала определяется частотой тактирования. Таким образом, входные сигналы — это сигналы с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) в основной полосе. Они могут поступать на сигнальные входы балансных модуляторов непосредственно или через низкочастотные

формирующие фильтры, как показано на рисунке 3.9. В первом случае формируется нефильтрованный выходной ВЧ сигнал с частотными составляющими, выходящими за пределы необходимой полосы. При НЧ фильтрации модулирующих сигналов модулированный сигнал также локализуется по спектру и согласуется с выделенной полосой частот канала.

Получение различных видов модуляции с помощью квадратурного модулятора обеспечивается подачей на его входы биполярных АИМ сигналов u_I и u_Q , квантованных на различное число уровней и симметричных относительно нуля. В «вырожденном» случае, то есть когда на один из входов подан ноль напряжения, а на другой двоичная последовательность с относительными уровнями ± 1 , работает только один канал, и модулятор превращается из квадратурного в обычный балансный. На выходе формируется одномерный сигнал фазовой модуляции с изменением фазы на 180° , переносящий 1 бит/символ. При подаче двоичных АИМ сигналов в оба канала модулятора по каждому из каналов передается 1 бит/символ, а общая скорость передачи составляет 2 бит/символ. В результате образуется сигнал 4-PSK, обычно называемый квадратурной фазовой модуляцией (QPSK), но формально относящейся к широкому классу квадратурной амплитудно-фазовой модуляции (QAM).

Такой вид модуляции можно пояснить с помощью векторной диаграммы, на которой в декартовой системе координат с вертикальной осью Q и горизонтальной осью I изображают положение конца вектора промодулированного сигнала. Векторная диаграмма сигнала для случая четырехпозиционной квадратурной амплитудной модуляции, или, как ее обозначают, 4-QAM, показана на рисунке 3.10.

Каждая точка характеризуется своим сочетанием амплитуды и фазы сигнала, поэтому соответствующий каждой точке символ переносит информацию в количестве

$$I = \log_2 N, \quad (3.6)$$

где I — число битов информации, передаваемое каждым символом;

N — число возможных «позиций» вектора или точек на векторной диаграмме.

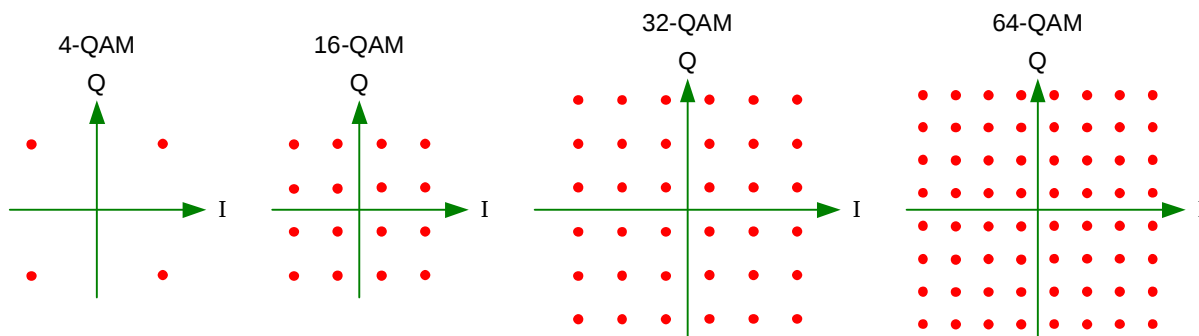


Рисунок 3.10 — Векторная диаграмма сигнала при различных видах квадратурной амплитудной модуляции

При модуляции *4-QAM* амплитуда сигнала не меняется и такой случай полностью эквивалентен четырехпозиционной фазовой манипуляции (*4-PSK* или *QPSK*).

Векторные диаграммы сигнала для способов модуляции *4-QAM*, *16-QAM*, *32-QAM* и *64-QAM* также показаны на рисунке 3.10.

Сигнальное созвездие *16-QAM* образуется ансамблем из 16 сигналов, различающихся между собой по фазе и амплитуде. В кабельных системах распределения ТВ сигналов наряду с *16-QAM* регламентируется применение форматов *64-QAM* и даже *256-QAM*, созвездия которой образованы 256 позициями фазы и амплитуды.

Рассмотрим принципы построения модема с квадратурной модуляцией на примере системы цифрового вещания с *16-QAM*. Структурные схемы модулятора *16-QAM* и демодулятора *16-QAM* показаны на рисунке 3.11.

Входной поток данных вначале подвергается необходимой цифровой обработке в процессоре данных: выделению тактовой частоты, скремблированию, дифференциальному кодированию, последовательно-параллельному преобразованию. Так как модуляция *16-QAM* обеспечивает удельную скорость передачи 4 бит/(с·Гц), то для последующей модуляции поток данных в ходе его цифровой обработки разделяется на 4 подпотока с соответственно сниженными скоростями. Затем производится цифро-

аналоговое преобразование двух двоичных подпотоков в один четырехуровневый с одновременным формированием их спектра в ЦТФ, где импульсам придается сглаженная форма. Четырехуровневые сигналы в каналах I и Q управляют работой балансных модуляторов, выходные сигналы которых складываются, образуя сигнал 16-QAM с двумя полосами и подавленной несущей. На балансные модуляторы несущая поступает со сдвигом $\pi/2$, то есть в квадратуре. Выходной сигнал модулятора на промежуточной частоте несущей проходит через полосовой фильтр, ограничивающий внеполосные излучения, и может быть конвертирован в полосу любого вещательного канала.

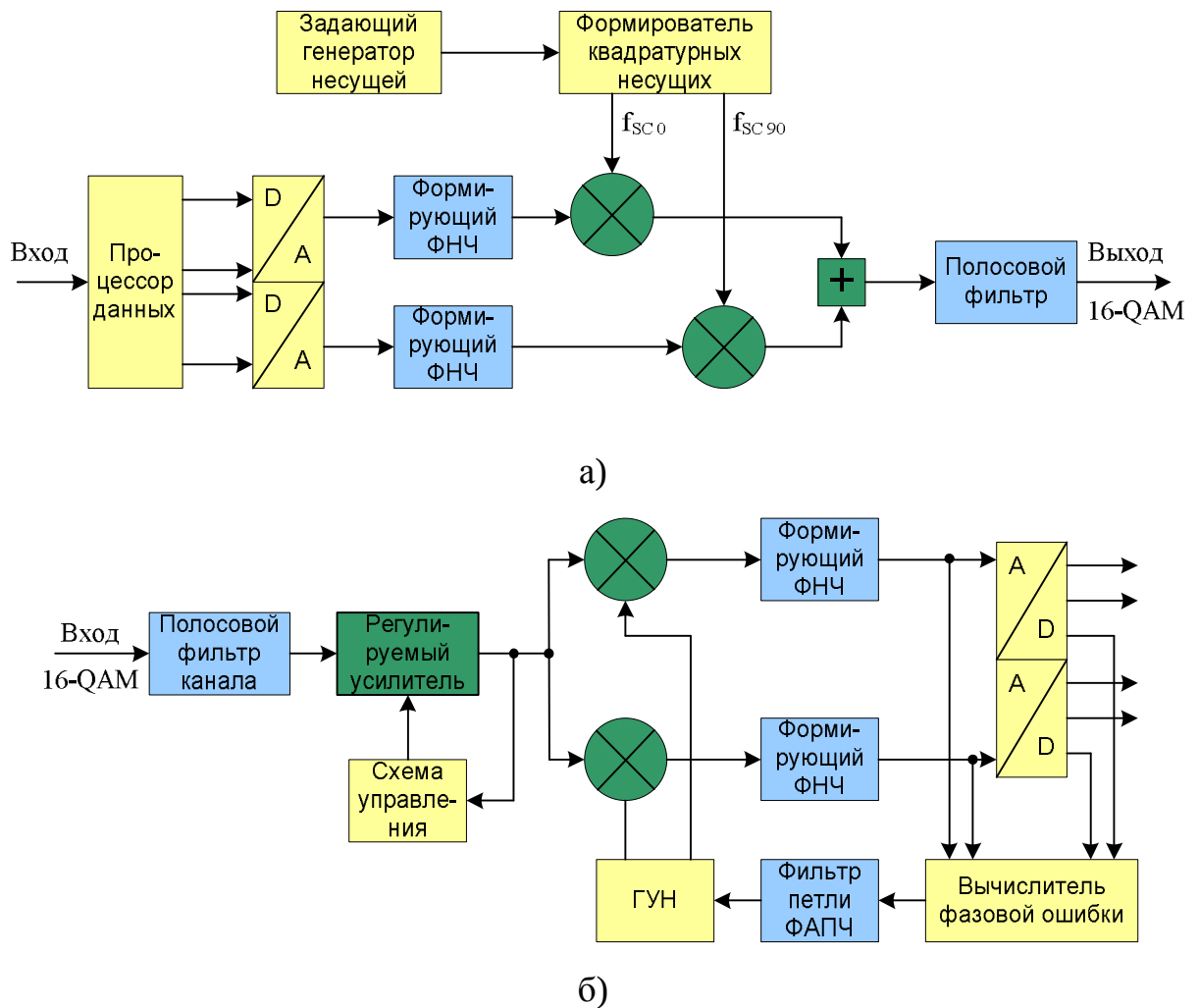


Рисунок 3.11 — Структурные схемы модулятора 16-QAM (а) и демодулятора 16-QAM (б)

В демодуляторе имеется аналогичная пара балансных модуляторов и блоки обратного преобразования из четырехуровневых в двоичные сигналы с последующей обработкой данных. Принципиально сложными узлами являются схемы восстановления подавленной несущей и тактовой синхронизации. Обе эти операции выполняются на основе анализа структуры принимаемого сигнала в синфазном и квадратурном каналах. Формирующие ФНЧ на выходах балансных модуляторов доводят спектр сигнала до требуемого по Найквисту и ослабляют шумы и помехи.

Разумеется, применение многопозиционной *QAM* способствует передаче большего количества информации, однако в реальных условиях, при наличии помех, на приемной стороне возможно ошибочное определение амплитуды и фазы передаваемого сигнала. Это обстоятельство и ограничивает количество информации, передаваемое одним символом. Тем не менее, основное преимущество *QAM* перед другими видами модуляции — в ее хорошей помехозащищенности.

Сигналы квадратурной амплитудной модуляции широко используются при передаче сигналов телевидения по радиорелейным и кабельным линиям, в системах наземного цифрового телевизионного вещания.

3.5. Относительная фазовая модуляция

Относительная фазовая (или фазоразностная) модуляция (*PSK*) является практическим методом реализации приема сигналов с фазовой модуляцией. Перекодировка модулирующего сигнала данных из абсолютного в относительный код позволяет учитывать при декодировании не абсолютные значения фазы сигнала, а ее относительные сдвиги, что устраняет неопределенность решения о значении символа.

Благодаря своей простоте и эффективности *PSK* получила широкое распространение в цифровых системах передачи. Этому способствовали такие ее свойства, как в 4 раза более высокая скорость по сравнению с ЧМ при равной помехоустойчивости в канале с АБГШ, а при равной скорости передачи информации вдвое большая помехоустойчивость, чем у ЧМ и

вчетверо большая, чем у АМ. Относительная фазовая модуляция является двоичной, или двухпозиционной модуляцией, в которой используются два значения фазового сдвига, отличающихся на 180° . Изменения во времени модулирующего и промодулированного сигналов показаны соответственно на рисунке 3.12.

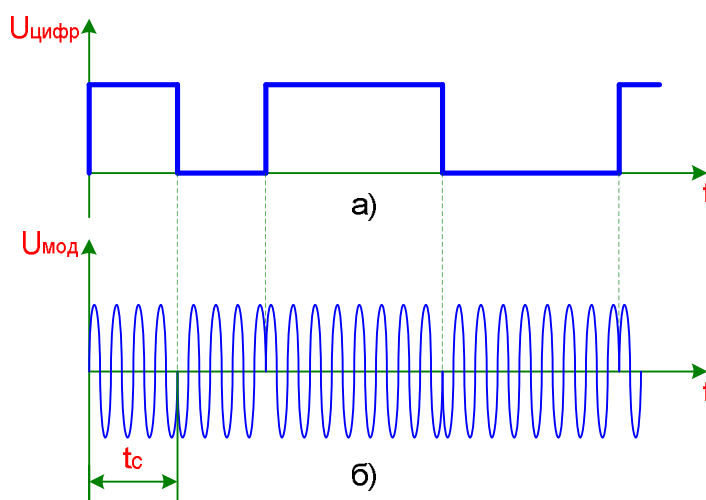


Рисунок 3.12 — Временные диаграммы сигналов при фазовой модуляции:

а) модулирующий сигнал; б) — модулированный сигнал

Модуляция 2-*PSK* тождественна балансной 2-АМ и имеет то же самое сигнальное созвездие, с которым совпадает и диаграмма состояний (см. рисунок 3.5,а). В цифровых системах передачи применяют сигналы многопозиционной *M-PSK*, то есть модуляции с повышенной кратностью K ($M = 2^K$) по отношению к *PSK*, кратность которой принята за единицу. Обычно используют наборы сигналов 4-, 8-, 16-*PSK*, созвездия которых показаны на рисунке 3.5,б. Но 8- и 16-*PSK* проигрывают 2-*PSK* и 4-*PSK* по энергетической эффективности, требуя значительно более высокой мощности передатчика для достижения тех же характеристик.

В цифровом телевидении для передачи по спутниковым трактам и в наземном вещании при тяжелых условиях приема используется двукратная, или четырехфазовая модуляция 4-*PSK*, обеспечивающая наилучший компромисс по соотношению мощность-полоса. Другое название этого вида

модуляции, связанное с методом получения модулированного колебания, квадратурная относительная фазовая модуляция (*QPSK* — *Quadrature Phase Shift Keying*).

Модуляция *QPSK* предоставляет необходимый компромисс между скоростью передачи и помехоустойчивостью и применяется как самостоятельно, так и в комбинациях с другими методами. Диаграммы состояний модуляции *QPSK* и офсетной дифференциальной *QPSK* (*S-DQPSK*) показаны на рисунке 3.13.

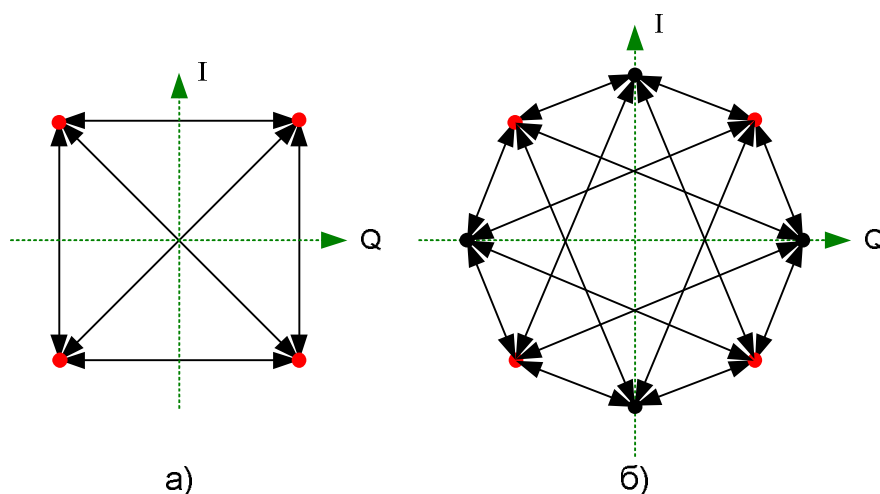


Рисунок 3.13 — Диаграммы состояния сигналов *QPSK* (а) и *S-DQPSK* (б)

При реализации дифференциального кодирования в сочетании со сдвигом несущей на $\pi/4$ сигнальное созвездие формируется двумя четырехточечными созвездиями *QPSK*, наложенными со сдвигом 45° . В результате в сигнале присутствуют восемь фазовых сдвигов, причем фазы символов выбираются поочередно то из одного созвездия *QPSK*, то из другого. Последовательные символы имеют относительные фазовые сдвиги, соответствующие одному из четырех углов: $\pm\pi/4$ и $\pm3\pi/4$.

