

КОНКУРИРУЮЩИЕ СТАНДАРТЫ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ

ATSC

Этот стандарт разрабатывался с учетом того, что какое-то время в одном диапазоне будут транслироваться сигналы как в стандарте ATSC, так и в действующем в США аналоговом стандарте NTSC. Постепенно NTSC должен быть вытеснен, и весь занятый аналоговым вещанием диапазон станет цифровым. В отличие от ATSC, спектр NTSC достаточно неравномерен. Поэтому для борьбы с интерференционными помехами в ATSC предусмотрен режекторный гребенчатый фильтр с подавлением основных составляющих сигнала NTSC (яркость, цвет и звук). Однако данный фильтр ухудшает для приемника соотношение сигнал/шум вдвое (на 3 дБ), поэтому он включается, только если приемник обнаруживает в эфире NTSC-сигнал.

Очень кратко рассмотрим систему VSB, принятую в ATSC. VSB – это амплитудная модуляция с подавлением нижней боковой полосы и частичным подавлением несущей. Уровней модуляции может быть от 2 (2-VSB) до 16 (16-VSB), они располагаются симметрично относительно 0. Так, амплитуда сигнала в 8-VSB принимает значения, пропорциональные целым числам от -7 до 7 с шагом 2. Для кабельного вещания принята наиболее быстрая система 16-VSB, для наземного – 8T-VSB с предварительным решетчатым (сверточным) кодированием со скоростью 2/3 (T – от trellis, решетка).

На вход VSB-системы поступают пакеты MPEG-2 объемом 188 байт (рис. 1). Из них удаляется байт синхронизации, к оставшимся 187 байтам добавляется 20 проверочных байтов кода Рида-Соломона. Дополнительно включенный в 8T-VSB решетчатый кодер превращает каждые 2 бита получившегося 207-байтового слова в 3 бита – т.е. в один символ. Очевидно, что скорость передачи данных пропорциональна двоичному логарифму от числа уровней амплитудной модуляции (число бит на символ), однако чем больше уровней, тем ниже помехозащищенность. Частота следования символов в VSB – 10,76 МГц. В результате скорость в системе 16-VSB, где каждым четверем битами соответствует один символ, в два раза выше (38,6 Мбит/с), чем в 8T-VSB (19,3 Мбит/с), поскольку для передачи одного пакета требуется вдвое меньше символов. Однако и пороговый уровень соотношения сигнал/шум у данных систем соответственно 28,3 и 14,9 дБ.

В итоге в 8T-VSB каждый байт превращается в 4 символа, 207 байт закодированного пакета – в 828 символов. Вместо синхробайта MPEG-2 используется синхросигнал (бросок амплитуды с уровня 5 до уровня -5) длительностью 0,37 мкс, что соответствует 4 символам. Получившиеся 828+4=832 символа образуют сегмент. Каждые 312 сегментов данных и дополнительный синхросегмент объединяются в поле данных, два поля данных – в кадр (626 сегментов). Синхросегмент содержит ряд опорных последовательностей для настройки корректоров приемника, информацию о числе уровней модуляции и (только в 8T-VSB) 12 последних символов предшествующего сегмента.

Перед поступлением на вход кодера Рида-Соломона данные входного потока рандомизируют – превращают в псевдослучайные числа. Для этого каждый байт входного потока побитно складывается по модулю 2 с циклической псевдослучайной последовательностью. (Генератором этой последовательности служит сдвиговый регистр из 16 триггеров, охваченный набором обратных связей. Во время синхроимпульса первого сегмента данных каждого поля в регистр загружается число F180₁₆. Восемь выходов регистра формируют байты псевдослучай-

ной последовательности.) В результате сигнал становится практически независимым от изображения и шумоподобным, его спектральная плотность равномерно распределяется по полосе. Кроме повышения спектральной эффективности, улучшается и синхронизация передачи: поскольку уровни модуляции симметричны относительно 0, а амплитуды информационных символов достаточно случайны, средний уровень сигнала также близок к 0. На этом фоне легко детектировать периодически повторяющийся синхроимпульс и синхросегмент, даже при отношении сигнал/шум 0 дБ.

