

## DVB-T2 – НОВЫЙ СТАНДАРТ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ

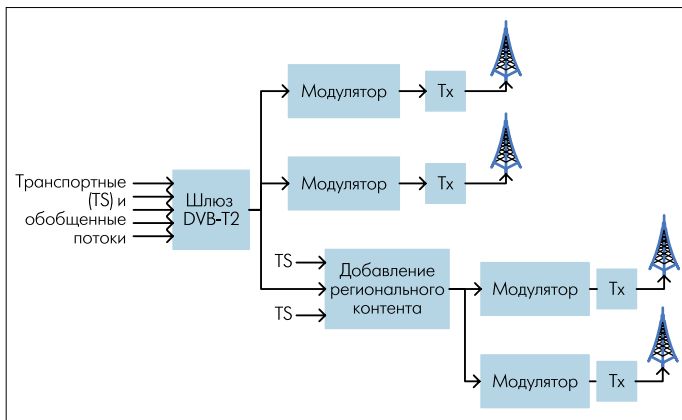
Цифровое телевизионное вещание – это наша ближайшая и неизбежная перспектива. Человечество уже не может мириться с низкими спектральной эффективностью и качеством аналогового прародителя. Причем среди различных технологий доставки телевизионного сигнала (спутниковой, кабельной, посредством сотовых мультимедийных сетей) доминирующее положение остается за наземным эфирным вещанием. О стандартах в этой области написано немало. В России, к сожалению, процесс внедрения наземного цифрового ТВ дальше опытных зон не пошел. А тем временем начинается освоение нового стандарта цифрового вещания – DVB-T2. Что нового он предлагает?

К 2009 году, вопреки первоначальным планам, ни в одной из стран мира не произошел тотальный переход на сети цифрового ТВ-вещания, хотя ряд стран (США, Великобритания и др.) приблизились к этому вплотную. Однако в мире уже продано порядка 244 млн. ТВ-приемников различных типов стандарта DVB (C, S и T). Среди них 107 млн. – стандарта DVB-S и 94 млн. – стандарта DVB-T. В связи со столь массовыми продажами цены на приемные устройства продолжают неуклонно падать, уже сейчас DVB-T-приемники стоят дешевле 30 евро. С другой стороны, в ближайшие годы (до 2012 г.) практически все сколь-нибудь развитые страны планируют прекратить аналоговое вещание. В том числе это означает и высвобождение частотного ресурса для систем цифрового ТВ. Учитывая все это, консорциум DVB к середине 2008 года выпустил новый стандарт наземного цифрового вещания – DVB-T2 [1, 2]. Пока этот документ имеет статус предварительного стандарта, однако ряд производителей начал выпуск соответствующего ему оборудования, а в Великобритании BBC приступила к экспериментальным трансляциям DVB-T2 в июне 2008 года (передатчик размещался на юго-западе Лондона). В марте 2009 года в Турине успешно прошел "фестиваль подключений", в котором приняли участие шесть производителей передающего (модулирующего) оборудования DVB-T2 и пять производителей приемного.

