

Особенности определения параметров цифрового телевизионного вещания

В. И. Носов, М. В. Зиновьев, А. С. Ладан

Стандарт наземного цифрового телевизионного вещания DVB-T2 позволяет использовать широкий набор скоростей передачи пользовательских данных. В литературе приводятся достаточно громоздкие и сложные формулы для расчётов этих скоростей. В статье предлагается простая методика определения оптимальной скорости передачи пользовательских данных, основанная на простых и понятных формулах, в основу которых положена последовательность обработки пользовательских данных в стандарте DVB-T2.

Ключевые слова: стандарт DVB-T2, скорость передачи пользовательских данных, избыточное кодирование, защитный интервал.

1. Введение

Характеристики и параметры стандарта наземного цифрового телевизионного вещания DVB-T2 подробно изложены в документах ETSI [1, 2]. В этих документах приводятся достаточно сложные и громоздкие формулы для определения скорости передачи данных с учётом всех моментов обработки пользовательских пакетов данных. В качестве примера приведены результаты расчёта скорости передачи для одной из огромного количества комбинаций параметров, обеспечивающей максимальную скорость передачи данных для стандарта DVB-T2. Поскольку пользоваться формулами, приведёнными в [1, 2], затруднительно, появляются публикации, в которых предлагаются упрощённые формулы, не учитывающие всех моментов обработки пользовательских пакетов данных [3, 4]. Поэтому в данной статье на основе рассмотрения последовательности обработки цифрового сигнала в стандарте DVB-T2 предлагается простая методика получения упрощённых формул для определения оптимальной скорости передачи для заданной комбинации параметров.

Скорость передачи пользовательской информации (UP – User Packet) R_{bUP} в сети наземного цифрового ТВ-вещания стандарта DVB-T2 зависит от следующих факторов:

- доли служебной информации относительно общего её объема OHF (OHF – Overhead Fraction) в кадре T2;
- скорости избыточного кодирования R_{FEC} ;
- размера быстрого преобразования Фурье (IFFT size);
- доли поднесущих, используемых для передачи информации (SCF – Subcarrier Fraction);
- используемого варианта пилотных поднесущих (PP – Pilot Pattern);
- используемого вида модуляции M_{MOD} ;
- доли защитного интервала относительно общей длительности символа GIF (GIF – Guard Interval Fraction):

$$R_{bUP} = \varphi(OHF, R_{FEC}, IFFT_{SIZE}, SCF, PP, M_{MOD}, GIF). \quad (1)$$

Для определения скорости передачи пользовательской информации в цифровом телевизионном вещании стандарта DVB-T2 необходимо рассмотреть последовательность обработки цифрового сигнала в этом стандарте. На всех этапах обработки необходимо определить долю

добавленных служебных сигналов относительно общего объема служебных и пользовательских сигналов.

2. Последовательность обработки цифрового сигнала в стандарте DVB-T2

Вход в систему T2 (рис. 1) осуществляется одним или несколькими транспортными потоками данных TS (TS – Transport Stream). Транспортный поток TS – это последовательность пользовательских пакетов (UP – User Packet) фиксированной длины, $UP_L = 188 \times 8$ бит (один MPEG-пакет). Входная предобработка, которая не является частью системы T2, может включать в себя демультиплексор или разделитель услуг транспортных потоков (TS) на T2-системные входы, представляющие собой один или несколько логических потоков данных PLPs (PLP – Physical Layer Pipes) [1, 2]. Далее будут рассмотрены все блоки T2-системы.

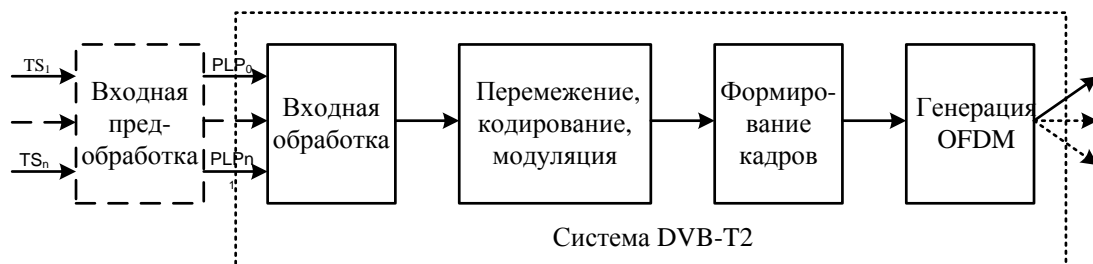


Рис. 1. Обобщенная схема обработки передаваемых сигналов в системе DVB-T2

Модули адаптации режима (на рис. 1 – «Входная обработка»), которые работают отдельно от содержимого каждого PLP, размещают транспортные потоки TS входных данных в поля данных, которые после адаптации потока будут формировать кадры основной полосы частот (BB_FRAMEs) (BB – Base Band) (рис. 2).