Поскольку средний уровень информационных сигналов близок к 0, амплитуда несущей при амплитудной модуляции также была бы нулевой. Но несущая в качестве пилот-сигнала необходима в данной системе для восстановления синхронизации в приемнике, поэтому вводят смещение – уровень каждого сигнала данных увеличивают на 1,25 единицы. Это соответствует появлению маломощного периодического сигнала несущей, добавляющего лишь 0,3 дБ к общей мощности сигнала. Данного уровня достаточно для детектирования несущей даже при отношении сигнал/шум 0 дБ.

Кодирование Рида-Соломона защищает информацию от кратковременных помех (до 10 ошибочных байт на 207-байт слово). В случае длительных помех этот механизм сам по себе бессилен. Поэтому в VSB введено межсегментное перемежение – после кодера Рида-Соломона все байты одного пакета распределяются по 52 сегментам одного поля данных. Таким образом, даже при пропадании сегмента после перемежения в каждом пакете окажется незначительное количество поврежденных байтов, которые восстановятся декодером. Механизм перемежения используется и после решетчатого кодирования (в 8T-VSB), в результате которого последовательные символы оказываются отстоящими друг от друга на 12 символов – внутрисегментное перемежение. После внутрисегментного перемежения в сегменты вводят синхросигналы и добавляют синхропакеты полей, после чего смещают на 1,25 уровень сигналов данных для включения пилотной несущей. Столь сложным сигналом модулируется несущая на промежуточной частоте (ПЧ) 44 МГц, которая затем переносится непосредственно в полосу заданного телеканала.

К сожалению, обладая лучшими теоретическими показателями с точки зрения пороговых соотношений сигнал/шум и энергетической эффективности сигнала (на бит информации) [1], ATSC недостаточно надежен при многолучевом распространении сигналов, что неизбежно в условиях городской застройки. При этом отраженный сигнал (шумоподобный), пришедший с задержкой, уже является помехой по отношению к основному. И если уровень отраженного сигнала менее чем на 15 дБ отличается от прямого, приемник теряет работоспособность – появляются помехи. То же самое относится и к приему сигналов от двух передатчиков. Поэтому заявленный выигрыш систем ATSC по отноше-

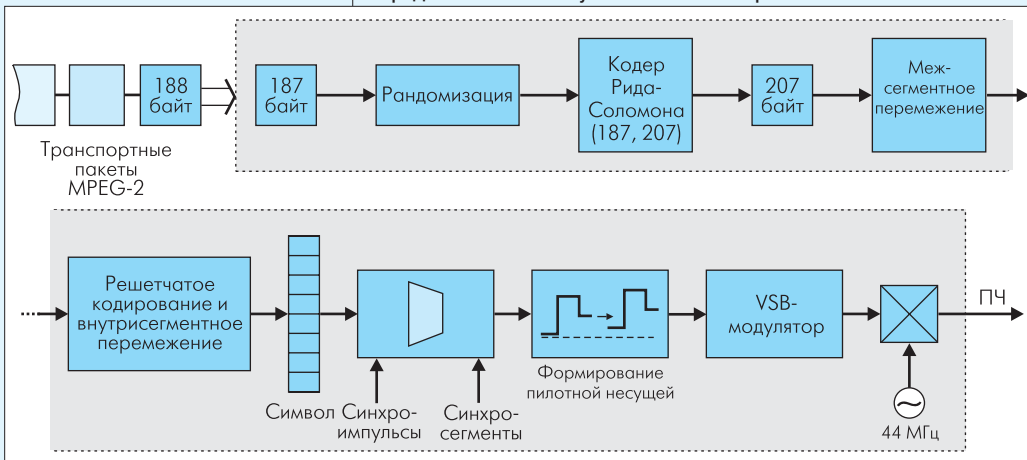


Рис. 1. Формирование сигнала в системе 8T-VSB

нию к DVB по показателю сигнал/шум в 4–6 дБ может проявиться разве что в лабораторных условиях. Практика же показывает, что в Нью-Йорке передатчик ATSC мощностью 350 кВт не обеспечивает 100% приема в радиусе 10 км, тогда как в Лондоне достаточно передатчика DVB-T мощностью 10 кВт для уверенного приема в радиусе 114 км [2]. Приходится усложнять антенные системы, — что, очевидно, пользователей не радует.