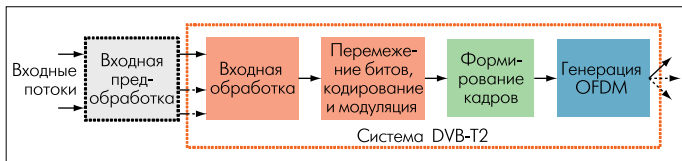
И.Шахнович

Отметим, что DVB-T2 – это стандарт второго поколения. Первый стандарт второго поколения консорциум DVB выпустил в 2003 году – стандарт цифрового спутникового вещания DVB-S2. Но его рассматривать мы не будем, поскольку практически все заложенные в DVB-S2 идеи были воплощены в стандарте DVB-T2. Кроме того, мы будем анализировать DVB-T2 в сравнении с его предшественником DVB-T, который описан многократно и достаточно подробно (см., например, [3, 4]), поэтому основные принципы формирования и трансляции сигнала в DVB-T останутся за рамками нашего рассмотрения. Напомним лишь, что стандарт DVB-T подразумевает трансляцию кодированного цифрового ТВ-сигнала (в формате кодирования MPEG-2, а впоследствии – в более совершенных форматах, например, MPEG-4). Для передачи цифровой сигнал кодируется и преобразуется в OFDM-сигнал. OFDM – это технология модуляции посредством ортогональных несущих, т.е. модулируются множество (в DVB-T – порядка 8 тыс.) несущих, расположенных в заданной полосе с фиксированным шагом по частоте. Скорость модуляции отдельной несущей при этом достаточно мала, что позволяет использовать эффективное помехоустойчивое кодирование и принимать меры для борьбы с межсимвольной интерференцией (вводить специальные защитные интервалы в каждый OFDM-символ). Это актуально при вещании в условиях сложного рельефа и городской застройки, когда происходит переотражение и многолучевое распространение сигнала, возникают зоны замирания и т.п. Сама OFDM-модуляция реализуется посредством алгоритма обратного быстрого преобразования Фурье (на передающей стороне) в цифровой форме. Основные параметры OFDM-сигнала – отношение длительности защитного интервала к общей длительности символа, число номинальных поднесущих, тип модуляции поднесущей (информационная емкость одного модуляционного символа, в нашем случае зависящая от числа возможных положений значений амплитуды и фазы сигнала).

Стандарт DVB-T2 призван как минимум на 30% улучшить емкость сетей ЦТВ по сравнению с DVB-T, при той же инфраструктуре сети и частотных ресурсах. Однако на практике выиг-



**Рис. 1. Схема трансляции в сети DVB-T2**



**Рис. 2. Обобщенная схема обработки передаваемых сигналов в системе DVB-T2**

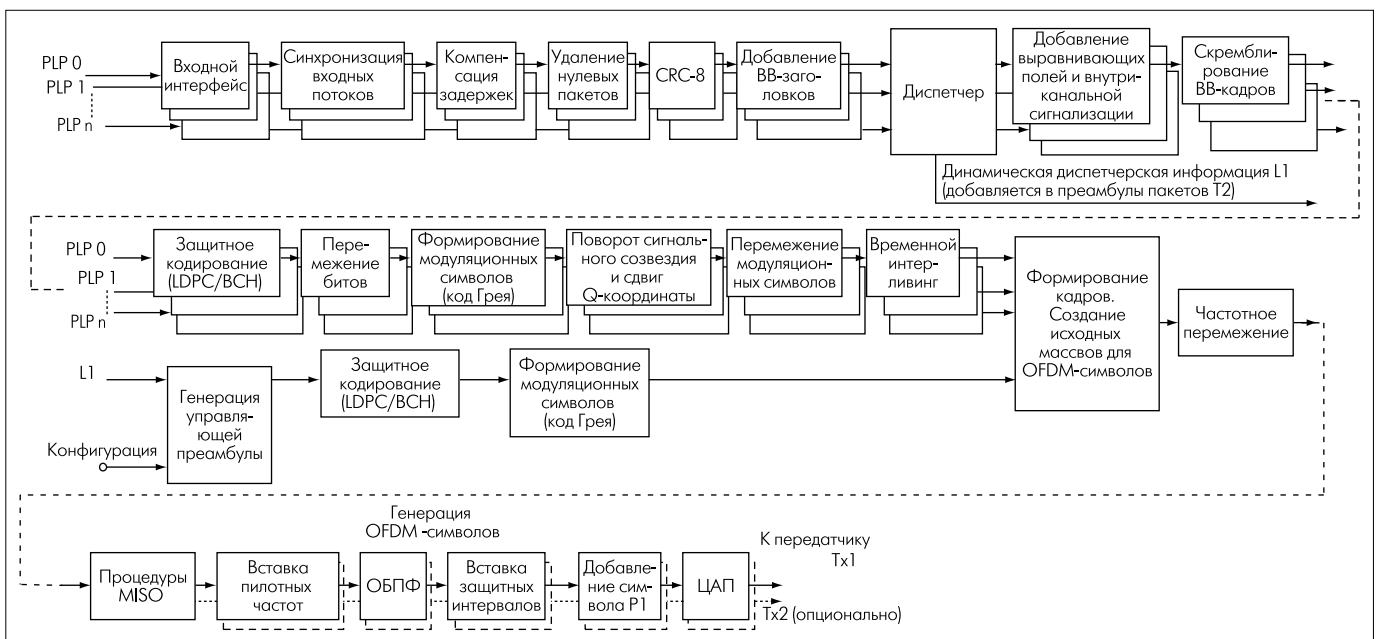
рыш оказывается не ниже 50%. DVB-T2 принципиально отличается как архитектурой системного уровня (MAC-уровня – Media Access Control), так и особенностями физического уровня.