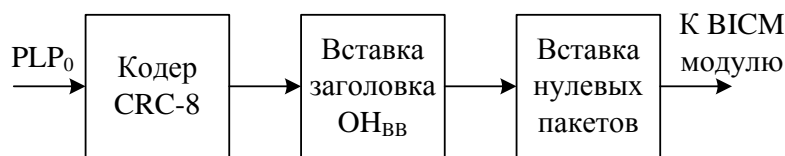


Рис. 2. Формирование кадра основной полосы BB_FRAME для одного потока PLP

Кадры основной полосы BB_FRAME являются основной единицей в логической структуре кадрирования DVB-T2: распределение и планирование выполняются в целых числах этих потоков. Каждый кадр BB_FRAME может содержать целое число входных пользовательских пакетов либо пакеты могут быть фрагментированы по двум кадрам BB_FRAME. BB_FRAME (рис. 3) содержат заголовок BB_HEADER, поле данных (DFL – Data Field Length) и поле PADDING, предназначенное для заполнения нулевыми пакетами (NP – Null Packet). Поле PADDING может применяться в тех случаях, когда доступных для передачи пользовательских пакетов данных UP недостаточно для полного заполнения кадра BB_FRAME или когда для кадра основной полосы BB_FRAME должно быть выделено целое число пользовательских пакетов данных.

В заголовке кадра основной полосы OH_{BB_FRAME} содержится информация: о типе транспортного потока; о размере поля данных; о наличии режимов удаления пустых пакетов; об использовании постоянной/переменной модуляции и кодирования; об одном или нескольких транспортных потоках на входе; об активном/неактивном удалении нулевых пакетов.

Рис. 3. Структура кадра основной полосы BB_FRAME

Также один байт заголовка кадра основной полосы используется для кода обнаружения ошибок CRC-8 в девяти первых байтах заголовка.

Общий размер каждого кадра основной полосы K_{b_BCH} бит (рис. 3) является постоянным для каждого PLP и зависит от скорости кодирования внутреннего кода LDPC R_{c_LDPC} (табл. 1). При этом доля служебных бит $N_{b_OH_BB_FRAME}$, входящих в заголовок OHF (OHF – Over Head Fraction) кадра основной полосы BB_FRAME :

$$OHF_{BB_FRAME} = \frac{N_{b_OH_BB_FRAME}}{N_{b_BB_FRAME}} = \frac{N_{b_OH_BB_FRAME}}{K_{BCH}}. \quad (2)$$

Количество бит в заголовке кадра основной полосы BB_FRAME равно:

$$N_{b_OH_BB_FRAME} = 80. \quad (3)$$

За счёт использования служебных бит заголовка количество информационных бит пользовательских пакетов N_{b_UP} составит:

$$N_{b_UP} = N_{b_BB_FRAME} (1 - OHF_{BB_FRAME}). \quad (4)$$

В соответствии с выражениями (2) и (4) доля информационных бит в кадре основной полосы BB_FRAME составит $(1 - OHF_{BB_FRAME})$.

Таблица 1. Снижение скорости передачи пользовательских пакетов из-за использования заголовка OHF_{BB_FRAME}

R_{c_LDPC}	$N_{b_BB_FRAME}$	OHF_{BB_FRAME}	$1 - OHF_{BB_FRAME}$
1/2	32208	0.0025	0.9975
3/5	38688	0.0021	0.9979
2/3	43040	0.0019	0.9981
3/4	48408	0.0017	0.9983
4/5	51648	0.00155	0.99845
5/6	53840	0.0015	0.9985

После обработки сигнала в модуле адаптации («Входная обработка» на рис. 1) сигналы PLP-потоков поступают на обработку в модуль перемежения бит, кодирования и модуляции (BICM – Bit Interleaving Coding Modulation) (рис. 1). Максимальное число PLP-потоков равно 255 [1]. На рис. 4 представлена схема обработки одного PLP-потока в блоке BICM.

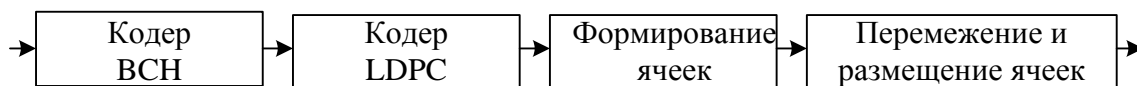


Рис. 4. Модуль с перемежением, кодированием и модуляцией BICM

Первый блок в модуле BICM – кодер FEC, в котором добавляются избыточные биты, которые используются в декодере FEC для обнаружения и исправления ошибочных бит. В результате на выходе кодера формируется кадр FEC (FE_CFRAME). В T2-системе используется каскадное кодирование, где в качестве внешнего кода используется блочный код BCH, а внутреннего – низкоплотный код LDPC (рис. 4, 5).