Структурная схема модулятора *QPSK* показана на рисунке 3.14. Входной поток данных *D* разделяется на два параллельных потока *A* и *B*, которые затем в преобразователе кода (ПК) перекодируются в относительный код двух каналов (компонентов) *I'* и *Q'*. Цифровые потоки *I'* и *Q'* подвергаются сглаживанию в формирующих фильтрах (ФФ), выходные

сигналы которых I и Q непосредственно управляют работой четырёхфазового модулятора, состоящего из двух балансных модуляторов и сумматора.

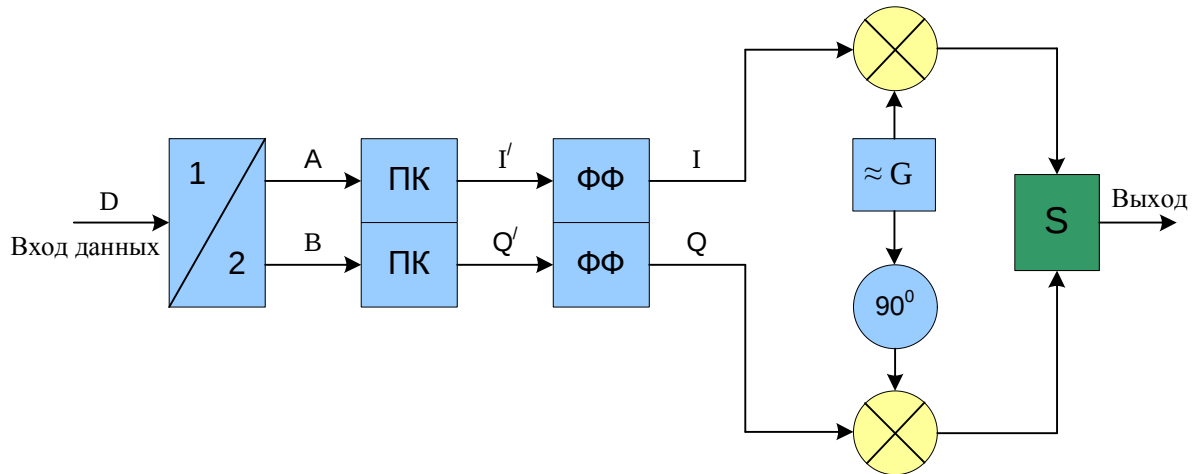


Рисунок 3.14 — Структурная схема модулятора $QPSK$

Фазовый сдвиг несущих в каналах I и Q , равен 90° . Правило кодирования фазовых сдвигов показано в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Кодирование фазовых сдвигов при $QPSK$

A	B	$QPSK$
0	0	45°
0	1	135°
1	0	315°
1	1	225°

Способ модуляции PSK применяется в случаях, когда необходимо сохранить постоянной амплитуду передаваемого сигнала или исключить амплитуду из числа параметров, изменяемых в процессе модуляции. Это очень важно, например, применительно к спутниковым системам ТВ вещания.

3.6. Иерархические режимы модуляции

Как правило, при использовании многопозиционной QAM расстояние между соседними точками, обозначающими положение конца вектора сигнала, выбирается одинаковым. Однако выбор расположения этих точек позволяет осуществить так называемую неоднородную квадратурную

амплитудную модуляцию. С ее помощью реализуют «иерархичность» в передаче информации.

На рисунке 3.15 показаны векторные диаграммы для способа квадратурной амплитудной модуляции 16-QAM.

На рисунке 3.15,а — обычная модуляция 16-QAM, на рисунках 3.15,б и 3.15,в — неоднородная 16-QAM.

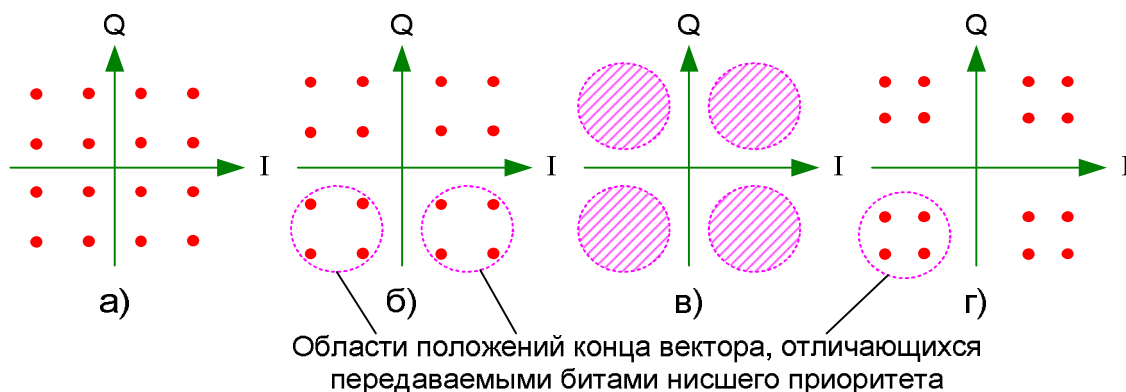


Рисунок 3.15 — Векторные диаграммы сигналов 16-QAM при иерархической передаче: а) обычная модуляция 16-QAM; б) неоднородная модуляция 16-QAM, $\alpha = 2$; в) декодирование модуляции только высшего приоритета; г) неоднородная модуляция 16-QAM, $\alpha = 4$

Как видно из рисунка 3.15, при неоднородной модуляции допустимые положения вектора сигнала расположены на диаграмме неравномерно. При наличии помех затруднительно декодировать сигнал, у которого возможные положения вектора отделяются небольшими расстояниями на фазовой плоскости. Было найдено остроумное решение — так изменять амплитуду и фазу несущей частоты в процессе модуляции, что возможные положения вектора сигнала оказываются расположенными на векторной диаграмме не равномерно, а на различных расстояниях друг от друга. При этом, очевидно, для одной части передаваемой информации при наличии помех условия декодирования улучшатся, а для другой части — осложнятся, но появляется важное преимущество — для сложных условий приема сигнала можно заранее определить, какая именно часть информации, имеющая высший

приоритет, в первую очередь должна попасть в приемное устройство. Величина неравномерности оценивается коэффициентом α , показывающим отношение расстояния между группами точек-концов вектора на диаграмме к расстоянию между соседними точками.

На рисунках 3.15,б и 3.15,в заштрихованы области, внутри которых изменения положения вектора сигнала могут быть зафиксированы в приемном устройстве лишь при помехоустойчивом приеме. При ухудшении условий приема детектор может выделить лишь меньшую, заранее определенную часть информации, имеющую высший приоритет. В примере, показанном на рисунке 3.15, такой объем информации эквивалентен случаю 4-QAM и показан на рисунке 3.15,г. Это позволяет строить приемники с различными возможностями, способные наиболее качественно принять ту долю передаваемой информации, которую они смогут воспроизвести при данных условиях приема.

3.7. Способ модуляции OFDM

Способ модуляции с одновременным использованием нескольких несущих частот, имеющий название *OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex* — способ с мультиплексированием ортогональных частот), известен более 30 лет, однако в последние годы, с развитием цифрового ТВ вещания, преимущества этого способа модуляции оказались актуальными.

Основная идея, положенная в основу этого способа, заключается в следующем. Передаваемый цифровой поток модулирующего сигнала «распараллеливается» и передается по нескольким каналам — путем модуляции нескольких несущих. Число этих несущих выбирается так, чтобы необходимым образом сократить скорость передачи информации на каждой отдельной несущей. В результате достигается главное — на передачу одного символа на каждой отдельной несущей может быть отведено большее время. Настолько большее, чтобы сделать передачу каждого символа независимой от наличия отраженных сигналов, обусловленных так называемым

«многолучевым» распространением радиоволн, что достаточно характерно для городских условий.

На рисунке 3.16 показан пример преобразования («распараллеливания») одного последовательного цифрового сигнала в пять отдельных сигналов путем демультиплексирования, что позволяет увеличить длительность передачи символа в каждом из пяти сигналов в пять раз. Далее, каждый из полученных таким образом сигналов с уменьшенной скоростью передачи символов модулирует соответствующую несущую, число которых равно числу модулирующих сигналов. При этом допускается фазовая (*PSK*) или квадратурная амплитудная (*QAM*) модуляция каждой несущей.

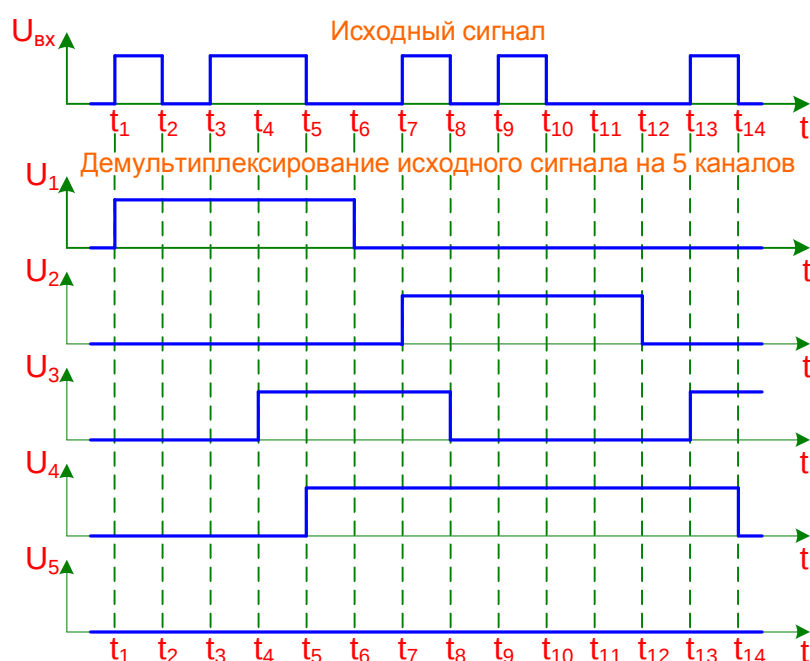


Рисунок 3.16 — Пример демультиплексирования цифрового сигнала

Несущие частоты при этом выбираются из следующих соображений:

- число несущих должно быть таким, чтобы при неизменной скорости потока данных на входе модулятора *OFDM* увеличить до требуемой величины время передачи одного символа на каждой несущей;
- несущие должны быть достаточно близки по частоте друг к другу, чтобы сократить занимаемую полосу частот канала связи;
- частоты несущих должны быть выбраны так, чтобы они не со-

здавали взаимных помех.

Последнее условие выполняется, если частоты удовлетворяют требованию ортогональности. Физический смысл этого требования заключается в следующем: спектр каждой несущей после модуляции должен иметь «нули» на частотах, на которых расположены остальные несущие. Выполнение этого условия обеспечивает отсутствие взаимных помех и независимую передачу информации на каждой несущей.

На рисунке 3.17 показан спектр одной несущей в результате модуляции ее сигналом прямоугольной формы.

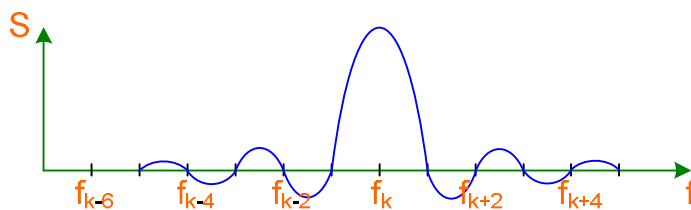


Рисунок 3.17 — Огибающая спектра одной несущей с номером k при модуляции *OFDM*

Исходя из условия ортогональности, частоты несущих должны располагаться на оси частот с шагом, обратным величине T_s — времени передачи одного символа. При этом значения каждой частоты определяются выражением

$$f_k = f_0 + k \frac{1}{T_s}, \quad (3.7)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots, n - 1, N$.

Получается ряд частот, расположенных равномерно и с общим спектром, достаточно близко приближающимся к прямоугольной форме, что позволяет эффективно использовать частотный канал передачи (см. рисунок 3.18).

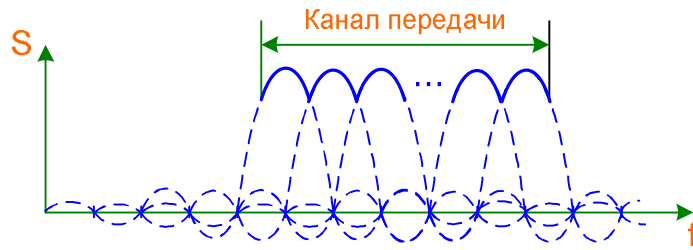


Рисунок 3.18 — Спектр передаваемого сигнала при модуляции *OFDM*

Важным фактором при таком способе модуляции является так называемая «межсимвольная интерференция» (*Intersymbol Interferention, ISI*), или, по существу, перекрестные искажения.

Модуляция *OFDM* позволяет применить простой прием для борьбы с этим явлением: при увеличении количества несущих частот время на передачу одного символа также увеличивается.

Этого увеличения оказывается достаточно для того, чтобы ввести между передаваемыми символами так называемый «защитный интервал» (*Guard Interval, GI*) (см. рисунок 3.19).

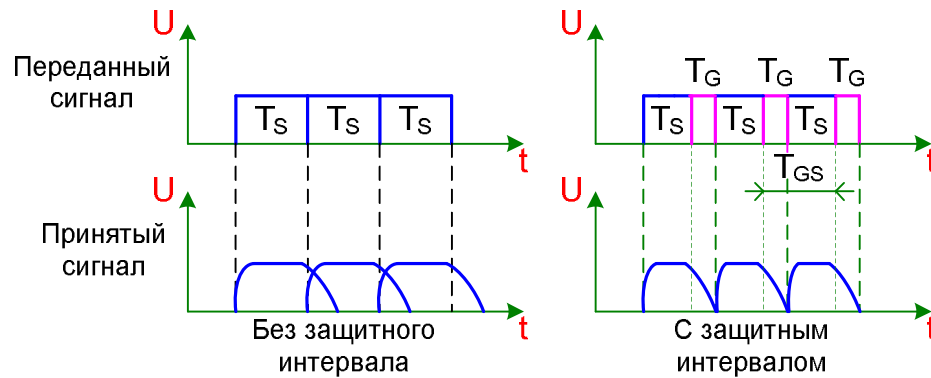


Рисунок 3.19 — Назначение защитного интервала при модуляции *OFDM*

В пределах защитного интервала передается как бы возвращённая назад во времени копия последующей части символа. Таким образом, время, затрачиваемое на передачу одного символа *OFDM*, состоит из интервала передачи полезной информации и защитного интервала

$$T_{GS} = T_G + T_S, \quad (3.8)$$

где T_{GS} — время, затрачиваемое на передачу одного символа;

T_G — защитный интервал;

T_S — время передачи полезной информации.

Процесс формирования полного символа *OFDM*, включающего защитный интервал, схематично показан на рисунке 3.20.