На системном уровне принципиальное отличие нового стандарта – это концепция магистральных потоков физического уровня (Physical Layer Pipe – PLP). Если стандарт DVB-T был предназначен исключительно для передачи пакетов MPEG-2, то сеть DVB-T2 способна транслировать самые разные по природе и структуре информационные потоки (рис.1). Система DVB-T2 способна передавать несколько независимых мультимедийных потоков, каждый со своей схемой модуляции, скоростью кодирования и временными интервала-

ми. Возникает относительно сложная кадровая структура как на логическом, так и на физическом уровне – ничего подобного в DVB-T не было. Соответственно, в системе DVB-T2 появляется новая функция – предварительная обработка входных потоков (рис.2). В целом, общая схема обработки сигналов в системе DVB-T2 существенно усложняется (рис.3).

В стандарте различаются три основных типа потоков – транспортный поток (Transport Stream – TS), обобщенный инкапсулированный поток (Generic Encapsulated Stream – GSE) и обобщенный непрерывный поток (Generic Continuous Stream – GCS). Каждый поток представляет собой последовательность пользовательских пакетов (UP – User Packet). Транспортный поток – это последовательность пакетов фиксированной длины (пакеты MPEG-2, 188 байт, первый байт – всегда синхробайт со значением 47<sub>16</sub>). Поток GSE характеризуется пакетами переменной или фиксированной длины, которая указывается в заголовках этих пакетов. Поток GCS представляет собой непрерывный поток битов. Реально – это или последовательность пакетов без указания их длины, или пакеты максимально возможной длины 64 Кбит.

Пакеты каждого магистрального потока объединяются в потоковые (Baseband) кадры (BB-кадры) – отдельно для каждого потока (рис.4). BB-кадр содержит BB-заголовок (80 бит), поле данных и поле выравнивания. В последнем можно передавать данные внутриканальной сигнализации. В заголовке пакета содержится информация о типе транспортного потока, размере пользовательского пакета (при необходимости) и всего поля данных, наличии режимов удаления пустых пакетов и дополнительных синхропакетов, используется постоянная/переменная модуляция и т.п. Размер поля данных и выравнивающего поля определяется параметрами сверточного кодера (в сумме не более 53770 бит).



**Рис. 3. Упрощенная схема обработки информации (передающая сторона) в системе DVB-T2**

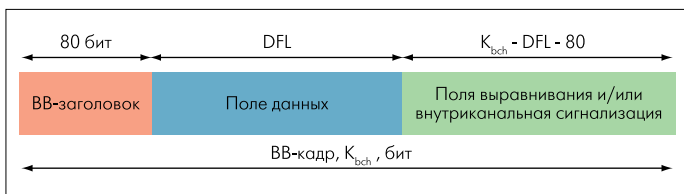


Рис.4. Структура потоковых кадров

Таблица 1. Параметры помехоустойчивого кодирования для стандартного кодового слова

Скорость LDPC-кодирования	Исходный блок данных (перед БЧХ), $K_{bch}$	Кодовое слово БЧХ (перед LDPC), $K_{ldpc}$	Число исправляемых БЧХ-кодом ошибок	Кодовое слово LDPC, $N_{ldpc}$
1/2	32 208	32 400	12	64 800
3/5	38 688	38 880	12	
2/3	43 040	43 200	10	
3/4	48 408	48 600	12	
4/5	51 648	51 840	12	
5/6	53 840	54 000	10	

Стандарт DVB-T2 ориентирован на передачу телевизионных потоков, в которых зачастую используются пустые пакеты (для выравнивания скорости потока), разного рода задержки и т.п. для сохранения постоянной скорости потока. Поэтому в DVB-T2 предусмотрены средства удаления этой избыточной информации, но с возможностью ее восстановления на приемном конце. Кроме того, опционально предусмотрен и механизм сверточного кодирования CRC-8 на уровне пользовательских пакетов.