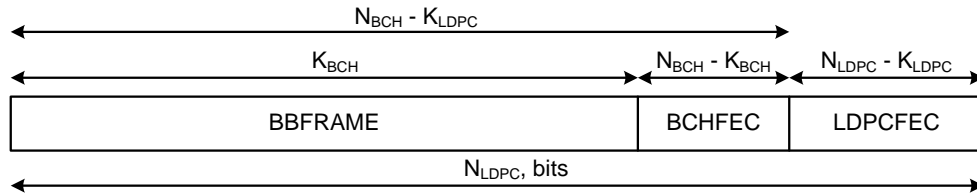


Рис. 5. Формат данных на выходе кодера FEC

Количество бит в блоке на входе внешнего кодера BCH K_{b_BCH} равно количеству бит в кадре основной полосы $N_{b_BB_FRAME}$:

$$K_{b_BCH} = N_{b_BB_FRAME} \cdot \quad (5)$$

В кодере BCH ко входным битам K_{b_BCH} добавляются избыточные биты (redundancy bit) K_{b_RED} , в результате на выходе кодера получается N_{b_BCH} (табл. 2):

$$N_{b_BCH} = K_{b_BCH} + K_{b_RED} \cdot \quad (6)$$

В соответствии с выражениями (5) и (6) скорость кода BCH будет равна:

$$R_{c_BCH} = \frac{K_{b_BCH}}{N_{b_BCH}} = \frac{N_{b_BB_FRAME}}{K_{b_BCH} + K_{b_RED}} \cdot \quad (7)$$

Скорость внешнего кода BCH зависит от скорости внутреннего кода LDPC R_{c_LDPC} , на выходе которого всегда получается FEC-кадр (FEC_FRAME) одинаковой длительности:

$$N_{b_LDPC} = N_{b_FEC_FRAME} = 64800 \cdot \quad (8)$$

Таблица 2. Параметры FEC-кадра для $N_{b_LDPC} = 64800$ бит

R_{c_LDPC}	K_{b_BCH}	N_{b_BCH}	K_{b_RED}	R_{c_BCH}
1/2	32208	32400	192	0.994
3/5	38688	38800	192	0.997
2/3	43040	43200	160	0.996
3/4	48408	48600	192	0.996
4/5	51648	51840	192	0.996
5/6	53840	54000	160	0.997

За счёт использования избыточных бит во внешнем $K_{b_RED_BCH}$ и внутреннем $K_{b_RED_LDPC}$ в кадре FEC количество информационных бит пользовательских пакетов N_{b_UP} на выходе кодера FEC составит:

$$N_{b_UP} = N_{b_FEC_FRAME} \times R_{c_BCH} \times R_{c_LDPC} \cdot \quad (9)$$

В соответствии с рис. 1 после блока избыточного кодирования FEC цифровой поток поступает на демультимплексор, который разделяет последовательность бит входного потока на ячейки (cell), количество которых определяется размером используемого быстрого преобразования Фурье (IFFTsize) или количеством поднесущих частот SCF (subcarrier frequency):

$$N_{CELL} = N_{IFFT_SIZE} = N_{SCF} \cdot \quad (10)$$

Количество бит в каждой ячейке определяется позиционностью M_{mod} используемой модуляции:

$$N_{b_CELL} = \log_2 M_{MOD} = \gamma_{MOD} \cdot \quad (11)$$

С выхода блока демультиплексора ячейки поступают на устройство их размещения на сигнальные точки SP (SP – Signal Point) на фазово-амплитудной плоскости (constellation – созвездие) в соответствии с кодом Грэя. Количество сигнальных точек N_{SP} в созвездии определяется позиционностью модуляции:

$$N_{SP} = M_{MOD}. \quad (12)$$

В результате для каждого PLP формируется последовательность модуляционных символов. Из них необходимо сформировать OFDM-символы.

2.1. Формирование кадров

Сформированный в модуле перемежения, кодирования и модуляции (BICM) цифровой сигнал поступает на формирователь кадра (Frame Builder) (рис. 1). Самый большой объект системы DVB-T2 – это суперкадр, который состоит из T2-кадров (рис. 6).

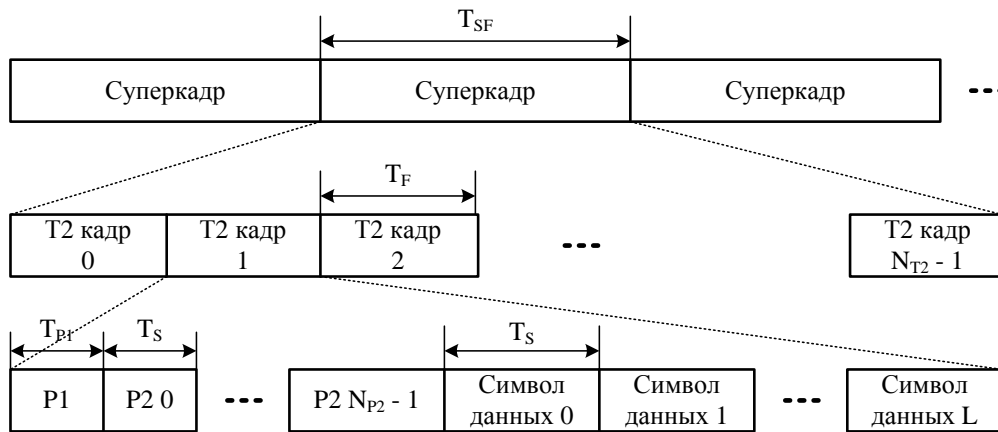


Рис. 6. Структура кадров в системе DVB-T2

Максимальное число T2-кадров в суперкадре равно 255. Максимальная длина T2-кадра $T_{FRAME_T2_MAX}$ составляет:

$$T_{FRAME_T2_MAX} = 250 \text{ мс}. \quad (13)$$

Однако все T2-кадры имеют одинаковую длину внутри суперкадра. T2-кадр состоит из символов OFDM, каждый из которых имеет активную длительность T_U . T2-кадр состоит из: преамбулы, состоящей из одного символа P1; второй преамбулы, состоящей из нескольких символов P2; настраиваемого количества символов данных (рис. 7).