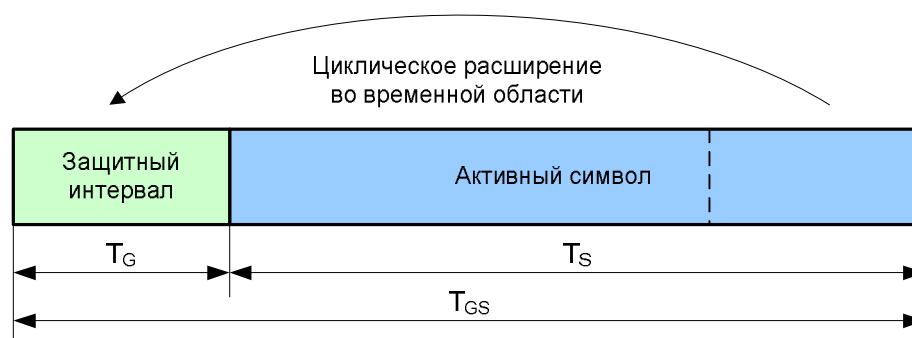


Рисунок 3.20 — К пояснению формирования полного символа *OFDM*

Правильный выбор длительности защитного интервала позволяет в определенных пределах устранить помехи, вызываемые эхо-сигналами.

На рисунке 3.21 показаны временные интервалы для основного сигнала и двух его эхосигналов.

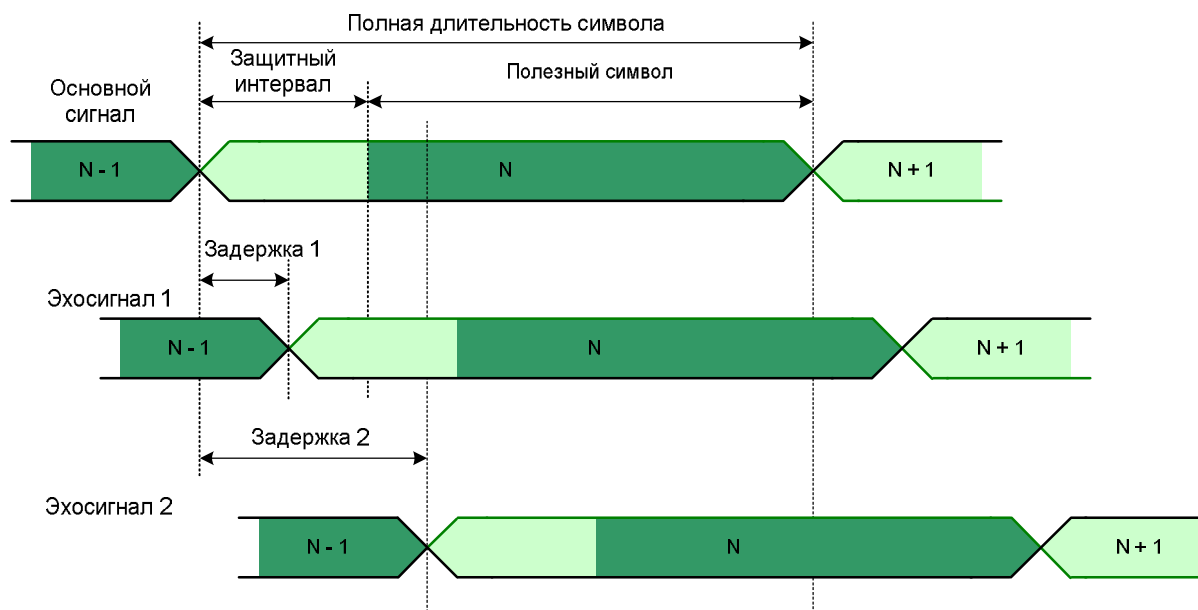


Рисунок 3.21 — Временные интервалы основного и двух эхосигналов

Задержка первого эхосигнала находится в допустимых пределах, и переходные процессы из-за стыка двух символов приходятся на защитный интервал основного сигнала, не искажая его полезную часть. Напротив, если второй эхосигнал задержан свыше допустимых пределов, то его переходная зона приходится на полезную часть основного сигнала, то есть защита не обеспечивается.

Рисунок 3.22 иллюстрирует суммирование нескольких задержанных сигналов с образованием мешающего сигнала, устраняемого за счет защитного интервала.

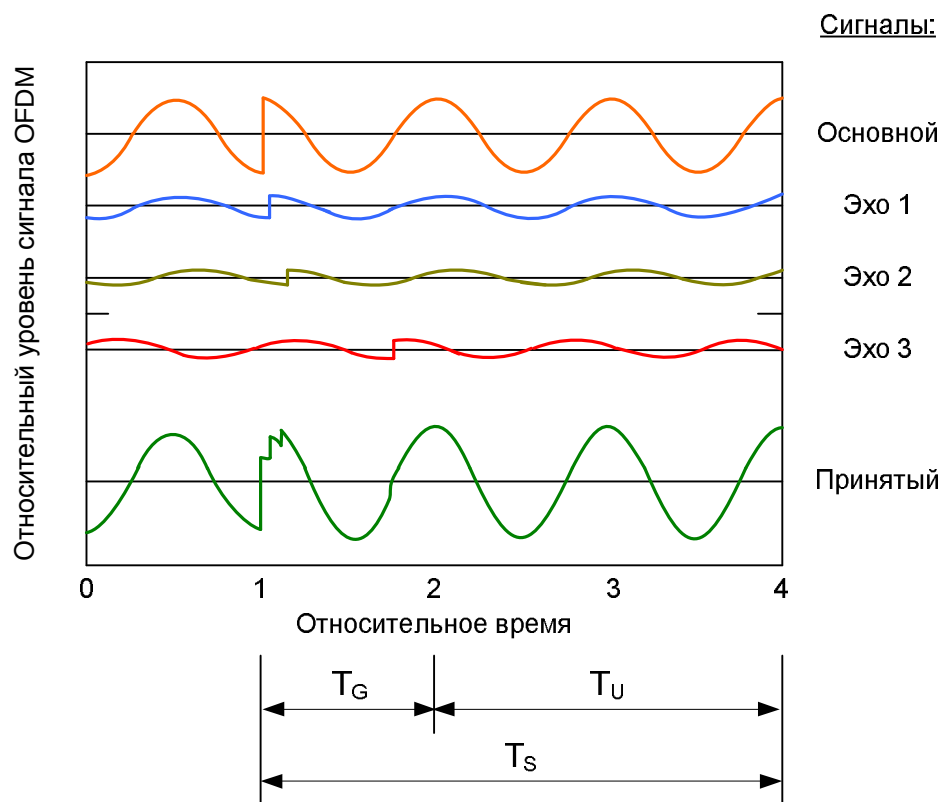


Рисунок 3.22 — Защитный интервал в символе *OFDM*

На рисунке 3.22 помимо основного сигнала показаны отраженные эхосигналы 1; 2 и сигнал соседнего передатчика одночастотной сети (эхосигнал 3). В приемник поступает сумма этих четырех сигналов. При выборе времени T_G больше времени импульсной реакции канала или времени задержки распространения, МСИ существенно снижается, так как все переходные процессы от нежелательных сигналов завершаются в пределах защитного интервала. Заметим, что даже при наличии защитного интервала

интерференция между несущими сохраняется. Так как введение защитного интервала снижает пропускную способность системы, то обычно на практике его длительность не превышает одной четверти от длительности символа.

Структурная схема модулятора *OFDM* показана на рисунке 3.23.

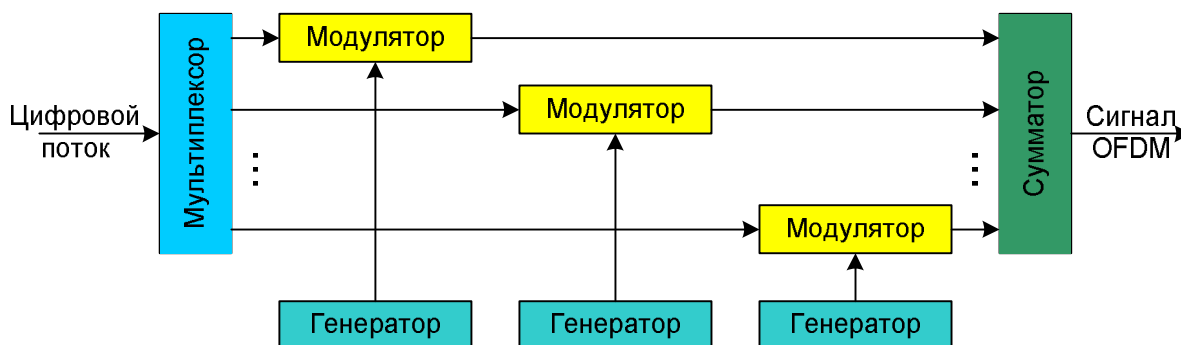


Рисунок 3.23 — Формирование сигнала *OFDM*

Для формирования каждой из используемых несущих частот необходим свой задающий генератор. Так может осуществляться способ модуляции *OFDM* при небольшом количестве несущих, однако применительно к передаче цифрового ТВ сигнала количество несущих частот на выходе модулятора может составлять несколько тысяч, поэтому при построении модулятора было найдено оригинальное решение, позволившее избежать изготовления такой многоканальной системы передачи. Дело в том, что каждая несущая ответственна за соответствующую часть общего спектра сигнала на выходе модулятора. В радиотехнике известен прием синтеза сложного сигнала из отдельных гармонических составляющих. Таким приемом является обратное преобразование Фурье. Существуют хорошо отработанные алгоритмы, позволяющие использовать такие преобразования в минимальное время и с минимальными вычислительными затратами.

На рисунке 3.24 показан пример формирования сигнала *OFDM* с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ), которому подвергается входной цифровой поток.

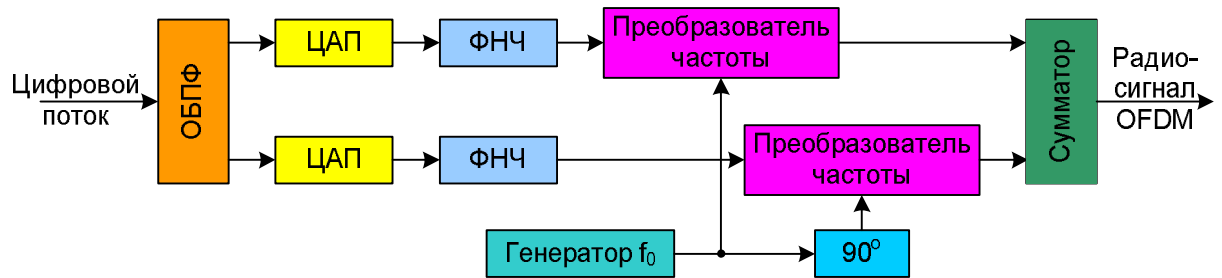


Рисунок 3.24 — Формирование радиосигнала *OFDM* с помощью обратного быстрого преобразования Фурье

После ОБПФ обе части вычисленного преобразования, вещественная и мнимая, переводятся в аналоговую форму, проходя ЦАП и ФНЧ для удаления высокочастотных продуктов, затем поступают в преобразователь частоты, где умножаются соответственно на основной и квадратурный сигналы — гармоническое колебание частоты f_0 . Это позволяет после сумматора получить спектр сигнала *OFDM*, смещенный на частоту f_0 . Такая операция соответствует преобразованию частоты, необходимому при формировании радиосигнала для выбранного канала вещания.

Следует отметить, что данный способ модуляции имеет еще один «резерв» повышения помехоустойчивости. В процессе формирования передаваемого сигнала, содержащего несколько несущих, может оказаться так, что следующие друг за другом последовательно во времени символы модулируют соседние по частоте несущие. Это обстоятельство неблагоприятно влияет на устойчивость такой системы передачи к помехам, поражающим сразу определенный диапазон частот (см. рисунок 3.25).

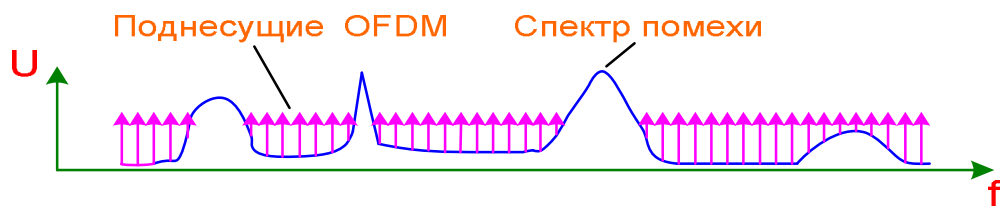


Рисунок 3.25 — Воздействие помех при передаче сигнала *OFDM*

Один из вариантов способа модуляции *OFDM*, известный под названием *COFDM* (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex*), предполагает «перемешивание» передаваемых символов во времени таким образом, что следующие друг за другом символы полезной информации на передающей стороне модулируют те несущие, номера которых предписываются специальной заранее определенной последовательностью. Эта последовательность точно выдерживается на передающей стороне и, в обратном порядке — в приемном устройстве. Такая мера позволяет сделать данный способ передачи информации практически нечувствительным к различного рода замираниям, а также помехам, исключаящим на короткое время возможность использования какого-либо участка диапазона частот.

Особенностью модуляции *OFDM* является повышенная неравномерность уровня мощности группового модулированного сигнала. На рисунке 3.26 показан результат суммирования пяти немодулированных несущих различных частот.

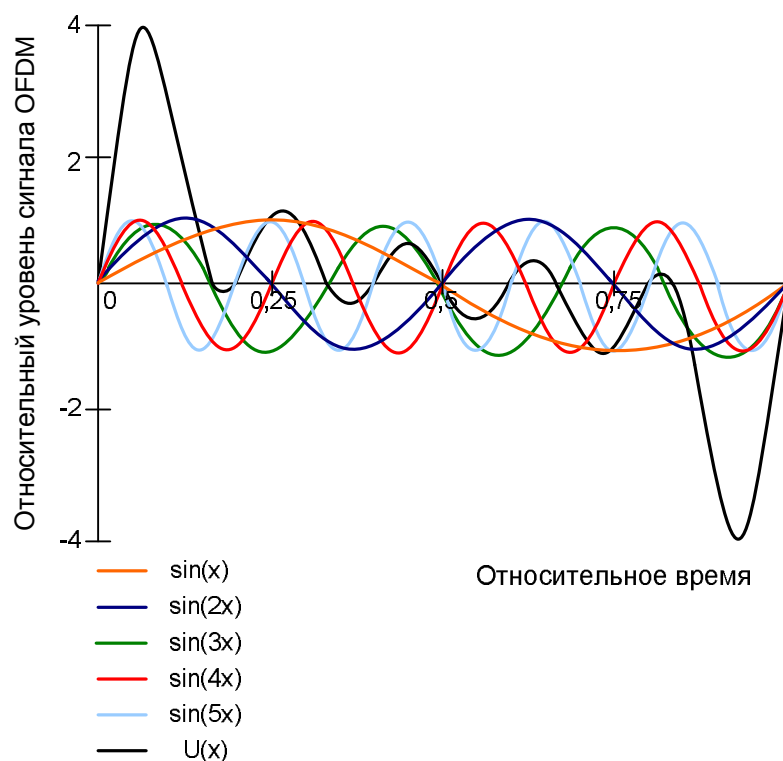


Рисунок 3.26 — Сумма несущих *OFDM*

Суммарный сигнал имеет сильную неравномерность амплитуды. Отношение пиковой к средней мощности в каждом субканале системы

OFDM также как и для систем с одиночной несущей зависит только от вида сигнального созвездия и коэффициента скругления спектра α .