Сформированный ВВ-кадр скремблируется (рандомизируется путем перемножения на псевдослучайную последовательность) и подвергается корректирующему кодированию. Механизм защитного кодирования – еще одна принципиальная особенность стандарта DVB-T2. В качестве корректирующего кода используется каскадный код. В качестве внешнего кода в нем применен блочный кодер Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ, BCH). В качестве внутреннего – низкоплотный код с проверкой на четность (LDPC). В зависимости от скорости кодирования LDPC, размер входного блока данных для БЧХ-кодера может различаться (табл.1.), однако выходной размер кодового слова после LDPC всегда составляет 64800 бит (рис.5).

Перед модуляцией (кроме BPSK и QPSK) кодовые слова подвергаются побитному перемежению и распределяются по модуляционным символам (см. рис.3).

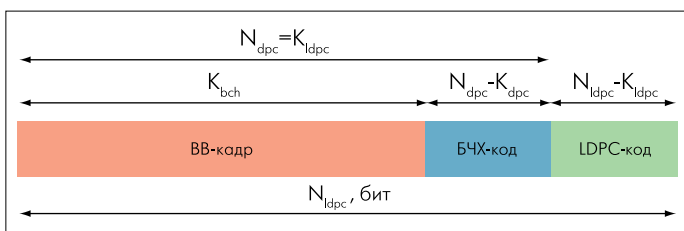


Рис.5. Кодовое слово после обработки ВВ-кадра

В DVB-T2 добавлена модуляция 256-QAM (8 бит на символ), что повышает емкость канала передачи на 33% (относительно схемы 64-QAM в DVB-T). Обычно переход от 64-QAM к 256-QAM требует увеличения соотношения сигнал/шум на поднесущей на 4–5 дБ. Однако благодаря применению корректирующих кодов BCH-LDPC, эффективность которых гораздо выше традиционных кодов исправления ошибок (в т.ч. Рида-Соломона), в DVB-T2 скорость кодирования может быть намного выше и общая пропускная способность канала существенно возрастает.

Еще одно новшество DVB-T2 – введение схемы модуляции с "вращающимся" сигнальным созвездием (рис.6). Эта процедура означает, что сформированный модуляционный символ поворачивается в комплексной плоскости на определенный угол, зависящий от числа уровней модуляции ( $29^\circ$  для QPSK,  $16,8^\circ$  – для 16-QAM,  $8,6^\circ$  для 64-QAM и  $\arctg(1/16)$  для 256-QAM). Более того, перед началом вращения квадратурная (Q) координата каждого модуляционного символа циклически сдвигается в рамках одного кодового слова (т.е. берет-ся из предыдущего символа этого слова, Q-компонента первого символа становится равной Q-компоненте последнего).