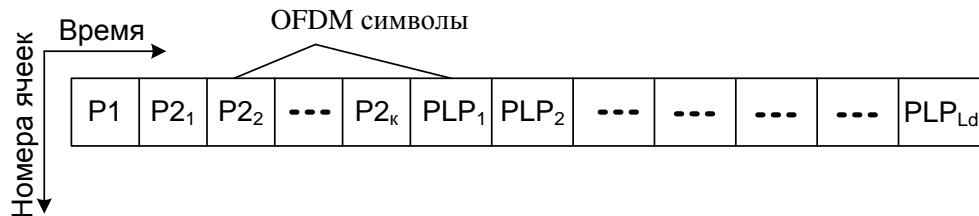


Рис. 7. Распределение фрагментов потоков в T2-кадре

Длительность T2-кадра определяется размером ОБПФ, защитным интервалом и числом используемых OFDM-символов. Максимально допустимая длительность T2-кадра составляет 250 мс, что накладывает ограничение на максимальное количество символов OFDM N_{OFDM_SYMB} для различных размеров БПФ и защитных интервалов (табл. 3). Длительность T2-кадра T_{T2_FRAME} вычисляется по формуле:

$$T_{T2_FRAME} = N_{OFDM_SYMB} \times T_S + T_{P1}, \quad (14)$$

где T_{OFDM_SYMB} – общая длина OFDM-символа, определяемая выражением:

$$T_{OFDM_SYMB} = T_U + T_{GI} = T_U \times (1 + GIF). \quad (15)$$

В (14) GIF – доля защитного интервала T_{GI} относительно активной длительности OFDM-символа T_U :

$$GIF = T_{GI} / T_U. \quad (16)$$

Длительность символа P1 составляет:

$$T_{P1} = 0.224 \text{ мс}. \quad (17)$$

Количество OFDM-символов в кадре T2 N_{OFDM_SYMB} включает все P2-символы N_{P2} и символы данных N_{DATA_SYMB} :

$$N_{OFDM_SYMB} = N_{P2} + N_{DATA_SYMB}. \quad (18)$$

При этом общее количество ячеек $C_{TOTAL_T2_FRAME}$ в кадре T2 будет равно:

$$C_{TOTAL_T2_FRAME} = N_{OFDM_SYMB} \cdot N_{SCF_USED}. \quad (19)$$

Кадр физического уровня DVB-T2 – T2-кадр (рис. 7) начинается с преамбулы P1. Этот OFDM-символ служит для синхронизации, идентификации потока DVB-T2, а также содержит семь информационных бит с начальной информацией о T2-кадре, а именно число номинальных поднесущих частот в OFDM-символе (1К – 32К) и формат передачи следующей за P1 преамбулы P2. Вся остальная информация о T2-кадре (длина данных, модуляция, скорость кодирования и т.п.) передается в преамбуле P2, которая может занимать несколько OFDM-символов. Далее следует поле данных (информационные OFDM-символы).

Максимальное число OFDM-символов N_{OFDM_SYMB} в кадре T2 можно определить из уравнений (14) – (19), учитывая, что $T_{T2_FRAME_MAX} = 250 \text{ мс}$:

$$N_{ODM_SYMB_MAX} = \frac{T_{T2_FRAME_MAX} - T_{P1}}{T_{OFDM_SYMB}} = \frac{T_{T2_FRAME_MAX} - T_{P1}}{T_U \times (1 + GIF)}. \quad (20)$$

Рассчитанное по выражению (20) максимальное число OFDM-символов N_{OFDM_SYMB} в кадре T2 приведено в табл. 3. В зависимости от параметров OFDM-символа в T2-кадре может быть от 60 до 2098 OFDM-символов при полосе передачи 8 МГц.

Таблица 3. Максимальное число OFDM-символов $N_{OFDM_SYMB_MAX}$ в кадре T2 для различных значений IFFT size и GIF для полосы канала 8 МГц, включая символы N_{P2} и символы данных N_{DATA_SYMB}

IFFT size	T_U (мс)	GIF						
		1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
32 К	3.584	68	66	64	64	60	60	Н.д.
16 К	1.792	138	135	131	129	123	121	111
8 К	0.896	276	270	262	259	247	242	223
4 К	0.448	Н.д.	540	524	51219	495	485	446
2 К	0.224	Н.д.	1081	1049	1038	991	970	892
1 К	0.112	Н.д.	Н.д.	2098	2076	1982	1941	1784

Количество символов P2 N_{P2} [2] зависит от размера ОБПФ и приведено в табл. 4.