Теоретически различие в значениях отношений пиковой мощности к средней для полного спектра системы *COFDM* и системы с одиночной несущей составляет

$$\Delta(P_M/P_0)=10 \lg N,$$

где N — число несущих.

При $N = 1000$ разница должна составить 30 дБ.

Однако практически за счет рандомизации данных скремблированием и других преобразований структуры потока теоретическое значение может быть достигнуто в очень редких случаях, в частности, при больших размерах сигнального созвездия. Так как скремблированный сигнал *OFDM* может рассматриваться как последовательность независимых одинаково распределенных несущих, то согласно центральной предельной теореме теории вероятностей при большом числе несущих (N больше 20) их распределение приближается к гауссовскому. При этом вероятность того, что превышение пиковой мощности над средней мощностью составит 9,6 дБ, равна 0,1%, а что превышение составит 12 дБ — менее 0,01%.

4. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И СТРУКТУРА ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ НАЗЕМНОГО ТВ ВЕЩАНИЯ

4.1 Стандарт цифрового телевизионного вещания *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 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* в 1994 году выработаны основные положения стандарта *DVB-C* (*C* — *Cable* — кабель) для кабельного телевизионного вещания и стандарта *DVB-S* (*S* — *Satellite* — спутник) для спутникового телевизионного вещания.

Работа над стандартом наземного (то есть обычного, эфирного) телевизионного вещания *DVB-T* (*Terrestrial1* — наземный) закончена позже, в 1996г., так как в этом виде вещания внедрение цифрового телевидения столкнулось с наиболее серьезными сложностями.

В основе начальных вариантов стандартов *DVB* — стандарт кодирования движущихся изображений и звукового сопровождения *MPEG-2*. В стандартах *DVB* помимо методов кодирования и параметров транспортного потока, 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.

При этом для всех видов ТВ 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. В то же время, каждый вид телевизионного вещания имеет свои особенности.

4.2. Общая характеристика систем цифрового наземного ТВ вещания

В настоящее время разработаны, исследованы и предложены для международной стандартизации и внедрения три системы цифрового наземного ТВ вещания (ЦНТВ): *DVB-T* (Европа) с многочастотной схемой модуляции *OFDM* (частотное распределение ортогональных несущих), *ISDB-T* (Япония) с многочастотной схемой модуляции *BST-OFDM* (частотное распределение ортогональных несущих в сегментах спектра), *ATSC* (США) с одночастотной схемой модуляции *8-VSB* (однополосная АИМ).

Система *DVB-T* была разработана с заложенным свойством существенной гибкости, обеспечиваемым за счет опций выбора широкого набора параметров, с целью адаптации ко всем каналам и режимам работы, включая фиксированный, мобильный и переносной приемы, а также построение одночастотных сетей.

Среди всех систем цифрового наземного ТВ вещания система *DVB-T* развивается наиболее динамично. Система *DVB-T* завоевывает все больше сторонников, поскольку обеспечивает наиболее высокое качество среди всех возможных применений. Успехам семейства систем *DVB-T*, *-S*, *-C* способствует широкая стандартизация всех subsystem и технологий, которые могут найти применение не только сегодня, но и в отдаленной перспективе с учетом прогресса других телекоммуникационных систем и изменения структуры и конъюнктуры рынка. Систему *DVB-T* из-за ее универсальности и

многофункциональности приняли в качестве национального стандарта многие страны мира: Австралия, Бельгия, Великобритания, Венгрия, Германия, Греция, Дания, Индия, Ирландия, Испания, Италия, Литва, Нидерланды, Новая Зеландия, Норвегия, Польша, Португалия, Сингапур, Словакия, Словения, Турция, Украина, Финляндия, Франция, Хорватия, Чехия, Швейцария, Швеция, Россия, Бразилия, Гонконг, Израиль, КНР, Куба, Тайвань, Чили.

Система 8-VSB *ATSC* разработана специально таким образом, чтобы к каждому существующему в США передатчику аналоговой системы *NTSC* можно было подключить дополнительный цифровой передатчик с обеспечением сопоставимых зон охвата вещанием при фиксированном или, возможно, переносном приеме.

Система *ATSC* принята в США, Канаде, Корее, Тайване. Аргентина ранее приняла систему *ATSC* в качестве национального стандарта, но в начале 2000 года заявила о пересмотре данного решения и о выборе в перспективе либо *DVB-T*, либо *ISDB-T*.

Система *ISDB-T* принята в Японии и предлагается для испытаний и стандартизации в других странах. Система *ISDB-T* близка к системе *DVB-T*, но обладает расширенными возможностями передачи служб мультимедиа и по использованию радиоспектра в виде нескольких сегментированных полос частот, для каждой из которых могут быть установлены свои типы модуляции и корректирующего кодирования.

Системы *ATSC*, *DVB-T* и *ISDB-T* в основном различаются уровнем подсистемы адаптации к каналу вещания, в частности, применяемыми в них методами и параметрами цикловой синхронизации, корректирующего кодирования и модуляции, а также алгоритмами кодирования звукового сигнала. Полосы и диапазоны частот радиоканала в базовых вариантах систем совпадают с принятыми для аналогового вещания в странах-разработчиках.

Все системы — *ATSC*, *DVB-T* и *ISDB-T* используют методы мультиплексирования и формирования транспортных пакетов, соответствующих требованиям стандарта *MPEG-2*. Небольшие отличия связаны с выбором набора системных команд и обеспечиваемых функций, которые определяются передачей конкретных данных сервисной информации. Однако эти различия не носят принципиального характера, так как не препятствуют возможности создания единого декодера для всех видов систем. Поток транспортных пакетов перед передачей по каналу подвергается различным преобразованиям и аранжируется в кадры данных, специфические для каждой из систем.

Во всех системах цифрового наземного ТВ вещания используются такие виды борьбы с ошибками, как скремблирование, перемежение, внешнее кодирование Рида-Соломона, внутреннее кодирование сверточным кодом. Различия связаны с выбором параметров указанных преобразований потоков данных.

Еще одно отличие систем ЦНТВ связано с выбранными методами кодирования звука. Система *ATSC* использует систему звукового кодирования *Dolby AC-3*. Системы *DVB-T* и *ISDB-T* используют алгоритм кодирования звука *MPEG-2* уровня II, являющийся составной частью полного набора одноименных международных стандартов. Использование обеих систем звукового кодирования допускается Рекомендацией ВТ.1299 МСЭ-Р.

Управление доступом очень важно для надлежащей эксплуатации систем цифрового наземного ТВ вещания, но оно вообще не входит в базовые спецификации систем. Любая система с ограниченным доступом, совместимая с транспортным потоком *MPEG-2*, может использоваться во всех трех системах. В системе *DVB-T* предлагается единый интерфейс для систем с ограниченным доступом.

4.3. Система цифрового наземного ТВ вещания *DVB-T*

4.3.1. Общая характеристика и структура системы *DVB-T*

Система цифрового наземного ТВ вещания *DVB-T* (*Система В* в МСЭР) определяется как функциональный блок оборудования, обеспечивающий адаптацию цифрового ТВ сигнала, представленного в основной полосе частот на выходе транспортного мультиплексора *MPEG-2*, с характеристиками стандартного наземного радиоканала вещания, имеющего ширину полосы частот 8 МГц.

Система *DVB-T*, как и любая другая система ЦНТВ, должна использовать существующие частотные планы и в течение достаточно длительного переходного периода обеспечивать вещание наряду с действующими аналоговыми ТВ системами (на Украине стандарта *D,K/SECAM*), она должна обладать требуемой помехозащищенностью со стороны аналоговых систем и не должна создавать недопустимых помех для них. Для обеспечения всех необходимых требований по адаптации потока данных к радиоканалу вещания в составе передающего комплекта системы *DVB-T* имеются устройства кодирования для канала, мультиплексирования и модуляции. Структурная схема подсистемы адаптации к каналу наземного вещания показана на рисунке 4.1.

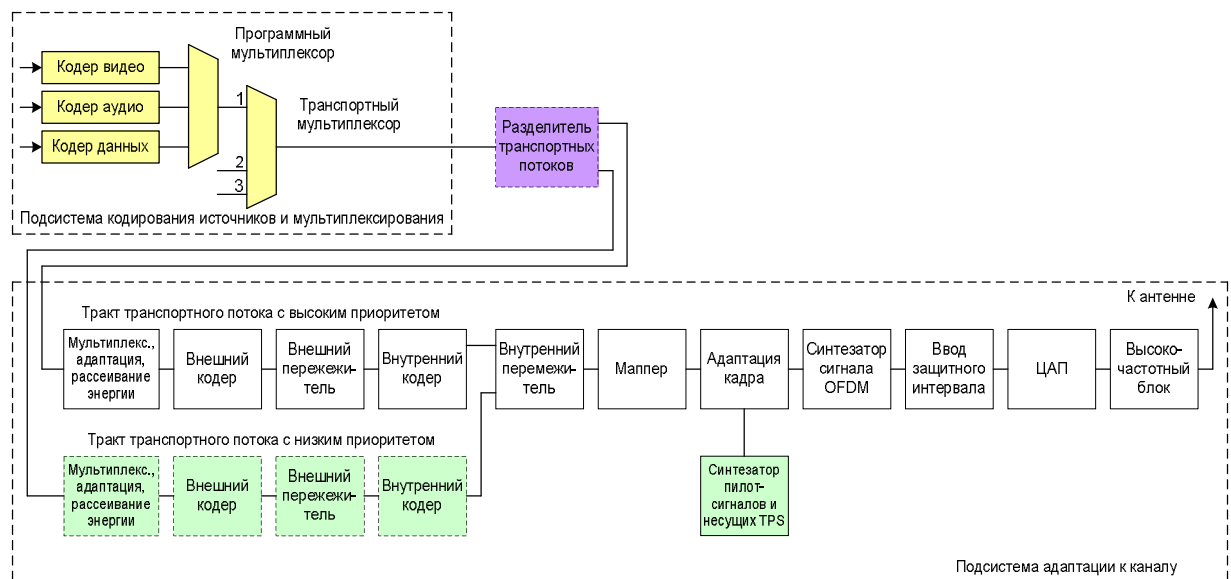


Рисунок 4.1 — Структурная схема передающей части системы *DVB-T*

На том же рисунке упрощенно показана также подсистема кодирования источников информации и их мультиплексирования в транспортный поток.

Выход транспортного мультиплексора является точкой стыка подсистем формирования и передачи транспортных пакетов. Таким образом, входным сигналом тракта адаптации является поток транспортных пакетов фиксированной длины 188 байт, из которых один (первый) байт служит для цикловой синхронизации. Для более равномерного распределения (дисперсии) энергии радиосигнала в полосе канала входной поток подвергается рандомизации (скремблированию). Система *DVB-T* имеет два идентичных по структуре тракта рандомизации и помехоустойчивого кодирования. Такое построение позволяет использовать иерархические методы независимого кодирования двух потоков данных для организации их приоритетного приема в зонах вещания с различной площадью покрытия. Общая часть тракта подсистемы адаптации служит для преобразования потоков данных в комбинации битов, соответствующих модулированным посылкам, ввода сигналов цикловой синхронизации и управления, формирования защитных временных интервалов, преобразования цифровых сигналов в модулированный групповой спектр *COFDM*, переноса его в полосу канала вещания, усиления и излучения в эфир.

Построение подсистемы кодовой защиты в системе *DVB-T* выполнено по традиционному для систем ЦНТВ каскадному принципу. Для защиты от ошибок в демодулируемом сигнале *COFDM* служит внутренний сверточный кодек с набором различных кодовых скоростей и относящийся к нему блок внутреннего перемежения-деперемежения битов. Для исправления пакетов ошибок и дополнительного снижения вероятности ошибки в декодированном сигнале служит внешний кодек Рида-Соломона и внешний перемежитель-деперемежитель байтов транспортного потока.

При разработке подсистемы кодирования для канала в системе *DVB-T* были максимально учтены требования близости структуры и параметров к спутниковой (*DVB-S*) и кабельной (*DVB-C*) системам. Так, схемы внешнего

кодирования и внешнего перемежения являются одинаковыми во всех трех системах *DVB*. Схемы внутреннего кодирования и рандомизации (скремблирования) соответствуют таковым в спутниковой системе *DVB-S*.

4.3.2. Рандомизация данных

Чтобы обеспечить рассеивание энергии и близкую к случайной статистику переходов между битами потока, входной системный поток *MPEG-2* должен быть рандомизирован. Входящий поток битов организован в виде транспортных пакетов фиксированной длины 188 байт, которые со входа системы поступают в блок цикловой синхронизации и рандомизации. Каждый транспортный поток содержит 1 байт слова синхронизации и 187 байтов мультиплексированных данных. Байты данных следуют старшим разрядом вперед. Байт синхронизации не скремблируется, его значение (01000111) инвертируется в каждом восьмом транспортном пакете и служит отметкой цикла из восьми пакетов.

Для рандомизации используется аддитивный 15-разрядный скремблер (аналогичное устройство выполняет также функции дескремблера в приемнике), структурная схема которого показана на рисунке 4.2.

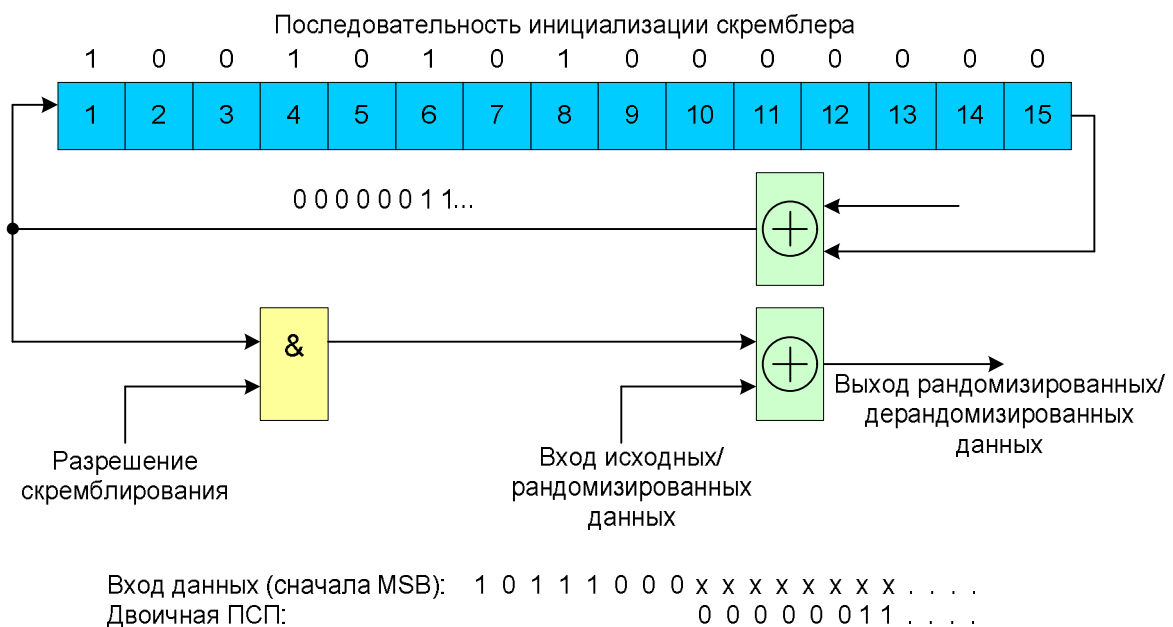


Рисунок 4.2 — Структурная схема 15-разрядного скремблера-дескремблера в системе *DVB-T*

В генераторе псевдослучайной двоичной последовательности скремблера используется генераторный полином вида

$$G(X) = 1 + X^{14} + X^{15}. \quad (4.1)$$

После загрузки в скремблер инициализирующей последовательности генерируется ПСП, которая воздействует на группу из восьми транспортных пакетов. Байты синхронизации последних не скремблируются — в эти моменты выход генератора ПСП блокируется. Для правильной синхронизации дескремблера в приемнике необходима групповая синхронизация: инвертируется первый синхробайт в группе из восьми транспортных пакетов.