DVB – выбор Европы

Принятый в Европе стандарт DVB – это набор спецификаций, охватывающий кабельное DVB-C (cable), спутниковое DVB-S (satellite) и наземное DVB-T (terrestrial) вещание. Наиболее сложный алгоритм – в DVB-T, поскольку условия работы и требования к передаче при наземном вещании наиболее жесткие. Очень кратко остановимся на наиболее примечательных особенностях DVB (более подробно о DVB см., например, работу [3]).

Предварительная обработка пакетов в DVB в принципе аналогична 8-VSB, хотя механизмы реализации функций различны. На вход кодера поступают транспортные пакеты MPEG-2 по 188 байт (1 синхробайт (всегда 47₁₆) + 187 байтов данных) (рис.2). Прежде всего они рандомизируются посредством сложения по модулю 2 с двоичной псевдослучайной последовательностью (генератор – 15-разрядный сдвиговый регистр). Генератор инициализируется через каждые восемь пакетов одним и тем же числом (4B80₁₆). Синхробайты не рандомизируют, каждый восьмой синхробайт инвертируют.

После рандомизации пакеты защищают кодом Рида-Соломона, в результате чего к 188 байтам добавляются 16 проверочных – возможно исправление до 8 ошибочных байт на кодированный 204-байтный пакет. Затем байты перемешиваются внутри кодированных пакетов, причем так, что синхробайты остаются на своих местах, — это внешнее перемешивание. Затем следует внутреннее сверточное кодирование. Его реализует сдвиговый регистр из шести триггеров, превращающий каждый входной бит в два выходных (скорость кодера 1/2). В DVB можно выбирать скорость сверточного кодирования (1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8), используя не оба элемента выходных пар, а лишь один. До сих пор функционально все было аналогично системе 8-VSB. Дальше начинаются принципиальные различия, связанные с модуляцией радиосигнала.

В стандарте использована модуляция COFDM (Coded Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) – вариант мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OTDM) с предварительным кодированием сигнала. Модуляция OFDM подразумевает, что весь диапазон канала вещания (в Европе – 8 МГц) разбит на множество ортогональных поднесущих. Ортогональность означает, что усредненное по времени произведение двух несущих равно нулю. Частоты поднесущих задаются как $f_n(t) = \cos 2\pi(f_0 + n/\tau)t$, где f_0 – нижняя частота диапазона, n – номер поднесущей ($n=0, N-1$; N – число поднесущих), τ – временной интервал передачи одного символа. Поток данных разбивается на

N субпоток, несущая каждого из которых модулируется с гораздо меньшей скоростью. Разнос несущих по частоте – $1/\tau$.

Поскольку в отдельном субканале скорость передачи невелика, перед каждым символом можно ввести защитный интервал – временной отрезок до 0,25τ, в течение которого транслируется фрагмент уже переданного символа (для сохранения ортогональности несущих). Основное назначение защитных интервалов – борьба с межсимвольными помехами, вызванными в том числе и переотражениями сигналов.

Независимая (ортогональная) многочастотная передача с защитными интервалами позволяет успешно противостоять как мощным узкополосным помехам, так и переотраженным сигналам, причем методами цифровой обработки. В системе передачи с одной несущей VSB основное средство борьбы с аддитивными помехами – эквалайзер, однако при полном подавлении несущей сигнал восстановить уже невозможно. При многочастотной передаче “пропадут” только сигналы, попавшие в полосу помехи. Поскольку сигнал кодирован, информацию можно восстановить по данным из других субканалов.

В DVB в одном канале (при принятой в Европе ширине ТВ-канала 8 МГц) может быть до 8 тыс. несущих (учитывая требования алгоритмов обработки – $8 \times 1024 = 8192$ или 8К). Реально задействовано 1705 (режим 2К COFDM) или 6817 (режим 8К) несущих. Каждая несущая модулируется посредством 4-позиционной квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) или 16- и 64-позиционной квадратурной амплитудной модуляции (QAM). Соответственно на каждой несущей один модуляционный символ определяет от двух до шести бит.