Таблица 4. Зависимость числа символов P2 N_{P2} от размера БПФ

IFFT Size	N_{P2}
1 К	16
2 К	8
4 К	4
8 К	2
16 К	1
32 К	1

Исходя из проведённого анализа обработки сигнала в блоке формирования кадров T2, можно считать, что при оптимальном выборе количества символов OFDM в кадре T2 единственными символами OFDM, содержащими как служебную, так и пользовательскую информацию, являются символы P2 (табл. 5) [1].

Таблица 5. Количество ячеек пользовательских данных C_{P2} в одном символе P2

IFFT Size	C_{P2}
1 К	558
2 К	1118
4 К	2236
8 К	4472
16 К	8944
32 К	22432

2.2. Генерация OFDM-сигнала

После блока формирования кадров сигнал обрабатывается в блоке генерации OFDM-сигнала (рис. 1), структурная схема которого приведена на рис. 8.

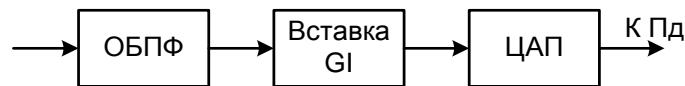


Рис. 8. Генерация OFDM-сигнала

Минимальное расстояние между поднесущими, при котором обеспечивается ортогональность передаваемых модулированных сигналов, равно:

$$\Delta f = 1/T_U, \quad (21)$$

где T_U – активная длительность символов модулирующего цифрового сигнала и OFDM.

Диапазон генерируемых частот лежит в пределах от 0 до f_{\max} , где максимальное значение частоты определяется как:

$$f_{\max} = N_{IFFT} \times \Delta f, \quad (22)$$

где N_{IFFT} – количество выборок (отсчётов) и количество частотных компонент N_{SCF_S} разложения при проведении преобразования Фурье (табл. 6).

Количество выборок (отсчётов) при ОБПФ выбирается равным

$$N_{IFFT} = 2^n > N_{SCF_USED}, \quad (23)$$

где N_{SCF_used} – количество используемых поднесущих частот – информационных и пилотных.

В стандарте DVB-T2 используются размеры ОБПФ 1К, 2К, 4К, 8К, 16К и 32К, где $K = 2^{10} = 1024$. Для размеров ОБПФ 8К, 16К и 32 К используются нормальный $N_{SCF_USED_NORM}$ и расширенный $N_{SCF_USED_EXT}$ режимы с разным числом поднесущих (табл. 6).

Таблица 6. Характеристики ОБПФ

IFFT Size	$N_{\text{IFFT}} = N_{\text{SCF}} \cdot \Sigma$	T_U , мс	Δf , Гц	$N_{\text{SCF_USED_NORM}}$	$N_{\text{SCF_USED_EXT}}$
1 K = 2^{10}	1024	0.112	8929	853	
2 K = 2^{11}	2048	0.224	4464	1705	
4 K = 2^{12}	4096	0.448	2232	3409	
8 K = 2^{13}	8192	0.896	1116	6816	6912
16 K = 2^{14}	16384	1.792	558	13632	13920
32 K = 2^{15}	32768	3.584	279	27264	27840

Из табл. 6 следует, что ширина спектра OFDM-сигнала при всех размерах ОБПФ равна:

$$BW = \Delta f \times N_{\text{SCF_USED}}. \quad (24)$$

Таким образом, спектр OFDM-сигнала можно разместить в эфирном радиоканале, предназначенном для ТВ-вещания, с полосой пропускания 8 МГц, обеспечивая между соседними радиоканалами защитные частотные интервалы по 0.39 МГц.

В составе используемых поднесущих $N_{\text{SCF_used}}$ (табл. 5), формируемых в блоке ОБПФ (рис. 8), помимо информационных поднесущих, предназначенных для передачи данных пользовательских пакетов N_{b_UP} , передаются пилотные поднесущие (PP – Pilot Pattern) (рис. 9).

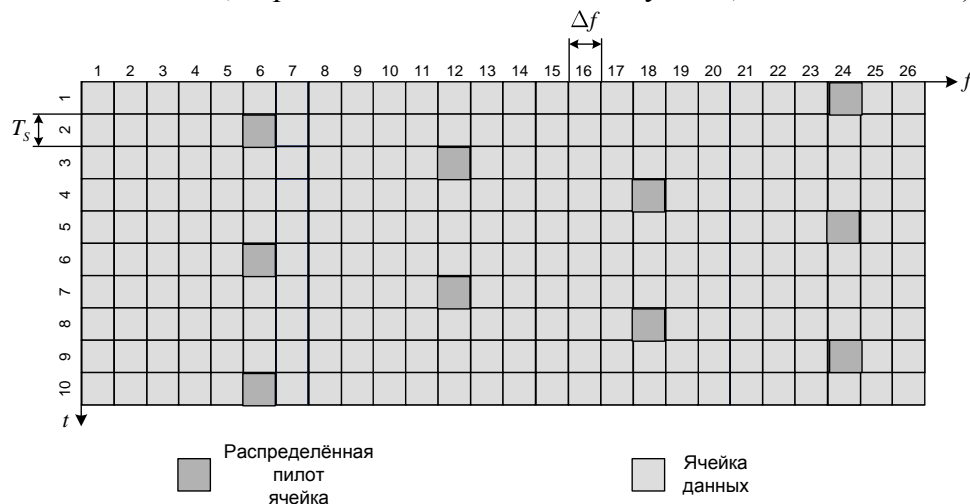


Рис. 9. Пример распределения информационных и пилотных ячеек в координатах частота–время (PP3)