4.3.3. Внешнее кодирование и перемежение

Внешнее кодирование поступающих транспортных пакетов в системе DVB-T осуществляется укороченным кодом Рида-Соломона $RS(204, 188, t = 8)$, производимым из оригинального систематического кода $RS(255, 239, t = 8)$. Практически укорачивание кода обеспечивается добавлением на входе кодера $RS(255, 239, t = 8)$ группы из 51 нулевого байта перед информационными байтами транспортного пакета. После кодирования эти нулевые байты отбрасываются, оставляя кодовое слово длиной 204 байта. Кодированию подлежит целиком транспортный пакет длиной 188 байт, включая его синхробайт (как неинвертированный, так и инвертированный). Генераторный полином укороченного кода Рида-Соломона имеет вид

$$g(x) = (x + \lambda^0)(x + \lambda^1)(x + \lambda^2) \dots (x + \lambda^{15}), \quad (4.2)$$

где $\lambda = 02_{HEX}$ — генераторный полином поля

$$p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1. \quad (4.3)$$

После внешнего кодирования производится операция внешнего перемежения в сверточном побайтовом перемежителе структуры Форни с глубиной перемежения $I = 12$, структурная схема которого показана на рисунке 4.3.

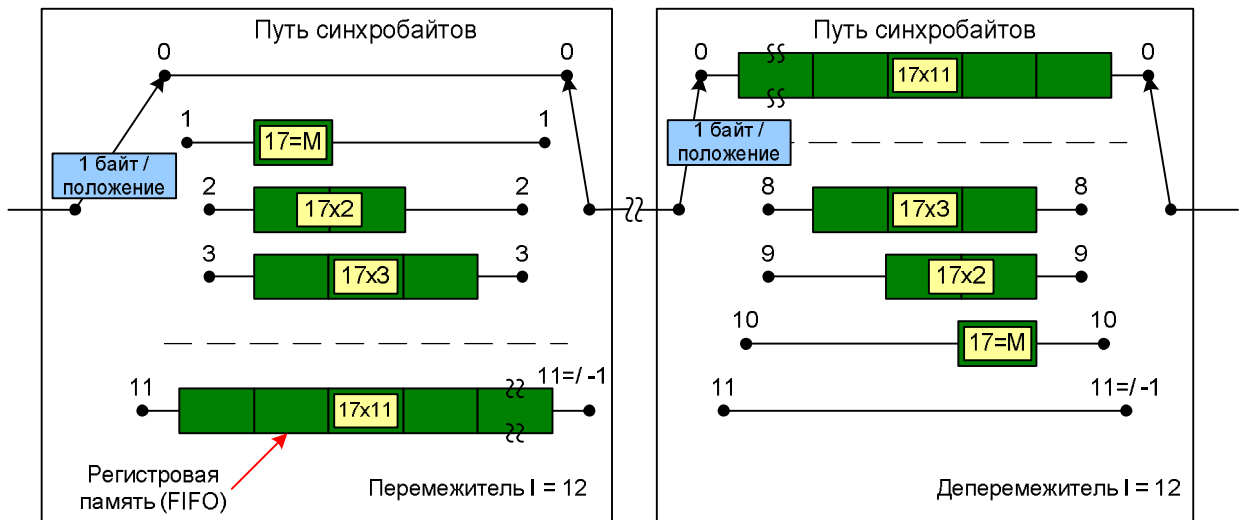


Рисунок 4.3 — Структурная схема устройства для внешнего сверточного перемежения-деперемежения в системе *DVB*

Для деперемежения данных в приемнике используется аналогичная схема. Байты синхронизации пакетов не перемежаются, они все время проходят через перемежитель по ветви с нулевой задержкой, как показано на структурной схеме рисунок 4.3. Задержки в ветвях деперемежителя выбраны таким образом, чтобы во всех положениях 12-позиционного коммутатора суммарная задержка перемежителя-деперемежителя была равна 17×11 байтов.

4.3.4. Внутреннее кодирование

Для внутреннего кодирования в системе *DVB-T* используются выколотые сверточные коды с рядом скоростей от $1/2$ до $7/8$. Все они получаются из исходного кода, имеющего скорость $1/2$ с длиной кодового ограничения $K = 7$, что соответствует 64 состояниям решетчатой диаграммы. Структурная схема сверточного кодера показана на рисунке 4.4. Генераторные полиномы двух его ветвей определяются выражениями (в восьмиричном коде) $G_1 = 171_{\text{Окт}}$ и $G_2 = 133_{\text{Окт}}$.

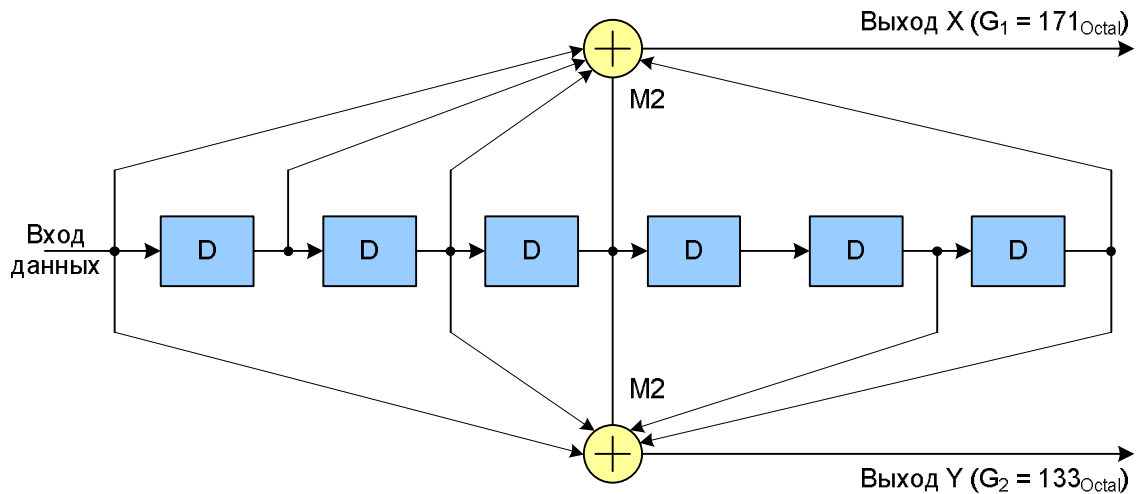


Рисунок 4.4 — Структурная схема внутреннего сверточного кодера в системе *DVB*

Как было отмечено, в системе *DVB-T* имеются два идентичных тракта с внутренними кодерами. При использовании иерархической передачи с двумя уровнями приоритетов в каждом из этих двух каналов кодирования может быть установлена своя собственная кодовая скорость.

Фактически следом за базовым сверточным кодером со скоростью $1/2$, схема которого показана на рисунке 4.4, установлен перфоратор, который производит выкалывание кодированной последовательности, удаляя из нее часть проверочных битов. При этом кодовая скорость возрастает до более высоких значений — $2/3$, $3/4$, $5/6$ и $7/8$.

4.3.5. Внутреннее перемежение

Внутренний перемежитель расположен на входе единого тракта обработки данных, следующего за двумя параллельными подсистемами кодирования. Внутренний перемежитель состоит из перемежителя битов и следующего за ним перемежителя символов. Структура внутреннего перемежителя зависит от выбранных иерархического режима и схемы модуляции. Поэтому приведем для сведения самую сложную структурную схему, которая соответствует передаче двух иерархических потоков и схеме первичной модуляции 64-QAM (для каждой из несущих в группе COFDM).

Схема внутреннего перемежителя показана на рисунке 4.5. На вход схемы поступают два кодированных потока данных $[x_{00}, x_{10}, x_{20}, \dots]$ и $[x_{01}, x_{11}, x_{20}, \dots]$. Входные потоки данных демультиплексируются на v подпотоков, где $v = 2$ для модуляции *QPSK*, $v = 4$ для 16-*QAM* и $v = 6$ для 64-*QAM*. Поток с высоким приоритетом демультиплексируется на два подпотока, а поток с низким приоритетом — на $(v-2)$ подпотоков. Если используется неиерархический режим передачи, то работает только один канал кодирования и на вход перемежителя с выхода внутреннего кодера поступает один поток данных $[x_0, x_1, x_2, \dots]$, который демультиплексируется на v подпотоков.

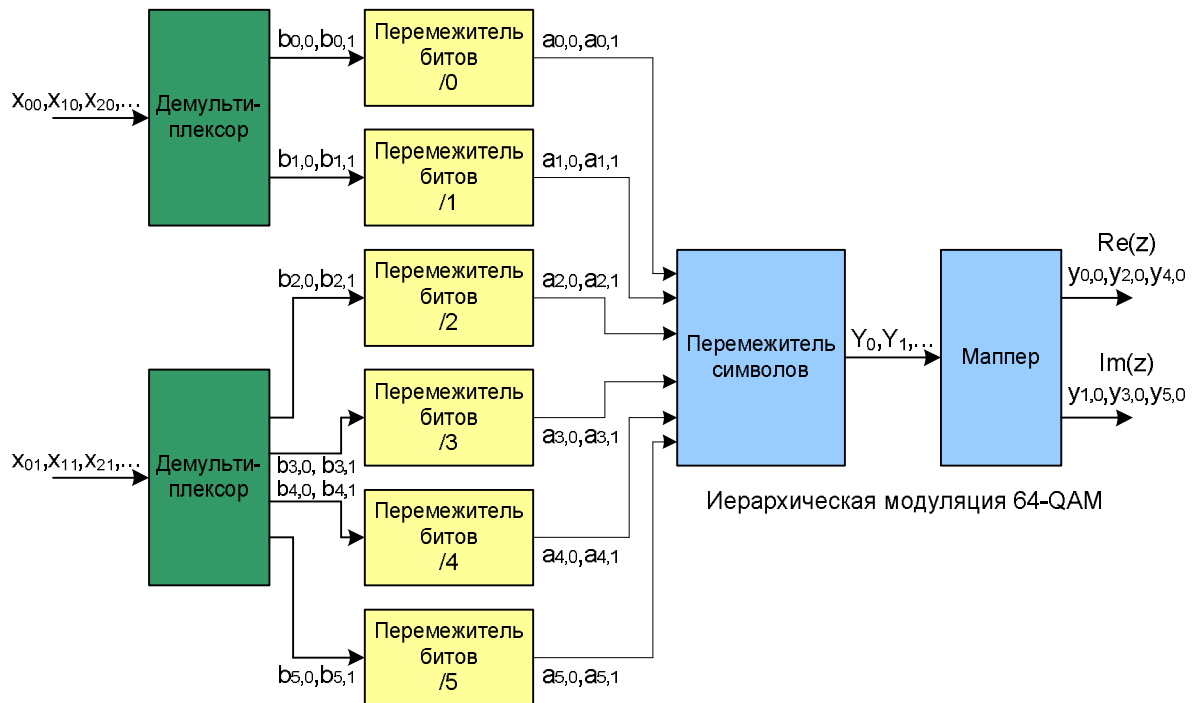


Рисунок 4.5 — Структурная схема внутреннего перемежителя в системе DVB-T

После демультиплексирования каждый из подпотоков обрабатывается отдельным перемежителем битов. При перемежении в зависимости от числа v используется до 6 таких перемежителей, обозначаемых индексами $I_0 \dots I_5$. Перемежители с индексами I_0 и I_1 применяются при *QPSK*, с индексами $I_0 \dots I_3$ — при 16-*QAM*, с индексами $I_0 \dots I_5$ при 64-*QAM*.

Перемежению подвергаются только полезные данные, длина блока каждого из перемежителей постоянна и равна 126 битам, но

последовательности перемежения у всех разные. Процесс перемежения блоков повторяется ровно 12 раз за время одного символа *OFDM* в режиме $2k$ или 48 раз в режиме $8k$.

Выходы перемежителей в каждом такте группируются в один цифровой символ данных (кодovou комбинацию), так что в символе присутствует по одному биту от каждого из v перемежителей. При этом бит с выхода перемежителя с индексом I_0 является самым старшим битом комбинации. Сформированные символы далее подвергаются следующему этапу перемежения (по символам). Это означает, что каждый из символов модулирует по случайной выборке одну из несущих всей группы *OFDM* (1512 несущих в режиме $2k$ или 6048 несущих в режиме $8k$). Перемежение по битам эквивалентно перемежению во времени, тогда как перемежение по символам эквивалентно перемежению по частоте.

4.3.6. Методы модуляции

В системе ЦНТВ *DVB-T* используется передача сигналов по многочастотной схеме модуляции с частотным распределением ортогональных несущих (*OFDM*). Возможен выбор одного из двух режимов вещания: режима $2k$ с общим числом 1705 ортогональных несущих или режима $8k$ с общим числом 6817 ортогональных несущих в одном символе *OFDM*. Каждая из несущих модулируется низкоскоростным цифровым потоком, являющимся частью общего транспортного потока системы, причем в качестве первичных видов модуляции для различных условий регламентируются *QPSK*, *16-QAM* и *64-QAM*.

В зависимости от выбранной схемы передачи в системе *DVB-T* могут формироваться три группы сигнальных созвездий: равномерные для неиерархической передачи (используется *QPSK*, *16-QAM*, *64-QAM*) и неравномерные с двумя возможными коэффициентами неравномерности $\alpha = 2$ и $\alpha = 4$ (используется *16-QAM* и *64-QAM*).

Модулированные узкополосные ортогональные несущие объединяются в пределах полосы канала в группу *COFDM*. При модуляции несущих (при

отображении битовых комбинаций в точки сигнального созвездия) для двух старших разрядов используется преобразование натурального кода в код Грея. В ТВ радиоканале спектр системы *DVB-T* за счет использования схемы модуляции *OFDM* имеет очень хорошую прямоугольность. Полная спектральная плотность мощности модулируемых несущих *OFDM* является суммой спектральных плотностей мощности множества несущих.

Теоретический спектр сигнала *OFDM* для канала с полосой 8 МГц показан на рисунке 4.6.