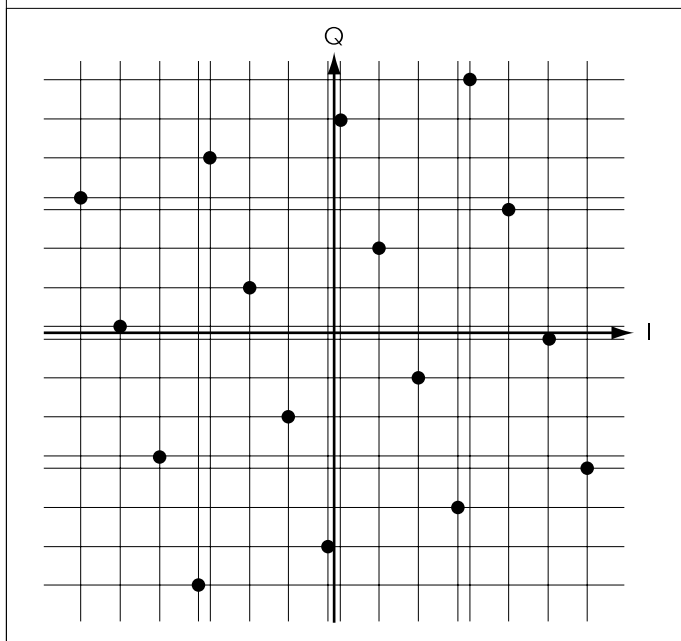
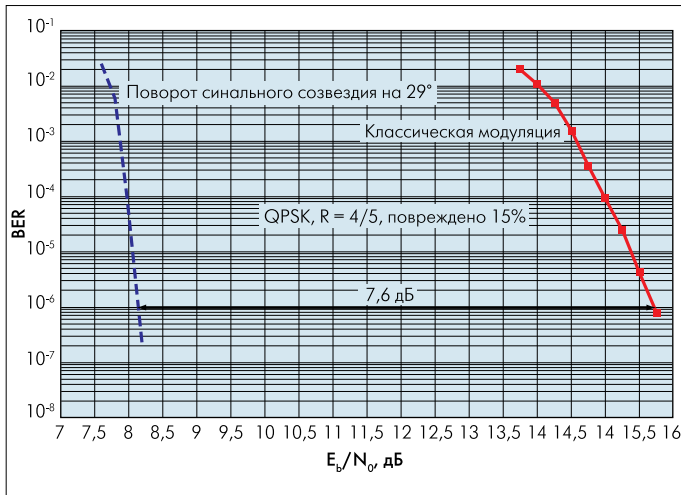
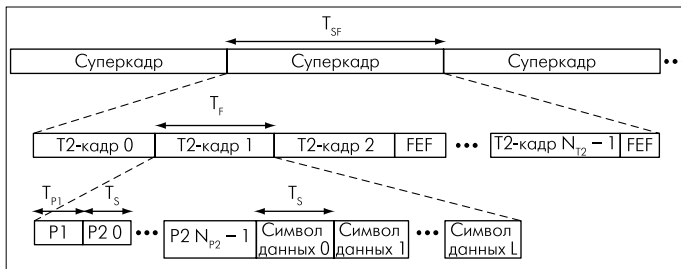


Рис.6. Сигнальное созвездие 16-QAM после поворота

В чем суть поворота сигнального созвездия? В квадратурных каналах передаются проекции точки сигнала на соответствующие оси (синфазную и квадратурную). При обычном сигнальном созвездии несколько точек расположены на нескольких общих ортогональных линиях, и их проекции совпадают. После поворота сигнального созвездия (см. рис.6) у каждой точки – уникальные Q- и I-координаты. Некоторые из координат оказываются достаточно близко друг к другу, но по одной координате точки всегда можно восстановить другую ее координату. А механизм сдвига Q-координаты приводит к тому, что исходные координаты сигнальной точки оказываются



**Рис.7. Выигрыш от поворота сигнального созвездия модуляционных символов**



**Рис.8. Структура кадров в системе DVB-T2**

ся в разных модуляционных символах (т.е. заведомо на разных поднесущих), что существенно снижает вероятность их одновременной деградации как из-за случайных импульсных помех, так и по причине селективных затуханий в канале. В работе [2] отмечено, что применение такой техники обеспечивает операционное усиление 7,6 дБ (рис.7).

После формирования модуляционных символов происходит их перемежение в пределах кодового слова.

Все рассмотренные до сих пор процедуры выполняются параллельно для отдельных магистральных потоков. В результате для каждого PLP формируется последовательность модуляционных символов. Из них необходимо сформировать OFDM-символы. Но если в DVB-T эта процедура была абсолютно прозрачной, то в DVB-T2, из-за возможности транслировать несколько мультимедийных потоков, необходимо сформировать достаточно сложную кадровую структуру.

Кадр физического уровня DVB-T2 (T2-кадр) (рис.8) начинается с преамбулы P1. Это OFDM-символ с модуляцией DBPSK, двумя защитными интервалами с двух сторон (в сумме 1/2 длительности символа). Он служит для синхронизации, идентификации потока DVB-T2, а также содержит 7 информационных бит с начальной информацией о T2-кадре, а именно число номинальных поднесущих в OFDM (1K–32K) и формат передачи следующей за P1 преамбулы P2 (режимы MISO или SISO). Вся остальная информация о T2-кадре (длина, модуляция, скорость кодирования и т.п.) передается в преамбуле

P2, которая может занимать несколько OFDM-символов. Далее следует поле данных (информационные OFDM-символы). Закрывает T2-кадр специальный завершающий OFDM-символ. В зависимости от параметров OFDM, в T2-кадре может быть от 60 до 2098 OFDM-символов при полосе передачи 8 МГц (табл.2). Максимальная длительность T2-кадра – 250 мс.