Рассеянные пилотные ячейки заданной амплитуды и фазы вводятся в сигнал через равные промежутки как во временном, так и в частотном направлениях. Они используются приемником для оценки изменений отклика канала как во временном, так и в частотном измерениях.

В DVB-T2 формируются восемь последовательностей пилот-ячеек: PP1, PP2, ..., PP8 (табл. 7), которые могут быть выбраны в зависимости от размера БПФ и доли защитного интервала, принятых для конкретной передачи. Это позволяет уменьшать количество пилотных ячеек, то есть снижать долю служебных сигналов OH_{PP} , обеспечивая при этом достаточное качество оценки канала. Из табл. 6 следует, что переход от последовательности пилот-ячеек PP1 к последовательности PP8 позволяет уменьшить долю служебных сигналов с 8.33 % до 1.04 %.

Таблица 7. Доли служебных сигналов для разных последовательностей пилот-ячеек

Тип PP	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6	PP7	PP8
OH_{PP}	0.0833	0.0833	0.0417	0.0417	0.0208	0.0208	0.0104	0.0104
1- OH_{PP}	0.9167	0.9167	0.9583	0.9583	0.9792	0.9792	0.9896	0.9896

В блоке ОБПФ после формирования поднесущих частот производится их модуляция входным цифровым потоком, количество бит в каждой ячейке которого определяется позиционностью M_{MOD} используемой модуляции (11).

После обработки сигнала в блоке ОБПФ он поступает в блок добавления защитного интервала (Guard Interval) (рис. 8). Из-за многолучёвости в среде распространения возникают межсимвольные помехи, которые снижают помехоустойчивость приёма. Борьбаться с межсимвольными помехами можно путём введения защитного временного интервала T_{GI} , во время действия которого приёмник закрыт.

Следовательно, при введении защитного интервала OFDM-символ T_S будет иметь длительность:

$$T_{OFDM_SYMB} = T_U + T_{GI}. \quad (25)$$

При этом доля активной части символа T_U составит:

$$T_{U_FRACT} = \frac{T_U}{T_S} = \frac{T_U}{T_U + T_{GI}}. \quad (26)$$

В табл. 8 приведены результаты расчётов по выражению (26) доли активной части символа.

Таблица 8. Параметры OFDM-символа при полосе канала 8 МГц, $T_U = 0.896$ мс

T_{GI}/T_U	1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
T_{GI} , ms	0.007	0.028	0.056	0.0665	0.112	0.133	0.224
T_{U_FRACT}	0.9922	0.9697	0.9418	0.931	0.8889	0.8707	0.8

Из табл. 8 следует, что введение защитного интервала уменьшает скорость передачи пользовательской информации от 0.8 % при $T_{GI}/T_U = 1/128$ до 20 % при $T_{GI}/T_U = 1/4$.

3. Определение скорости передачи данных

В подразделе 2 были рассмотрены все этапы обработки сигнала в стандарте DVB-T2, влияющие на скорость передачи пользовательской информации: доля служебной информации в кадре T_2 – OH_{FBB_FRAME} , N_{P2} ; скорость избыточного кодирования $R_{c_FEC} = R_{c_VCH} \times R_{c_LDPC}$; количество используемых поднесущих частот N_{SCF_USED} ; позиционность модуляции M_{MOD} ; доля пилотных поднесущих в используемых поднесущих частотах OH_{FP} ; доля активной части символа T_{U_FRACT} .

Исходя из структуры сигнала DVB-T2, определим скорость передачи T_2 -кадров (9), учитывая, что частота следования кадров $f_{T_2_FRAME}$ численно равна скорости передачи кадров $R_{T_2_FRAME}$:

$$R_{T_2_FRAME} = \frac{1}{T_{T_2_FRAME}} = \frac{1}{N_{OFDM_SYMB} \times T_S + T_{P1}} = \frac{1}{N_{OFDM_SYMB} \times T_U \times (1 + GIF) + T_{P1}} \quad (27)$$

С учётом того, что в каждом из N_{OFDM_SYMB} символов кадра T_2 содержится количество ячеек N_{CELL} , равное количеству используемых поднесущих частот N_{SCF_USED} , определим скорость передачи (27) с учётом числа ячеек:

$$\begin{aligned} R_{T_2_CELL} &= N_{OFDM_SYMB} \times R_{T_2_FRAME} \times N_{CELL} = N_{OFDM_SYMB} \times R_{T_2_FRAME} \times N_{SCF_USED} = \\ &= \frac{N_{OFDM_SYMB} \times N_{SCF_USED}}{\left[N_{OFDM_SYMB} \times T_U \times (1 + GIF) + T_{P1} \right]}. \end{aligned} \quad (28)$$