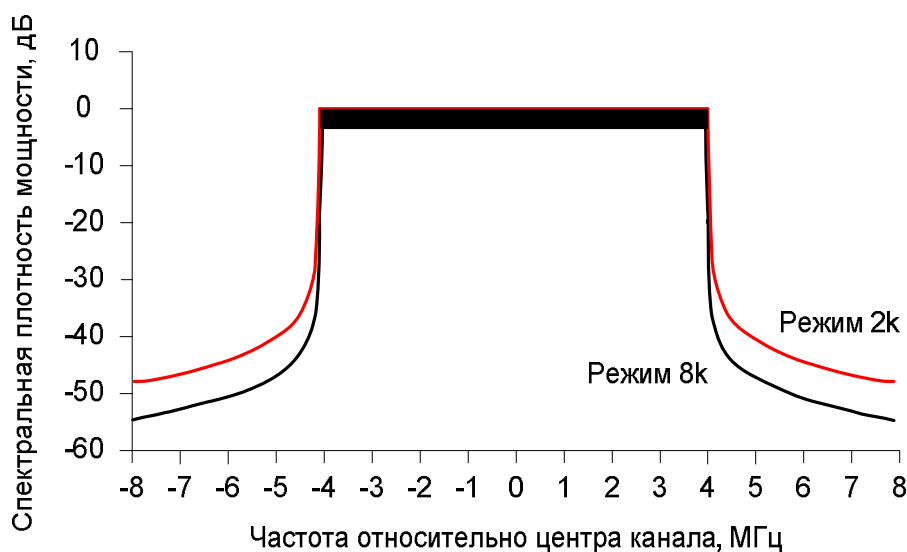


Рисунок 4.6 — Маска спектра системы *DVB-T*

Уровень спектра на частотах вне номинальной полосы радиосигнала 7,61 МГц может быть снижен с помощью применения дополнительной полосовой фильтрации.

4.3.7. Формирование кадра данных

В системе *DVB-T* на выходе тракта внешнего кодирования и перемежения образуется поток кодированных пакетов длиной по 204 байта: 1 байт синхронизации, 187 байтов перемеженных данных транспортных пакетов и 16 байтов внешней кодозащиты. После внутреннего кодирования длина пакета возрастает пропорционально выбранной кодовой скорости сверточного кода. Полученный результирующий поток битов в процессе

модуляции преобразуется в символы сигнала *OFDM*, которые организуются в кадры. Четыре кадра образуют один суперкадр.

Каждый кадр системы *DVB-T* имеет длительность T_F и состоит из 68 символов с номерами от 0 до 67, которые содержат полезные данные и служебную информацию, требующуюся для обеспечения правильного декодирования в приемнике. Каждый символ *OFDM* содержит 6817 несущих в режиме 8k и 1705 несущих в режиме 2k. Число несущих полезных данных является неизменным от символа к символу и за вычетом служебных несущих составляет 6048 несущих в режиме 8k и 1512 несущих в режиме 2k.

Структура кадра данных системы *DVB-T* показана на рисунке 4.7.

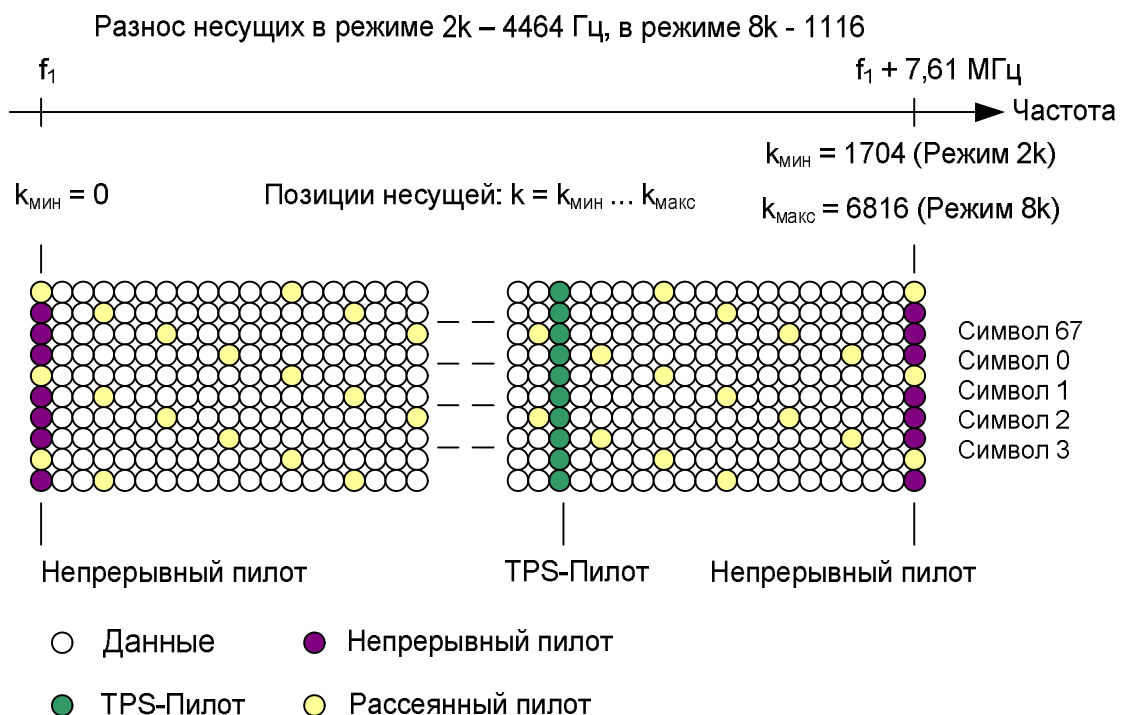


Рисунок 4.7 — Структура кадра данных системы *DVB-T*

Поскольку сигнал OFDM содержит много отдельно модулированных несущих, то каждый символ может быть поделен на ячейки, соответствующие отдельно взятой модулированной несущей в пределах одного символа. Передаваемая в пределах кадра служебная информация содержит:

— ячейки рассредоточенных пилот-сигналов;

- несущие с непрерывно повторяющимися пилот-сигналами;
- несущие сигнализации о параметрах передачи (*TPS*).

Перечисленные пилот-сигналы используются для кадровой синхронизации, частотной синхронизации, временной синхронизации, оценивания канала, идентификации режима передачи, компенсации фазового шума и пр. С помощью рассредоточенных и непрерывно повторяющихся пилот-сигналов в некоторых служебных ячейках кадра передается опорная информация, параметры которой априорно известны в приемнике. Несущие пилот-сигналов передаются с добавочной мощностью в соотношении 16/9 относительно мощности несущих полезных данных. Каждый непрерывно повторяющийся пилот-сигнал совпадает с рассосредоточенными пилот-сигналами в каждом четвертом символе.

Численные значения основных параметров кадра *OFDM* в системе *DVB-T* приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1— Параметры кадра *DVB-T*

Параметр	Значение для режима	
	8k	2k
Число несущих в символе <i>OFDM</i>	6817	1705
Число несущих полезных данных в символе <i>OFDM</i>	6048	1512
Число рассосредоточенных пилот-сигналов в кадре <i>OFDM</i>	524	131
Число непрерывно повторяющихся пилот-сигналов в кадре <i>OFDM</i>	177	45
Число несущих сигнализации о параметрах передачи в кадре <i>OFDM</i>	68	17
Длительность полезной части символа <i>OFDM</i> , мкс	896	224
Разнос соседних несущих, Гц	1116	4464
Разнос между крайними несущими в символе <i>OFDM</i> , МГц	7,608258	7,611607

4.3.8. Сигнализация о параметрах передачи

Несущие сигнализации о параметрах передачи (*TPS*) переносят информацию о параметрах, связанных со схемой передачи:

- вид первичной модуляции, включая значение коэффициента неравномерности созвездия *QAM*;
- информацию об уровнях иерархии и приоритетах передаваемых программ;
- значение защитного интервала (требуется при реконфигурировании приемника);
- значения скоростей внутреннего кодирования;
- режим передачи (*2k* или *8k*);
- номер кадра в суперкадре.

Сигнализация о параметрах передачи передается параллельно на 17-*TPS* несущих в режиме *2k* и на 68-*TPS* несущих в режиме *8k*. В каждом символе *OFDM* передается одна несущая *TPS* и один бит *TPS*; в каждом кадре *OFDM* передаются 68 бит *TPS*, распределенных следующим образом:

- 1 бит инициализации;
- 16 бит синхронизации;
- 37 бит информации;
- 14 бит кодовой защиты.

При неполном использовании всех 37 бит информации оставшаяся часть должна быть установлена в значение 0.

4.3.9. Защитные интервалы

Символ *OFDM* состоит из двух частей: полезной части и защитного интервала. Защитный интервал предшествует полезной части и является циклическим префиксом адекватной по длительности последней части символа.

Согласно Стандарту *EN 300 744* в каждом из двух режимов системы *DVB-T* могут быть использованы четыре значения относительных защитных интервалов, приведенные в таблице 4.2.

Таблица 4.2 — Значения защитных интервалов в системе *DVB-T*

Параметр	Значение интервалов длительности фрагментов символа <i>OFDM</i> в режимах							
	<i>8k</i>				<i>2k</i>			
Относительный защитный интервал T_G/T_U	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Длительность полезной части символа T_U , мкс	896				224			
Длительность защитного интервала T_G , мкс	224	112	56	28	56	28	14	7
Длительность символа $T_S = T_G + T_U$, мкс	1120	1008	952	924	280	252	238	231

4.4. Система цифрового наземного ТВ вещания *ISDB-T*

4.4.1. Общая характеристика системы *ISDB-T*

Система цифрового наземного ТВ вещания *ISDB-T* разработана в трех вариантах применительно к существующим стандартным каналам наземного ТВ вещания с номинальной полосой частот 6, 7 или 8 МГц. Она включена под условным обозначением *Система С* в существующую Рекомендацию МСЭ-Р ВТ.1306 по методам модуляции сигналов в цифровом наземном ТВ вещании.

В системе *ISDB-T* применяется модифицированная схема многочастотной модуляции с ортогональным частотным распределением мультимплекса (*OFDM*), допускающая передачу цифрового потока в нескольких полосах частот (*OFDM* сегментах) и называемая *BST-OFDM* (частотно-сегментированная передача по схеме *OFDM*). В качестве методов

первичной модуляции несущих возможны *DQPSK*, *QPSK*, *16-QAM* и *64-QAM*. В системе заложены два режима приема: полномерный широкополосный (несколько базовых сегментов используются преимущественно для вещания ТВ программ и/или большого объема данных) и частичный узкополосный (один базовый сегмент для вещания звуковых программ и адекватных потоков данных).

Частичный прием в системе *ISDB-T* является ее оригинальным свойством, отличающим от других систем ЦНТВ. Он предполагает использование упрощенного узкополосного приемника, рассчитанного на прием в полосе только одного сегмента *OFDM*. Такой приемник может использоваться в носимом варианте для приема звуковых программ и/или телематической информации. Стоит заметить, что при частичном приеме абонент получает часть общего транспортного потока, рассосредоточенного по полному числу сегментов. Таким образом, узкополосный приемник может принимать ряд служб из отдельно передаваемого сегмента или из центрального сегмента группы, а широкополосный приемник может принимать все службы из сегментов, входящих в допустимую полосу системы.

В зависимости от требуемых условий приема система может работать в следующих трех режимах:

- режим 1 — для приема сигналов подвижными приемниками;
- режим 2 — для приема сигналов как подвижными, так и стационарными приемниками;
- режим 3 — для фиксированных служб, использующих одночастотные сети.

Некоторые устройства в системе *ISDB-T* аналогичны по структуре и параметрам соответствующим устройствам в системе *DVB-T*, что способствует определенной гармонизации обеих систем, особенно приемников-декодеров. К числу таких устройств относятся внешний кодер Рида-Соломона, скремблеры, перемежители и внутренние сверточные

кодеры. Поэтому ниже будут описаны устройства, присущие только системе *ISDB-T*.

4.4.2. Методы мультиплексирования и формирования кадра данных

В системе *ISDB-T* подлежащие передаче транспортные потоки, сформированные в соответствии с требованиями стандарта *MPEG-2*, сначала подвергаются ремultipлексированию, т.е. преобразуются в группы данных, называемые сегментами данных. Каждый из них кодируется корректирующим кодом, после чего преобразуется в модулированный *OFDM*-сегмент, к которому добавляются пилот-несущие *TMCC* (служебные сигналы о схеме мультиплексирования и модуляции и служащие для правильной демодуляции и управления конфигурацией декодирования). Параметры корректирующего кода, глубина временного перемежения, тип первичной модуляции несущих и длина защитного интервала выбираются для каждого сегмента. Для передачи какой-либо службы с большим объемом данных отводится необходимое число сегментов. Такая компоновка спектра и параметров передачи позволяет легко адаптировать систему к различным каналам и видам обслуживания. В системе предусматривается три уровня иерархического приема. Все это вместе взятое допускает отвести часть полосы, например, для приема ТВ программ на стационарные приемники, а оставшуюся часть полосы — для приема звуковых сигналов и данных на мобильные и носимые приемники.

Для получения режима передачи по схеме *BST-OFDM* с различными иерархическими уровнями определяется кадр мультиплекса. В нем транспортный поток — это непрерывный поток транспортных пакетов, имеющих общую длину 204 байта, из которых 16 байтов являются проверочными байтами кода Рида-Соломона, или нулевыми байтами. Длительность кадра мультиплекса подстраивается под длительность кадра *OFDM* путем подсчета числа пакетов с использованием тактовой частоты в 4 раза более высокой, чем частота отсчетов БПФ. Конкретное число

транспортных пакетов в одном кадре *OFDM* зависит от вида модуляции и скорости сверточного кода, то есть числа значащих позиций в пространстве сигнала (см. данные, приведенные в таблице 4.3).

Таблица 4.3 — Число транспортных пакетов в кадре *BST-OFDM*

Вид модуляции несущей	Скорость сверточного кода	Число транспортных пакетов, передаваемых в одном кадре (режимы 1/2/3)
<i>DQPSK</i> <i>QPSK</i>	1/2	12 / 24 / 48
	2/3	16 / 32 / 64
	3/4	18 / 36 / 72
	5/6	20 / 40 / 80
	7/8	21 / 42 / 84
16-QAM	1/2	24 / 48 / 96
	2/3	32 / 64 / 128
	3/4	36 / 72 / 144
	5/6	40 / 80 / 160
	7/8	42 / 84 / 168
64-QAM	1/2	36 / 72 / 144
	2/3	48 / 96 / 192
	3/4	54 / 108 / 216
	5/6	60 / 120 / 240
	7/8	63 / 126 / 252

4.4.3. Методы кодирования для канала

Структурная схема подсистемы кодирования для канала в системе *ISDB-T* показана на рисунке 4.8.

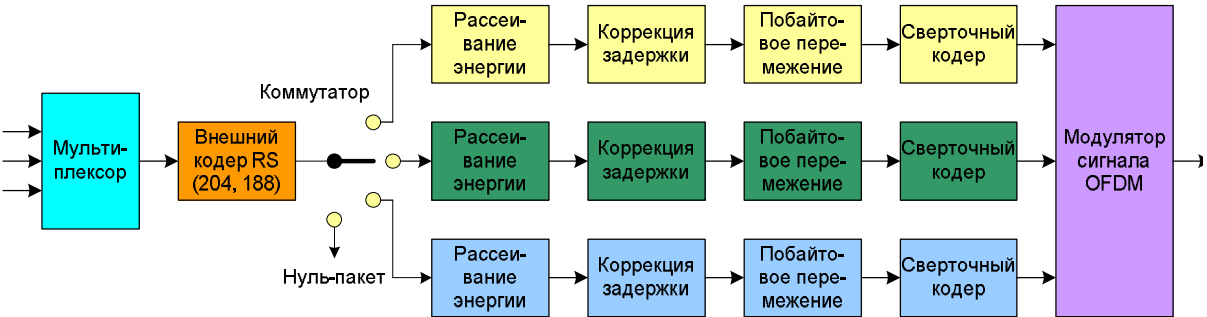


Рисунок 4.8 — Структурная схема подсистемы кодирования для канала в системе *ISDB-T*

Особенность этой подсистемы три отдельных тракта рандомизации и внутреннего кодирования, обеспечивающие необходимую обработку данных для каждого из трех иерархических режимов передачи. Транспортные пакеты с выхода внешнего кодера коммутируются на вход того, либо иного тракта в зависимости от установленного приоритета. Блоки коррекции задержки необходимы для выравнивания различных времен задержки, обусловленных процессами перемежения в трактах с разными приоритетами (видами модуляции и кодовыми скоростями).