Напомним, что при квадратурной модуляции выходной сигнал формируется сложением двух смещенных друг относительно друга на 90° гармонических колебаний на одной частоте f – синфазного $S_I(t) = A_I \cos \omega t$ и квадратурного $S_Q(t) = -A_Q \sin \omega t$ ($\omega = 2\pi f$). Их сумма – исходное колебание с фазовым сдвигом на угол $\varphi = \arctg(A_Q/A_I)$: $A_I \cos \omega t - A_Q \sin \omega t = A \cos(\omega t + \varphi)$. Амплитуда суммарного колебания $A = \sqrt{A_I^2 + A_Q^2}$.

В соответствии с числом уровней модуляции исходный поток данных разбивается на n субпоток – по числу бит в модуляционном символе. Для QPSK таких субпоток два, для 16-QAM – четыре. Демультимплексирование происходит побитно – скажем, при модуляции 64-QAM ($n=6$) первый бит попадает в первый субпоток, шестой – в шестой, седьмой – снова в первый и т.д. В DVB в каждом субпоток биты переставляются по определенному правилу (своему для каждого субпоток) в пределах блока в 126 бит – внутреннее перемешивание. Параллельные выходы устройств перемешивания формируют модуляционный символ – 2-, 4- или 6-разрядный. На одной несущей OFDM передается один символ, поэтому в режиме 8К одновременно транслируется 48 групп по 126 символов – всего $48 \times 126 = 6048$ информационных несущих (или 12 групп по 126 символов на 1512 несущих в режиме 2К). Одновременно передаваемые QAM-символы входят в OFDM-символ. Они распределяются по субканалам OFDM не последовательно, а опять-таки перемешиваются по определенному закону. Поэтому если OFDM-символ пропадает, его данные можно восстановить, поскольку биты одного кодированного пакета оказываются распределенными по многим OFDM-символам.

Очевидно, что реализовать метод передачи OFDM “в лоб”, т.е. использовать несколько тысяч генераторов модулированных поднесущих, весьма проблематично. А на приемной стороне это и вовсе неразрешимая задача. Однако современные методы цифровой обработки сигнала позволяют существенно упростить ее решение, используя отработанные алгоритмы прямого и обратного быстрого преобразования Фурье (БПФ и ОБПФ). Как это происходит?