Учитывая, что в одной ячейке передаётся $\gamma = \log_2 M_{MOD}$ бит, суммарная битовая скорость передачи с учётом всех ячеек будет равна:

$$R_{b\Sigma} = \frac{N_{OFDM_SYMB} \times N_{SCF_USED} \times \log_2 M_{MOD}}{\left[N_{OFDM_SYMB} \times T_U \times (1 + GIF) + T_{P1} \right]}. \quad (29)$$

Скорость передачи пользовательской информации R_{b_UP} уменьшается относительно суммарной скорости передачи $R_{b\Sigma}$ из-за необходимости: передавать служебную информацию в сигнале основной полосы ОНФ_{BB_FRAME}, в кадре T2 N_{P2} , в пилот сигналах ОНФ_{PP}; вводить избыточное кодирование FEC $R_{cFEC} = R_{cBCH} \times R_{cLDPC}$ и защитный интервал T_{U_FRACT} :

$$R_{b_UP} = \left[\frac{\log_2 M_{MOD}}{\left[N_{OFDM_SYMB} \times T_U \times (1 + GIF) + T_{P1} \right]} \right] \times (1 - OHF_{BB_FRAME}) \times R_{c_BCH} \times R_{c_LDPC} \times (1 - OHF_{PP}) \times T_{U_FRACT} \times \left[(N_{OFDM_SYMB} - N_{P2}) \times N_{SCF_USED} + N_{P2} \times C_{P2} \right]. \quad (30)$$

В [2] получены результаты расчётов самой высокой скорости передачи пользовательской информации R_{b_UP} в канале с полосой частот 8 МГц, которая достигается при размере ОБПФ, равном 32К; относительной величине защитного интервала $GIF = 1/128$; режиме расширенного варианта поднесущих частот; последовательности пилот-тонов PP7; различных комбинациях позиционности модуляции и скорости кода; количестве модуляционных символов L_F в кадре T2 $L_F = 60$. При позиционности модуляции $M_{mod} = 256$ и скорости внутреннего кода $R_{cLDPC} = 5/6$ скорость передачи данных равна $R_{bUP} = 50.3245$ Мбит/с [2].

Для проверки корректности предложенной методики с использованием выражений (1) – (30) и табл. (1) – (8) рассчитаем скорость передачи пользовательских данных для тех же параметров, что и в [2]. Подставим эти значения в выражение (24):

$$R_{b_UP} = \left[\frac{8}{\left[60 \times 3.584 \times 10^{-3} \times \left(1 + \frac{1}{128} \right) + 0.224 \cdot 10^{-3} \right]} \right] \times (1 - 0.0017) \times 0.996 \times \frac{5}{6} \cdot (1 - 0.0104) \times 0.9922 \times \left[(60 - 1) \times 27840 + 1 \times 22432 \right] = 50.3088 \text{ Мбит/с}.$$

Погрешность результатов расчётов по предложенной методике относительно результатов, полученных в [2], составляет $\Delta R_{b_UP} = 0.03$ %.

Таким образом, вместо использования достаточно громоздких и сложных формул, приведённых в [2], расчёты скоростей передачи пользовательских данных для различных сочетаний параметров стандарта DVB-T2 можно проводить по предложенной методике.

3.1. Выбор длины кадра

Из выражения (30) для определения скорости передачи пользовательских данных следует, что скорость зависит от длины кадра – числа OFDM-символов в нём N_{OFDM_SYMB} :

$$R_{b_UP} = \left[\frac{\log_2 M_{MOD}}{\left[N_{OFDM_SYMB} \times T_U \times (1 + GIF) + T_{P1} \right]} \right] \times (1 - OHF_{SERVICE_DATA}) \times \left[(N_{OFDM_SYMB} - N_{P2}) \times N_{SCF_USED} + N_{P2} \times C_{P2} \right]. \quad (31)$$

В (31) величина снижения скорости передачи пользовательских данных из-за передачи служебных данных, не зависящая от длины кадра, равна:

$$(1 - OHF_{SERVICE_DATA}) = \left[(1 - OHF_{BB_FRAME}) \times R_{c_BCH} \times R_{c_LDPC} \times (1 - OHF_{PP}) \times T_{U_FRACT} \right]. \quad (32)$$

Из выражения (31) следует, что с увеличением длины кадра скорость передачи пользовательских данных пропорциональна длине кадра, умноженной на количество ячеек в OFDM-символе N_{SCF_USED} , и обратно пропорциональна длине кадра, умноженной на длительность символа T_{OFDM_SYMB} . Поскольку численное значение количества ячеек в OFDM-символе, изменяющееся от 1024 при 1К до 32768 при 32К (табл. 6), много больше длительности символа, изменяющейся от 0.112×10^{-3} до 6.272×10^{-3} с, то с увеличением длины кадра скорость будет возрастать, так как доля служебной информации не зависит от длины кадра и, следовательно, будет уменьшаться.