4.4.4. Методы модуляции

Сигнал системы *ISDB-T* состоит из 13 базовых сегментов *OFDM*, каждый из которых занимает полосу частот $B/14$ МГц, где B — номинальная полоса частот канала. Таким образом, полная рабочая полоса частот системы *ISDB-T* равна $13 \times B/14$ МГц, то есть примерно равна указанным значениям:

- $428,57 \times 13 \approx 5,57$ МГц для канала вещания 6 МГц;
- $500,0 \times 13 \approx 6,5$ МГц для канала вещания 7 МГц;
- $571,428 \times 13 \approx 7,43$ МГц для канала вещания 8 МГц.

Базовые сегменты спектра для основного канала с полосой 6 МГц могут занимать полосу 5,6 МГц (ТВ программы) и 429 кГц (звуковые программы).

Поскольку для широкого и узкого сегментов спектра используются одни и те же параметры передачи, то сегмент 5,6 МГц может напрямую включать в себя узкополосные сегменты 429 кГц. Это гарантирует, прием узкополосным приемником (429 кГц) ряда служб с полосой 5,6 МГц, а широкополосным приемником (5,6 МГц) всех служб с полосой 429 кГц.

Структурная схема модулятора системы *ISDB-T* показана на рисунке 4.9.

В схеме имеются три тракта перемежения и отображения битов в модулированные символы.

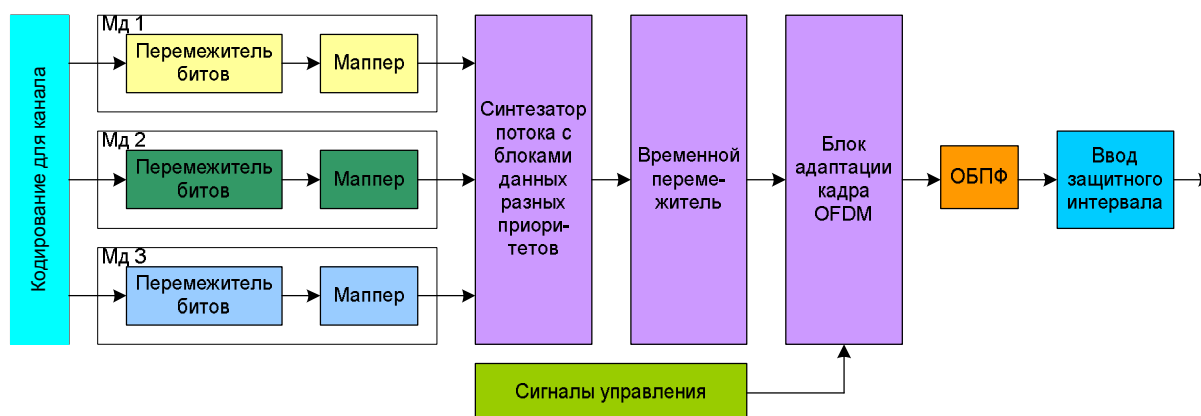


Рисунок 4.9 — Структурная схема модулятора системы *ISDB-T*

В каждом из модуляторов Мд1—Мд3, соответствующих режимам работы с разными приоритетами, имеется по четыре перемежителя и маппера для четырех возможных видов модуляции: *DQPSK*, *QPSK*, *16-QAM*, *64-QAM*. Нужный режим работы обеспечивается коммутацией входных данных и выходных символов (см. рисунок 4.10).

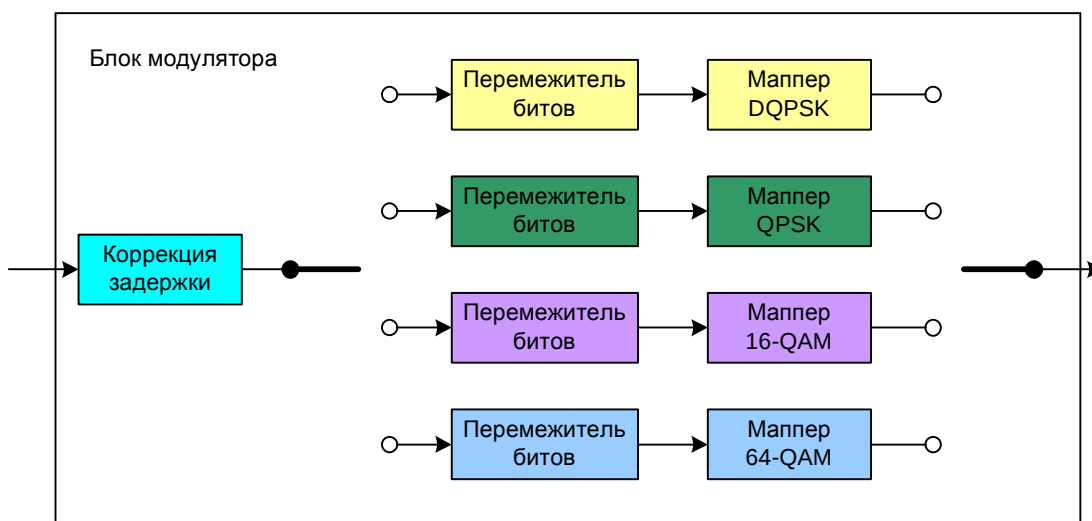


Рисунок 4.10 — Структурная схема модулятора отдельного уровня

Основные параметры передачи модулированных сигналов в системе *ISDB-T* для всех трех режимов вещания в канале с полосой 8 МГц приведены в таблице 4.4. Возможные скорости передачи информации в системе *ISDB-T* в канале с полосой 8 МГц при использовании всех 13 сегментов приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.4 — Параметры передачи в системе *ISDB-T*

Параметр		Режимы		
		1	2	3
Число сегментов (N_s)		13		
Полоса сегмента		8000/14 = 571,428... кГц		
Полоса системы		8000/14 (кГц) N_s + 8000/(14×108)(кГц) = 7,433... МГц	8000/14 (кГц) N_s + 8000/(14×216)(кГц) = 7,431... МГц	8000/14 (кГц) N_s + 8000/(14×108)(кГц) = 7,429... МГц
Число сегментов при дифференциальной модуляции		n_d		
Число сегментов при когерентной модуляции		n_s ($n_s + n_d = N_s$)		
Число несущих в сегменте		108	216	432
Разнос несущих		8000/(14×108) = 5,291 ... кГц	8000/(14×216) = 2,645... кГц	8000/(14×432) = 1,322... кГц
Число несущих в системе	Всего	$108N_s + 1 = 1405$	$216N_s + 1 = 2809$	$432N_s + 1 = 5617$
	Данные	$96N_s = 1248$	$192N_s = 2496$	$384N_s = 4992$
	$SP^{*1)}$	$9n_s$	$18n_s$	$36n_s$
	$CP^{*2)}$	$n_d + 1$	$n_d + 1$	$n_d + 1$
	$TMCC^{*3)}$	$n_s + 5n_d$	$2n_s + 10n_d$	$4n_s + 20n_d$
	$AC1^{*4)}$	$2N_s = 26$	$4N_s = 52$	$8N_s = 104$
	$AC2^{*4)}$	$4n_d$	$9n_d$	$19n_d$
Модуляция несущих		QPSK, 16-QAM, 64-QAM, DQPSK		
Число символов в кадре		204		
Эффективная длительность символа		189 мкс	378 мкс	756 мкс
Защитный интервал		47,5 мкс (1/4), 23,625 (1/8), 11,8125 мкс (1/16), 5,90625 мкс (1/32)	94,5 мкс (1/4), 47,25 мкс (1/8), 23,625 мкс (1/16), 11,8125 мкс (1/32)	189 мкс (1/4), 94,5 мкс (1/8), 47,25 мкс (1/16), 23,625 мкс (1/32)
Длительность кадра		48,195 мс (1/4), 43,3755 мс (1/8), 40,96575 мс (1/16), 39,760875 мс(1/32)	96,39мс(1/4), 86,751мс(1/8), 81,9315мс(1/16), 79,52175 мс (1/32)	192,78мс(1/4), 173,502 мс (1/8), 163,863 мс (1/16), 159,0435 мс (1/32)
Внутренний код		Сверточный код (1/2; 2/3; 3/4; 5/6; 7/8)		
Внешний код		RS (204,188)		
Примечания:				
*1): SP — рассеянный пилот-сигнал;				
*2): CP — регулярный пилот-сигнал;				
*3): $TMCC$ — несущие сигналов управления конфигурацией передачи и мультиплексированием;				
*4): AC — вспомогательный канал передачи информации для сетевых операций.				

Таблица 4.5 — Скорости передачи информации в системе *ISDB-T*

Модуляция несущих	Скорость сверточного кода	Число передаваемых транспортных пакетов ^{*2)} (режимы 1/2/3)	Скорость передачи информации при 13 сегментах (Мбит/с) ^{*1)} при относительном защитном материале			
			1/4	1/8	1/16	1/32
<i>DQPSK, QPSK</i>	1/2	156/312/624	4,868	5,409	5,727	5,900
	2/3	208/216/832	6,490	7,212	7,636	7,867
	3/4	234/468/936	7,302	8,113	8,590	8,851
	5/6	260/520/1040	8,113	9,015	9,545	9,834
	7/8	273 /546/1092	8,519	9,465	10,022	10,326
<i>16-QAM</i>	1/2	312/624/1248	9,736	10,818	11,454	11,801
	2/3	416/832/1664	12,981	14,424	15,272	15,735
	3/4	468/936/1872	14,604	16,227	17,181	17,702
	5/6	520/1040/2080	16,227	18,030	19,091	19,669
	7/8	546/1092/2184	17,038	18,931	20,045	20,653
<i>64-QAM</i>	1/2	468/936/1872	14,604	16,227	17,181	17,702
	2/3	624/1248/2496	19,472	21,636	22,909	23,603
	3/4	702/1404/2808	21,907	24,341	25,772	26,553
	5/6	780/1560/3120	24,341	27,045	28,636	29,504
	7/8	819/1638/3276	25,558	28,397	30,068	30,979
Примечания: ^{*1)} — в случае иерархической передачи скорость передачи информации может быть вычислена суммированием скоростей передачи информации отдельных сегментов; ^{*2)} — пакет транспортного потока, содержащий 188 байтов и определяющийся стандартом <i>MPEG-2 Systems</i> .						

4.5. Система цифрового наземного ТВ вещания *8-VSB ATSC*

4.5.1. Структура системы *8-VSB ATSC*

Структурная схема системы *8-VSB ATSC* (*Система А* по МСЭ-Р) в виде эталонной модели своих основных подсистем показана на рисунке 4.11. В подсистеме кодирования источников информации используется набор частот, основанный на эталонной частоте 27 МГц. Эта частота используется для получения цифровых отсчетов частоты длиной 42 бита, из которых первые 33 бита называются *базовыми эталонными метками времени программы*, а оставшиеся 9 бит — *расширенными эталонными метками времени*. Последние эквивалентны отсчетам частоты 90 кГц, подстраиваемой по сигналу частоты 27 МГц, и используются в аудио- и видеокодерах при формировании меток времени отображения и декодирования. Из сигнала с

частотой 27 МГц синтезируются необходимые частоты дискретизации видеоинформации (f_v) и аудиоинформации (f_a).

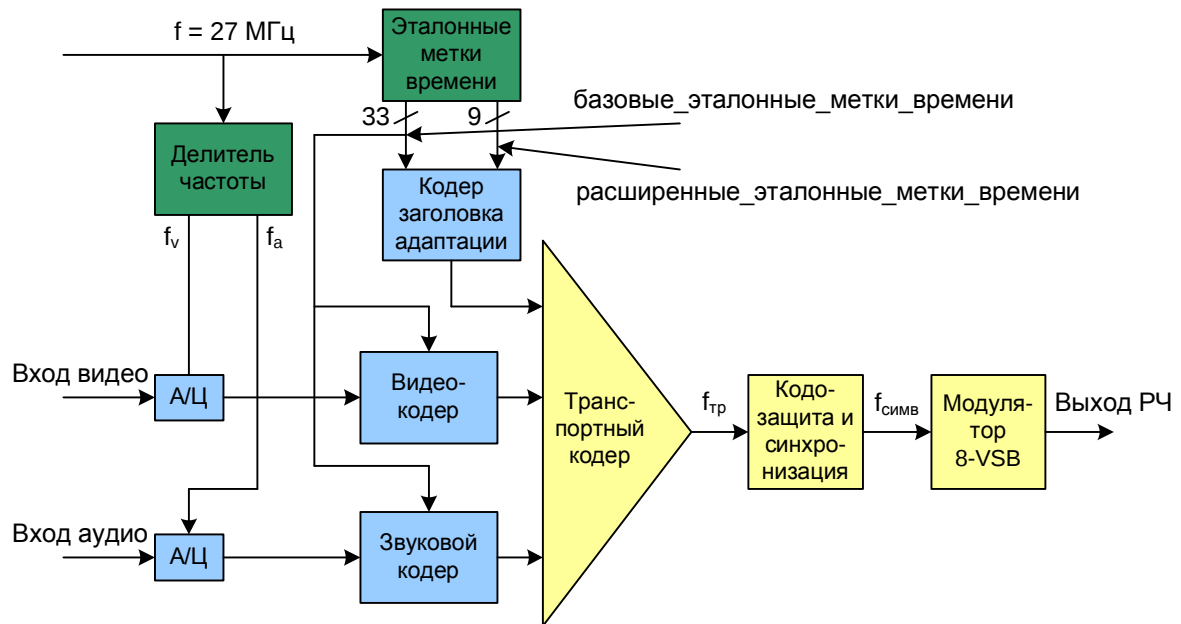


Рисунок 4.11 — Общая структура системы 8-VSB ATSC

Транспортный кодер фактически выполняет роль мультиплексора системы 8-VSB ATSC, объединяющего кодированные потоки источников информации и сервисной информации. На его выходе действует поток транспортных пакетов с частотой $f_{тр}$. К выходу транспортного кодера подключены устройства цикловой синхронизации, кодовой защиты и однополосной модуляции, которые входят в состав подсистемы адаптации к каналу.

В подсистеме адаптации к наземному каналу вещания, структурная схема которой показана на рисунке 4.12, осуществляется кодирование с прямым исправлением ошибок, для чего в транспортный поток вводятся избыточные символы кода Рида-Соломона, сигналы цикловой синхронизации и далее производится сверточное решетчатое кодирование сформированного группового сигнала и формирование модулированного сигнала 8-VSB. Подсистема кодирования-модуляции имеет две частоты: частоту передачи транспортного потока $f_{тр}$ и частоту передачи символов $f_{симв}$ модулированного сигнала 8-VSB.