T2-кадры объединены в суперкадр. Помимо T2-кадров в суперкадр входят поля, зарезервированные для дальнейшего использования (FEF – Future Extension Frames). Они могут чередоваться в произвольном порядке. Максимальная длительность суперкадра – 128 с. Если в суперкадре нет FEF, его максимальная длительность  $T_{SF} = 64$  с, что соответствует 256 T2-кадрам по 250 мс.

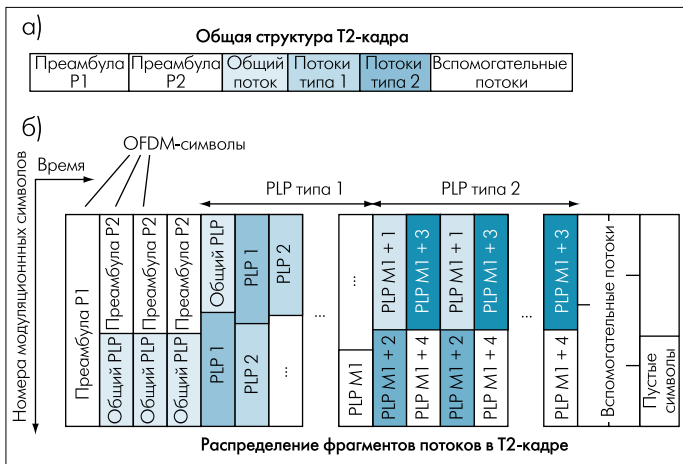
Распределением потоков по кадрам занимается специальный диспетчер еще на стадии формирования ВВ-кадров. Уже тогда, задолго до формирования OFDM-символов, создается сигнальная информация. Стандарт DVB-T2 чрезвычайно гибко с точки зрения мультиплексирования множества потоков в единый трансляционный сигнал. Видимо, разработчики хотели предусмотреть не только все, что они только могли вообразить, но и то, что они даже представить пока не могли. Поэтому не будем удивляться столь многообразному и, казалось бы, избыточному набору возможностей.

Формирование OFDM-кадров неразрывно связано с распределением фрагментов различных магистральных потоков как внутри T2-кадра, так и в рамках суперкадра. С этой точки зрения стандарт выделяет три типа потоков PLP – общий, а также потоки данных типа 1 и 2. Общий PLP – это информация, общая для группы из нескольких PLP (например, таблицы программ и сервисов PSI/SI для нескольких транспортных потоков). Потоки PLP типа 1 в T2-кадре не подразделяются на фрагменты – иными словами, в каждом T2-кадре может быть только один фрагмент каждого PLP типа 1. Наконец, потоки типа 2 могут в пределах T2-кадра разделяться на несколько фрагментов (от 2 до 6480), следующих в кадре попеременно (рис.9).

Потоки могут отображаться на T2-кадры по определенным правилам. Например, поток N передается в группах по три смежных T2-кадра, следующих через интервал в один кадр. Более того, перед распределением по T2-кадрам в

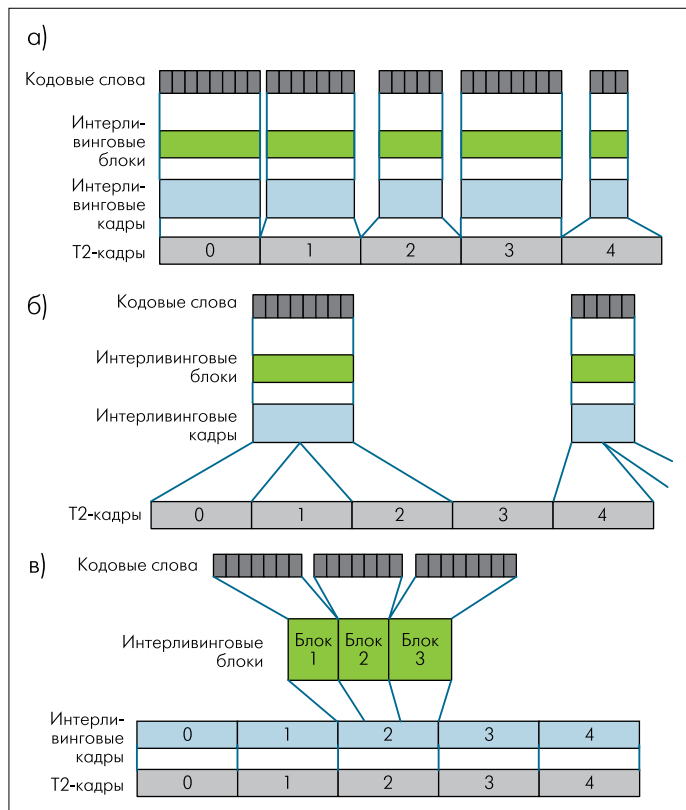
**Таблица 2. Максимальная длина T2-кадра (OFDM-символов) в полосе 8 МГц**