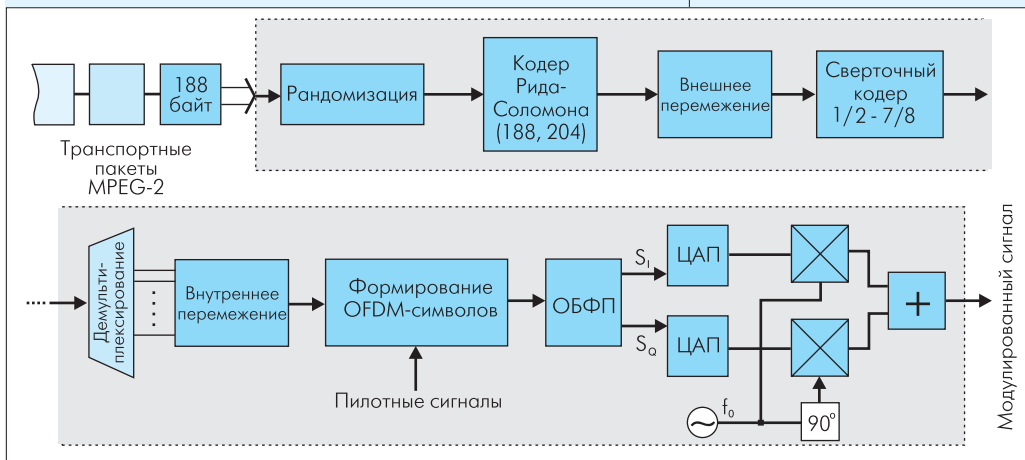


Рис.2. Формирование сигнала в системе DVB-T



Рассмотрим для примера векторную диаграмму модуляции 16-QAM (см. рис.3). Каждая точка на ней соответствует четырем битам символа и определяет амплитуды синфазного (абсцисса) и квадратурного (ордината) колебаний. Складываясь, эти колебания задают соответствующий символу сигнал. Если применять математический аппарат комплексных чисел, ось квадратурных амплитуд будет соответствовать оси мнимых чисел (Im), ось синфазных амплитуд – оси действительных чисел (Re). Тогда любой символ можно представить как комплексное число $z=A_S+iA_Q$ или, по формуле Эйлера, $z=A \exp(i\varphi)$. В DVB используют не сами z , а их значения, нормированные на среднюю амплитуду суммарного колебания при выбранном виде модуляции. Это необходимо для усреднения амплитуд сигналов при различных режимах модуляции (очевидно, что при QPSK $A_{max}=\sqrt{2}$, тогда как при 16-QAM $A_{max}=3\sqrt{2}$).

Запишем в комплексном виде модулированный символом $C_k(t)$ сигнал на k -й несущей (без ее переноса в диапазон вещания): $S_k(t) = C_k(t) \exp(i2\pi kt/\tau)$. Учитывая, что сигнал изменяется дискретно, т.е. $t=nT$, где T – длительность дискретного интервала, n – номер отсчета, получим $S_k(n) = C_k(nT) \exp(i2\pi nT/\tau)$. Тогда общий сигнал OFDM-символа

$$S(n) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k(nT) \exp(i2\pi k \frac{nT}{\tau}). \quad (1)$$

Математически это аналогично вычислению дискретных значений функции по дискретным значениям амплитуд (C_k) ее гармонических составляющих (с частотами k/τ). Данную процедуру описывает обратное преобразование Фурье

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \exp(i2\pi k \frac{n}{N}), \quad (2)$$

где N – число гармонических составляющих, в нашем случае – число несущих. Если длительность интервала дискретизации T выразить как τ/N , выражение (1) станет аналогичным обратному преобразованию Фурье (2). Алгоритмы БПФ – как прямого, так и обратного, – достаточно хорошо проработаны, в том числе и с точки зрения их аппаратной реализации. Они наиболее эффективны при N вида 2^m . Поэтому в 8K-COFDM число несущих условно принято равным $2^{13}=8192$ – просто не все из них используются. Величина $1/T = N/\tau$ – это так называемая системная тактовая частота, для полосы канала в 8 МГц она равна 64/7 МГц. При переходе к другому частотному плану, например с полосой ТВ-канала 7 или 6 МГц, достаточно изменить системную тактовую частоту, сохраняя неизменной всю структуру обработки сигнала (а вместе с ней – основные функциональные устройства). Отметим, что системная тактовая частота одинакова в режимах 2К и 8К – т.е. от числа несущих скорость передачи напрямую не зависит, изменяется только надежность.

Таким образом, посредством ОБПФ из входного массива модуляционных символов численно формируется выходной OFDM-символ. Временной интервал его передачи складывается из собственно времени передачи символа τ и защитного интервала длительностью до $\tau/4$, в течение которого “повторно” передается часть символа (заключено в кавычки, поскольку защитный интервал следует перед информационным). Отметим, что кроме 6048 (в режиме 8К) информационных субканалов он включает еще пилотные сигналы, а также сведения о параметрах передачи – всего 6817 модулированных несущих. Пилотные сигналы – это фиксированные псевдослучайные последовательности с точно известными значениями фаз и амплитуд сигналов. Одна часть пилотных сигналов – непрерывные –

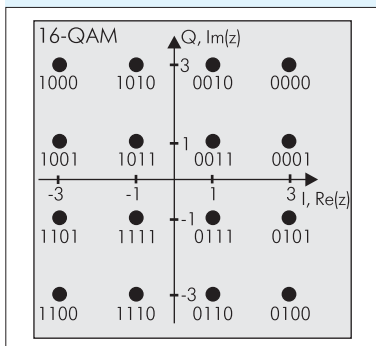


Рис.3. Векторная диаграмма 16-QAM

передается на фиксированных несущих в каждом OFDM-символе, другая – распределенные – случайным образом (но равномерно) в произвольные моменты времени распределяется по спектральному диапазону передачи. Назначение пилотных сигналов – синхронизация и оценка параметров канала передачи.