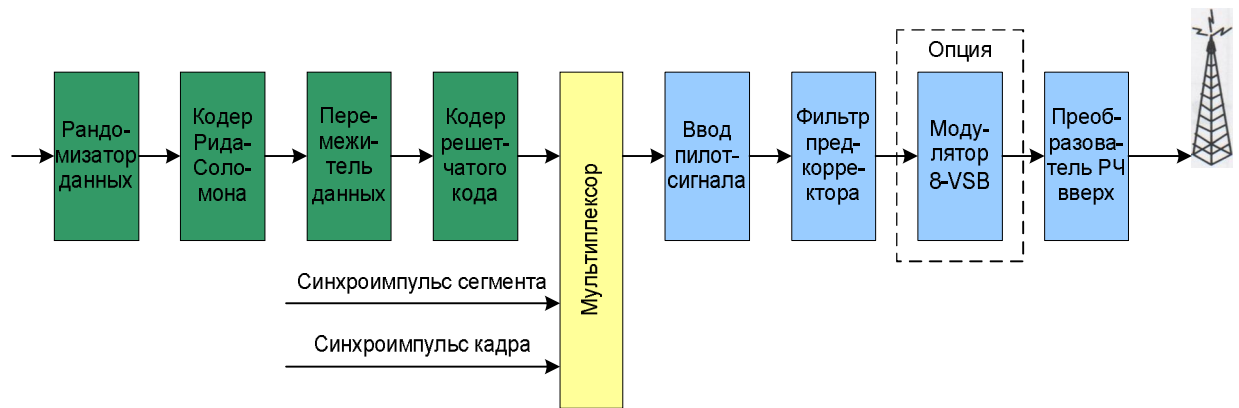


Рисунок 4.12 — Структурная схема подсистемы адаптации к каналу системы 8-VSB ATSC

Эти две частоты должны быть взаимно синхронизированы, исходя из следующего соотношения:

$$f_{\text{TP}} = 2 \left(\frac{188}{208} \right) \left(\frac{312}{313} \right) f_{\text{симв}}. \quad (4.4)$$

Частоты в подсистемах кодирования источников и формирования передаваемого сигнала могут быть асинхронны. В этом случае частотные сдвиги устраняются вводом в транспортный поток специальных пустых пакетов (ноль-пакетов).

4.5.2. Формирование кадра данных системы 8-VSB ATSC

В системе 8-VSB ATSC каждый кадр данных состоит из двух полей данных, каждое из которых содержит 313 сегментов (см. на рисунок 4.13).

Первый сегмент данных каждого поля является сигналом синхронизации и включает настроенную последовательность, используемую корректором в приемнике.

Остальные 312 сегментов переносят подвергнутые перемежению данные нескольких транспортных пакетов и соответствующих избыточных данных для прямого исправления ошибок. Каждый сегмент данных состоит из 832 символов. Первые 4 символа передаются в двоичном коде и обеспечивают синхронизацию сегмента и транспортного пакета (1 байт из 188 байтов).

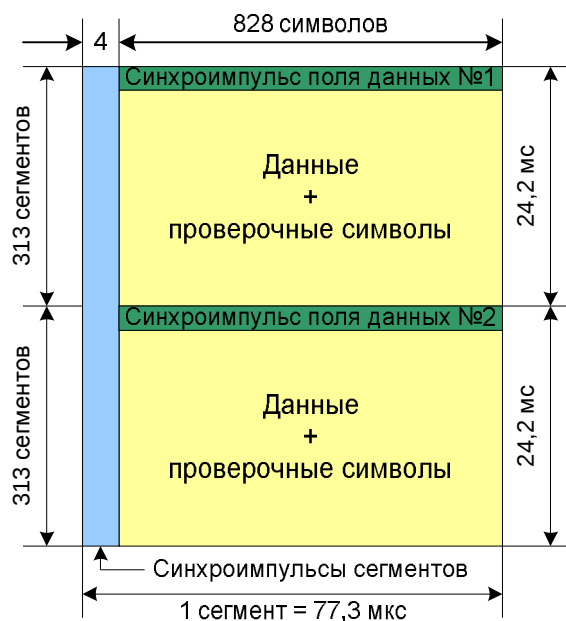


Рисунок 4.13 — Структура кадра данных системы 8-VSB ATSC

Оставшиеся 828 символов каждого сегмента данных по объему эквивалентны 187 байтам транспортного пакета плюс 20 проверочным байтам *RS*-кода (всего 1656 бит) плюс 828 проверочных битов сверточного кода со скоростью 2/3. Эти 828 символов сегмента передаются как сигналы с 8 уровнями и поэтому переносят три бита на символ. Таким образом, в каждом сегменте данных переносятся $828 \times 3 = 2484$ бита данных виртуального защищенного транспортного пакета.

4.5.3. Перемежение и кодирование для канала в системе 8-VSB ATSC

В системе 8-VSB ATSC процессы рандомизации и прямого исправления ошибок не применяются к синхробайту транспортного пакета, который при передаче представлен сигналом синхронизации сегмента данных. Используется межсегментный сверточный побайтовый перемежитель, захватывающий 52 сегмента данных. Перемежение обеспечивается на глубину около 1/6 относительно поля данных (4 мс). Перемежению подвергаются только байты данных. Перемежитель должен быть синхронизирован с первым байтом данных поля данных. Для получения

большого выигрыша от решетчатого кодирования производится также внутрисегментное перемежение. Структура сверточного перемежителя показана на рисунке 4.14.

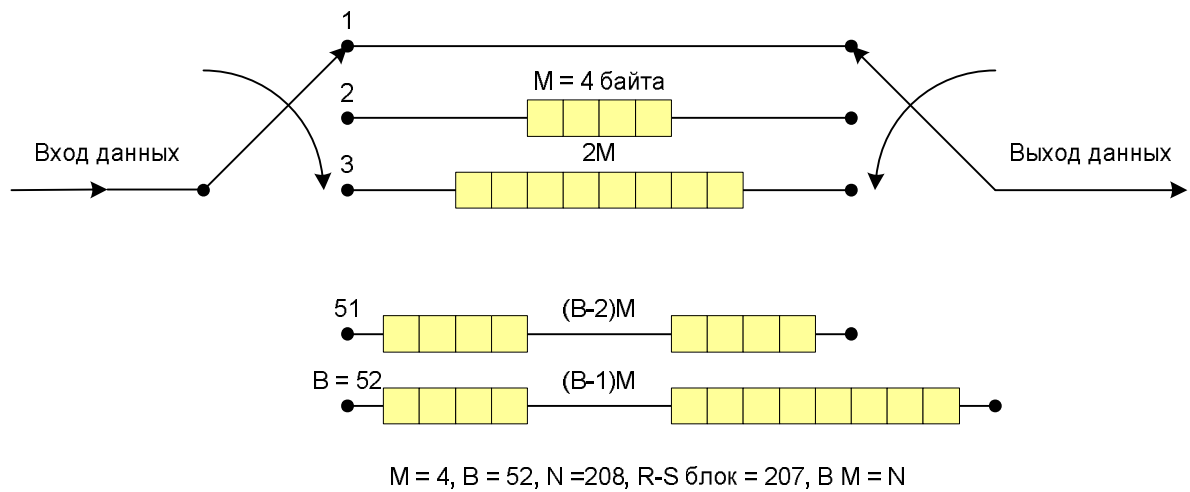


Рисунок 4.14 — Структура перемежителя в системе *ATSC*

В качестве внешнего кода в системе *ATSC* используется код Рида-Соломона *RS* (207, 187, $t = \lambda_0$). Размер блока информационных данных *RS*-кода — 187 байтов, к которым для исправления ошибок добавляются 20 проверочных байтов. Общий размер кодированного *RS*-блока, передающегося в сегменте данных, составляет 207 байтов, причем 20 проверочных байтов передаются в конце сегмента.

В качестве внутреннего кода в системе *8-VSB* используется формирование решетчатой сигнально-кодовой конструкции на основе сверточного кода со скоростью $R = 2/3$. Структурная схема данного формирователя, объединяющего сверточный кодер и маппер 8-уровневых символов, показана на рисунке 4.15.

Один из двух параллельных битов, поступающих в кодер, кодируется в два выходных бита при помощи сверточного кодера со скоростью $R = 1/2$, другой входной бит в кодере не изменяется. Однако до ввода в кодер он подвергается предварительному относительному кодированию. Сформированные таким образом триады битов управляют маппером, который отображает входной код из 3 битов в квантованное колебание с 8

разрешенными уровнями, имеющее одномерное созвездие. Таблица отображения бит/символ показана в блоке маппера на рисунке 4.15. После амплитудной модуляции и частичного подавления нижней боковой полосы образуется радиосигнал, называемый 8-VSB.

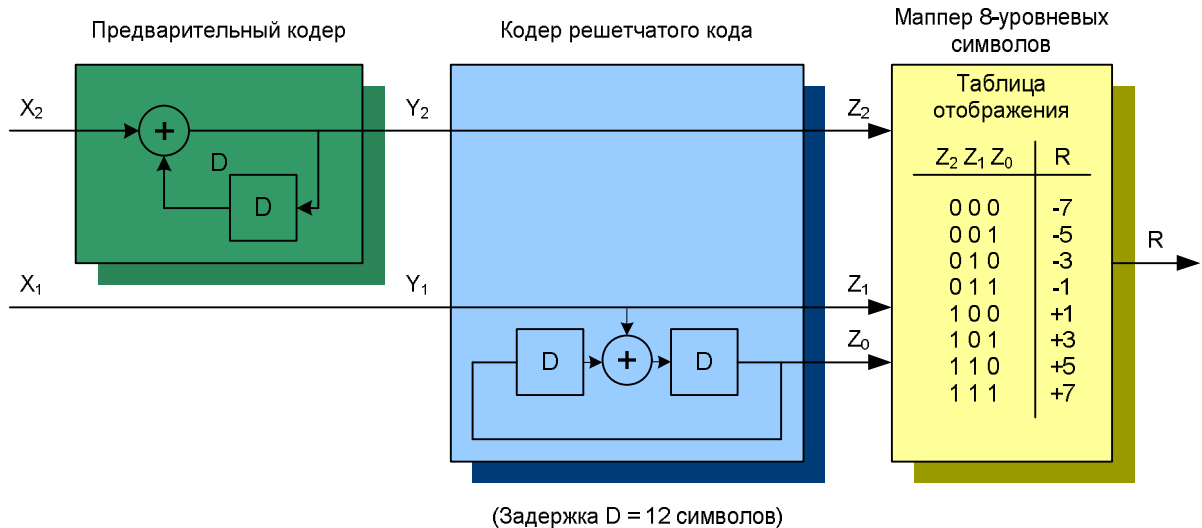


Рисунок 4.15 — Кодер решетчатого кода — маппер символов

Для повышения помехоустойчивости в кодирующем устройстве применяется внутрисегментное перемежение. Для этого используют 12 идентичных решетчатых кодеров и предкодеров, обрабатывающих разделенные во времени (чередующиеся) символы данных. Перемежение символов кода осуществляется кодированием символов (0, 12, 24, 36, ...) в одной группе, символов (1, 13, 25, 37, ...) во второй группе, символов (2, 14, 26, 38, ...) в третьей и так далее в цикле из 12 групп.

4.5.4. Модуляция в системе 8-VSB ATSC

В системе 8-VSB ATSC используется 8-уровневая амплитудная модуляция с частично подавленной нижней боковой полосой (8-VSB).

Диаграмма уровней модулирующего сигнала показана на рисунке 4.16. Для согласования этого сигнала с полосой канала 6 МГц используется сглаживание спектра и оптимальная фильтрация в приемнике. Формирование спектра разделено между передатчиком и приемником в стандартном

соотношении как корень из полной передаточной характеристики на каждой из сторон.



Рисунок 4.16 — Диаграмма уровней модулирующего сигнала в системе *ATSC*

Номинальная характеристика полосового системного спектра с косинус-квадратичными срезами, имеющими коэффициент скругления $\alpha = 0,1152$, показана на рисунке 4.17.

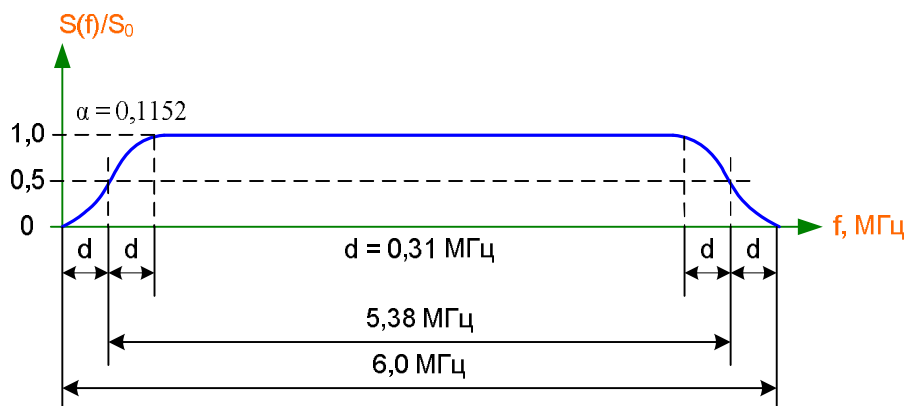


Рисунок 4.17 — Номинальный спектр системы 8-VSB *ATSC* для канала с полосой 6 МГц

С учетом оптимальной фильтрации спектр вещаемого сигнала реально имеет косинусное скругление; соответствующая характеристика показана на рисунке 4.18.

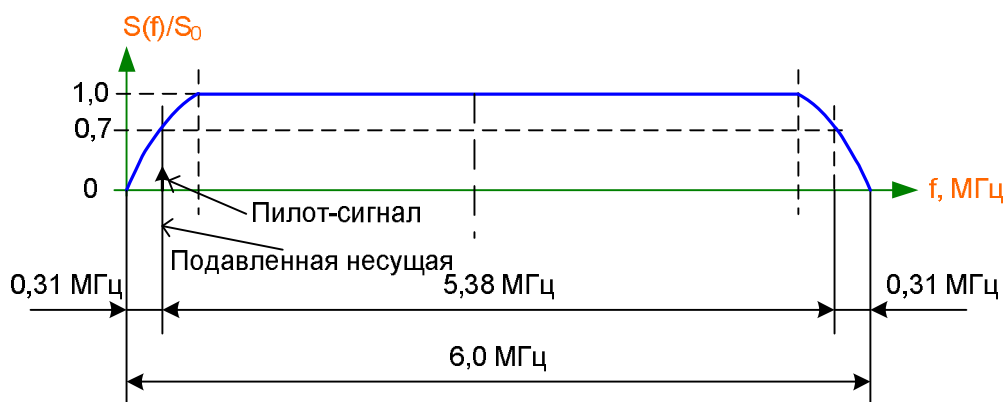


Рисунок 4.18 — Спектр системы 8-VSB ATSC в канале с полосой 6 МГц

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мамчев Г.В. Основы цифрового телевидения. Учебное пособие./Г.В. Мамчев. — Новосибирск: СибГУТИ, 2003. — 248 с.
2. Телевидение: Учебник для ВУЗов / В.Е. Джакония, А.А. Гоголь, Я.В. Друзин и др.; Под ред. В.Е. Джаконии. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007.— 616 с.
3. Смирнов А.В. Основы цифрового телевидения: Учебное пособие. — М.: Горячая линия — Телеком, 2001. — 224 с.
4. Зубарев Ю.Б. Цифровое телевизионное вещание. Основы, методы, системы./ Ю.Б. Зубарев, М.И. Кривошеев, И.Н. Красносельский. — М.: Научно-исследовательский институт радио (НИИР), 2001. — 568 с.
5. Локшин Б.А. Цифровое вещание: От студии к телезрителю./ Б.А. Локшин. —М.: Компания Сайрус системс, 2001. — 446 с.
6. Смирнов А.В. Цифровое телевидение. От теории к практике./ А.В. Смирнов, А.Е. Пескин. — М.: Горячая Линия — Телеком, 2005. — 349 с.