Номинальное число поднесущих	Длительность символа, мс	Защитный интервал						
		1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
32K	3,584	68	66	64	64	60	60	–
16K	1,792	138	135	131	129	123	121	111
8K	0,896	276	270	262	259	247	242	223
4K	0,448	–	540	524	–	495	–	446
2K	0,224	–	1081	1049	–	991	–	892
1K	0,112	–	–	2098	–	1982	–	1784



**Рис.9. Общая структура T2-кадра (а) и распределение фрагментов потоков в T2-кадре (б)**

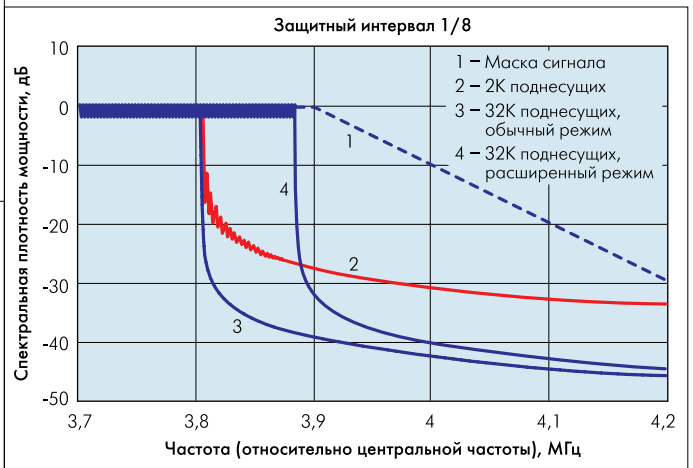
рамках каждого PLP возможно временное перемежение. Для этого кодовые слова потока PLP после формирования модуляционных символов и их перестановки группируются в т.н. интерливинговые кадры, содержащие динамически изменяющееся целое число кодовых слов. Интерливинговый кадр состоит из одного или нескольких интерливинговых блоков (рис.10). Перемежение символов происходит в пределах всего интерливингового блока. Процедура разбиения на интерливинговые блоки и кадры выполняется на уровне магистральных потоков, с учетом их специфи-



**Рис.10. Распределение интерливинговых блоков и кадров различных PLP по T2-кадрам: а – один в один, б – несколько интерливинговых кадров в один T2-кадр (последовательность с пропуском одного кадра), в – три интерливинговых блока в один интерливинговый кадр**

ки. Интерливинговые кадры отображаются на кадры физического уровня (T2-кадры) – один в один или один интерливинговый кадр в несколько T2-кадров (см. рис.10). Отметим, что плюс ко всем перечисленным видам перемежения – на уровне бит в кодовых словах, модуляционных символов, временного интерливинга, – используется еще и частотный интерливинг, т.е. перестановка поднесущих в пределах OFDM-символа.

В стандарте DVB-T2 изменения коснулись и структуры OFDM-символов. Увеличено возможное число номинальных поднесущих – помимо 8K (8×1024) добавлены режимы 16K и 32K поднесущих (а также 1K и 4K). Поскольку с увеличением числа поднесущих для OFDM-сигналов спектральная характеристика становится более крутой (рис.11), можно расширить используемый частотный диапазон, не выходя за границы разрешенной спектральной маски. Это позволяет использовать в OFDM-символе больше поднесущих для передачи данных. Такой режим допустимо использовать при 8K, 16K и 32K поднесущих. Эффект от расширенного режима составляет от 1,4% (8K) до 2,1% (32K).