Синтезировать OFDM-символы недостаточно – необходимо еще сформировать радиосигнал в заданной частотной области (с нижней частотой f_0). Перенос символа в необходимый диапазон – это его смещение на частоту f_0 , что в комплексной форме эквивалентно умножению на комплексное (в виде квадратурных слагаемых) представление несущей f_0 – при этом амплитуды перемножаются, а аргументы складываются. Выделяя действительную (синфазную) и мнимую (квадратурную) составляющие $S(n)$ и умножая их соответственно на $\cos(2\pi f_0 t)$ и $-\sin(2\pi f_0 t)$, после суммирования получим полный сигнал одного OFDM-символа (рис.4).

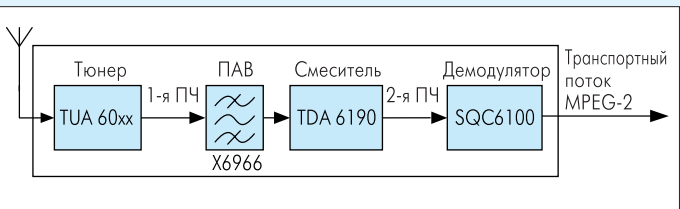


Рис.4. DVB-T-приемник на базе ресивера SQC 6100

Описанные механизмы позволяют очень гибко выбирать необходимый режим вещания, а также совмещать два потока пакетов MPEG-2 – с высокой и низкой скоростью. Возможную скорость определяют вид модуляции, скорость сверточного кодирования (СК), величина защитного интервала T_3 ($\tau/4, \tau/8, \tau/16, \tau/32$). Учитывая, что при 8K-OFDM $\tau=896$ мкс, скорость изменяется в пределах от 4,98 Мбит/с (QPSK, СК=1/2, $T_3=\tau/4$) до 31,67 Мбит/с (64-QAM, СК=7/8, $T_3=\tau/32$).

Мы чрезвычайно схематично рассмотрели принцип передачи сигнала в DVB-T. Однако сигнал надо еще принять, демультплексировать и декодировать – а это сложнее, чем синтезировать его в передатчике. Для этого, дополнительно к алгоритмам передатчика, применяют корреляционные детекторы, декодеры с алгоритмом Витерби и т.д. Приемное устройство должно быть компактным и недорогим – иначе кто же его купит? Транспортные пакеты MPEG-2 также надо декодировать и сформировать ТВ-сигнал – цифровой или аналоговый, в зависимости от типа телевизора. Поэтому ЦТВ-приемник – это достаточно сложный программно-аппаратный комплекс, и только технологические достижения последних лет позволяют делать его недорогим при массовом выпуске. На рынке уже появились DVB-T ресиверы в однокристалльном исполнении, пример тому – ИС DVB-T-ресивера SQC 6100 компании Infineon. Данная ИС поддерживает практически все режимы DVB-T (2К/8К-COFDM; 6, 7 и 8 МГц ТВ-канал, все скорости сверточного кодирования и методы модуляции). Ее применение делает приемник DVB-T конструктивно простым (см. рис.4). Аналоговый сигнал с антенны принимает ИС тюнера типа TUA 60xx. Он усиливает, фильтрует нужный ТВ-канал и преобразует его сигнал к первой ПЧ (36,125 МГц). После ПАВ-фильтра сигнал преобразуется смесителем (например, TDA 6190) ко второй ПЧ (7,225 МГц) и далее попадает на демодулятор SQC 6100. На выходе эта ИС формирует поток транспортных пакетов MPEG-2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варгузин В., Артамов А. Сравнительные характеристики европейского и американского стандартов цифрового наземного телевидения. - Теле-Спутник, 1999, №11.
2. Кухарев В. Перспективы развития и преимущества DVB-T в России и странах ближнего зарубежья. - www.nat.ru
3. Глазман К. Методы передачи данных в цифровом телевидении. Часть 3. - "625", №9, 1999.