С использованием выражения (30) рассчитаем зависимость скорости передачи пользовательских данных от числа OFDM-символов в T2-кадре для параметров канала стандарта DVB-T2: полоса частот $BW = 8$ МГц; размер ОБПФ 8КН; относительная величина защитного интервала $GIF = 1/4$; режим нормального варианта поднесущих частот; последовательность пилот-тонов PP7; позиционность модуляции $M_{MOD} = 64$; скорость кода $R_{LDPC} = 3/4$; длина FEC-кадра 64800 бит. Результаты расчётов приведены на рис. 10.

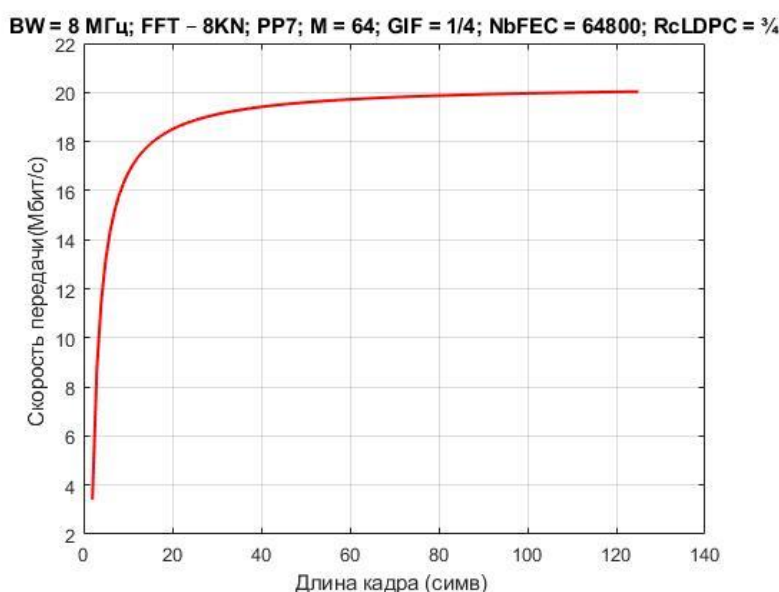


Рис. 10. Зависимость скорости передачи от числа OFDM-символов в T2-кадре

Из рис. 10 следует, что в кривой зависимости скорости передачи от числа OFDM-символов в T2-кадре при длине кадра $N_{OFDM_SYMB} = 100$ наступает «насыщение», т.е. при дальнейшем увеличении длины кадра T2 скорость передачи пользовательских данных почти не изменяется.

В табл. 9 приведены изменения скорости передачи от длины кадра при длине кадра $N_{OFDM_SYMB} \geq 100$.

Таблица 9. Изменения скорости передачи от длины кадра при $N_{OFDM_SYMB} \geq 100$

N_{OFDM_SYMB}	100	105	110	115	120	123
R_{b_UP} , Мбит/с	19.96	19.98	20.00	20.01	20.02	20.03
ΔR_{b_UP}		0.001	0.001	0.0005	0.0005	0.0005

Из табл. 9 следует, что оптимальным диапазоном длины кадра T2 является $N_{OFDM_SYMB} = 100 - 110$, так как при дальнейшем увеличении длины кадра скорость передачи увеличивается не более чем на 0.01 %.

Разработанная методика определения скорости передачи пользовательских данных в стандарте наземного цифрового телевизионного вещания DVB-T2 может быть использована для систем связи, в которых используется технология ортогонального частотного мультиплексирования, например, WiMAX, LTE, Wi-Fi.

Литература

1. ETSI EN 302 755 V1.3.1 (2011-11) Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2).
2. ETSI TS 102 831 V1.2.1 (2012-08) Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2).
3. *Носов В. И.* Обработка сигналов при ортогональном частотном мультиплексировании: учебное пособие. УМО по направлению «Телекоммуникации». Новосибирск: СибГУТИ, 2012. 352 с.
4. *Шахнович И. В.* DVB-T2 – новый стандарт цифрового телевизионного вещания // Связь и телекоммуникации. 2009. № 6. С. 30–35.

Статья поступила в редакцию 24.01.2021.

Носов Владимир Иванович

д.т.н., профессор кафедры систем радиосвязи СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 2-698-254, e-mail: nvi@sibsutis.ru.

Зиновьев Максим Вячеславович

аспирант кафедры систем радиосвязи СибГУТИ, e-mail: neo136@list.ru.

Ладан Александра Сергеевна

аспирант кафедры систем радиосвязи СибГУТИ, e-mail: lad_al@mail.ru.

Features of determining the parameters of digital television broadcasting

V. Nosov, M. Zinoviev, A. Ladan

The DVB-T 2 terrestrial digital television broadcasting standard allows to use a wide range of user data transfer rates. In the literature, rather cumbersome and complex formulas for calculating the transfer rates of user data are given. The article offers a simple method for determining the optimal user data transfer rate based on simple and understandable formulas founded on the sequence of user data processing in the DVB-T2 standard.

Keywords: DVB-T2 standard, user data transfer rate, redundant encoding, guard interval.