**Рис.11. Спектральная характеристика сигналов DVB-T2 при различном числе номинальных поднесущих и маски сигнала. Показано расширение спектра сигнала при 32K номинальных поднесущих в пределах маски**

Чем больше номинальных поднесущих, тем длительнее может быть OFDM-символ. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить защитный интервал до 1/128 (против 1/32 в DVB-T). Использование такого защитного интервала при 32K номинальных поднесущих эквивалентно защитному интервалу 1/32 при 8K поднесущих. Однако пропускная способность при этом возрастает весьма существенно. Всего в DVB-T2 разрешено использовать семь относительных длин защитных интервалов – 1/128, 1/32, 1/16, 19/256, 1/8, 19/128 и 1/4.

В DVB-T2 возможно и более гибкое распределение пилотных поднесущих. Вместо одной фиксированной схемы распределения пилотных частот в DVB-T, в DVB-T2 предусмотрено восемь различных схем их распределения. Выбор варианта зависит от числа номинальных поднесущих и размера защит-



**Таблица 3. Максимальная скорость битового потока при ширине полосы 8 МГц, 32К номинальных поднесущих, защитный интервал 1/128, схема пилотных поднесущих PP7**

Модуляция	Скорость кодирования	Абсолютная максимальная скорость, Мбит/с	Длина T2-кадра, OFDM-символов	Число кодовых слов в кадре
QPSK	1/2	7,49255	62	52
	3/5	9,003747		
	2/3	10,01867		
	3/4	11,27054		
	4/5	12,02614		
	5/6	12,53733		
16-QAM	1/2	15,03743	60	101
	3/5	18,07038		
	2/3	20,10732		
	3/4	22,6198		
	4/5	24,13628		
	5/6	25,16224		
64-QAM	1/2	22,51994	46	116
	3/5	27,06206		
	2/3	30,11257		
	3/4	33,87524		
	4/5	36,1463		
	5/6	37,68277		
256-QAM	1/2	30,08728	68	229
	3/5	36,15568		
	2/3	40,23124		
	3/4	45,25828		
	4/5	48,29248		
	5/6	50,34524		

ного интервала. В результате если в DVB-T распределенные пилотные поднесущие составляли 8% всех поднесущих, то в DVB-T2 этот показатель может составлять также 1, 2 и 4%.

Еще одна принципиально новая возможность – передача в режиме MISO с использованием схемы Аламоути, т.е. приемник обрабатывает сигнал от двух передающих антенн. Вводятся и дополнительные частотные полосы – 10 МГц и 1,712 МГц (последняя – для мобильных сервисов).

В целом, все эти нововведения позволяют создать очень гибкую и в то же время чрезвычайно эффективную систему трансляции мультимедийных потоков. При этом максимальная скорость входного транспортного потока после предобработки (например, удаления нулевых пакетов) может превосходить 50 Мбит/с (табл.3).

Разумеется, совсем не обязательно использовать все возможности стандарта. В том числе – и трансляцию множества мультимедийных потоков. Однако в сочетании с новыми видами кодирования видеосигнала (такими как MPEG-4) эта технология является существенным шагом вперед. И что важно с точки зрения сетей широкополосно-

го доступа, стандарт DVB-T2 – это уже не "просто" система транспорта пакетов цифрового видеоконтента. Это – мощный инструмент мультимедийного вещания, в который изначально заложены огромные возможности по расширению функциональности. Конечно, в силу своей однонаправленности он не может рассматриваться как конкурент традиционным сетевым технологиям, но свое место в наступающую эпоху технологий широкополосной беспроводной связи четвертого поколения (4G) он, безусловно, займет. И, возможно, будет при этом не только узкоспециализированным средством доставки телевизионного контента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). – DVB Document A122, June 2008
2. Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). – DVB Document A133, February 2009.
3. **Шахнович И.** Конкурирующие стандарты цифрового вещания. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2002, №1, с.17–19.
4. **Шахнович И.** Современные технологии беспроводной связи. – М.: Техносфера, 2006.