

Определение оптимальной длины кадра в сети наземного цифрового телевизионного вещания

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

В работе предлагается простая методика определения оптимальной длины кадра в стандарте DVB-T2, основанная на простых и понятных формулах, в основу которых положена последовательность обработки пользовательских данных в стандарте DVB-T2. В T2-кадре всегда должно быть целое число FEC-блоков, оставшиеся ячейки, которые не составляют целый FEC-блок, как правило, будут фиктивными ячейками и представляют собой потерю скорости. В результате общая скорость передачи битов и глубина перемежения в мельчайших деталях зависят от точного количества OFDM-символов, а следовательно, и ячеек в T2-кадре.

Ключевые слова: стандарт DVB-T2, T2-кадр, OFDM-символ, FEC-блок, фиктивные ячейки, глубина перемежения, оптимальная длина кадра.

1. Введение

Несмотря на то, что увеличение длины кадра уменьшает накладные расходы преамбулы, существует эффект второго порядка, который должен быть учтён при выборе оптимального количества OFDM-символов в T2-кадре. OFDM-символ состоит из ячеек, количество бит в каждой из которых определяется позиционностью модуляции. Количество ячеек в одном OFDM-символе определяется числом используемых поднесущих частот (Subcarrier Frequency, SCF). В T2-кадре число FEC-блоков всегда должно быть целым, оставшиеся ячейки, которые не составляют целый FEC-блок, как правило, будут фиктивными (пустыми, dummy) ячейками и представляют собой потерю емкости [1, 5]. В результате общая скорость передачи битов и глубина перемежения в мельчайших деталях зависят от точного количества символов, а следовательно, и ячеек в кадре. Изменение длины кадра на один символ часто может привести к изменению глубины перемежения и общей скорости передачи битов за счет уменьшения количества фиктивных ячеек. Увеличение глубины перемежения OFDM-символов позволяет увеличить помехоустойчивость приёма при наличии селективных замираний сигнала в канале при распространении радиоволн. Для решения поставленной задачи определения оптимального количества OFDM-символов в T2-кадре необходимо детально рассмотреть работу блока временного перемежения (Time Interleaving, TI).

В данной работе предлагается простая методика определения оптимальной длины кадра с точки зрения глубины перемежения и скорости передачи в стандарте DVB-T2, основанная на простых и понятных формулах, в основу которых положена последовательность обработки пользовательских данных в стандарте DVB-T2.

2. Определение глубины перемежения символов в кадре T2

Вход в систему T2 (рис. 1) осуществляется одним или несколькими транспортными потоками данных TS (Transport Stream, TS). Транспортный поток TS – это последовательность

пользовательских пакетов (User Packet, UP) фиксированной длины: $UP_L = 188 \times 8$ бит (один MPEG-пакет).

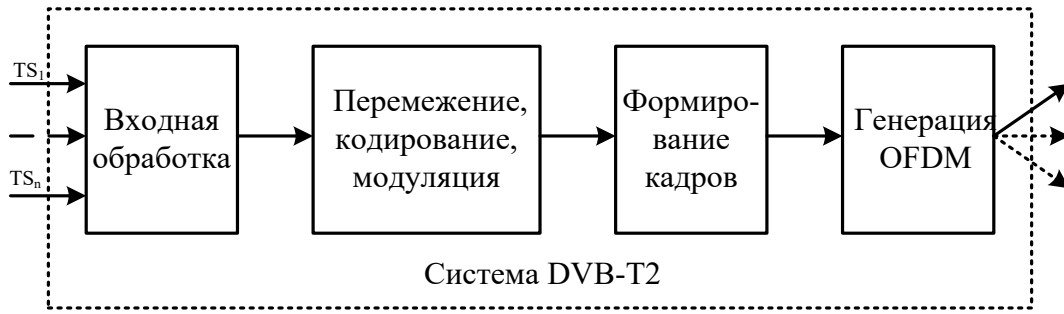


Рис. 1. Обобщенная схема обработки передаваемых сигналов в системе DVB-T2

После обработки сигнала в модуле адаптации («Входная обработка» на рис. 1) сигналы потоков поступают на обработку в модуль перемежения бит, кодирования и модуляции (Bit Interleaving Coding Modulation, BICM) (рис. 1). На рис. 2 представлена схема обработки одного потока в блоке BICM.

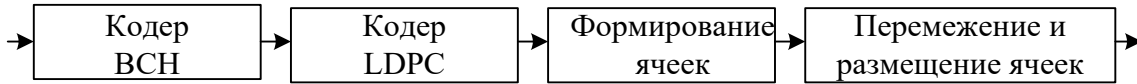


Рис. 2. Модуль с перемежением, кодированием и модуляцией (BICM)

Первый блок в модуле BICM – кодер FEC, где добавляются избыточные биты, которые используются в декодере FEC для обнаружения и исправления ошибочных бит. В результате на выходе кодера формируется кадр FEC (FEC_FRAME). В DVB-T2 системе используется каскадное кодирование, где в качестве внешнего кода используется блочный код BCH, а внутреннего – низкоплотностный код LDPC (рис. 2, 3).

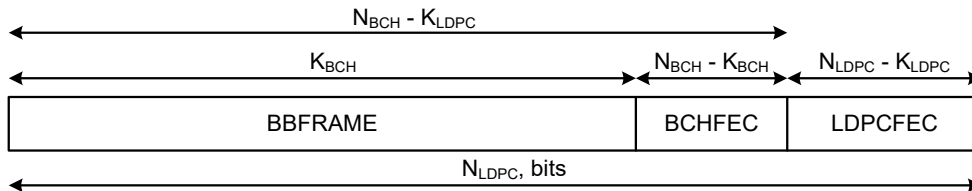


Рис. 3. Формат данных на выходе кодера FEC

Из последовательности обработки пользовательских данных в стандарте DVB-T2 (рис. 2, 3) следует, что скорость внешнего кода BCH зависит от скорости внутреннего кода LDPC R_{LDPC} , на выходе которого всегда получается нормальный блок FEC (BLOCK_FEC) одинаковой длительности [1, 5]:

$$N_{b_BLOCK_FEC} = N_{b_LDPC} = 64800 \text{ бит.} \quad (1)$$

Количество ячеек (cells) в блоке FEC зависит от позиционности модуляции M_{mod} , используемой в стандарте DVB-T2:

$$N_{CELL_IN_BLOCK_FEC} = \frac{N_{b_BLOCK_FEC}}{\log_2 M_{mod}}. \quad (2)$$

Для решения поставленной задачи определения оптимального количества OFDM-символов в T2-кадре необходимо детально рассмотреть работу блока временного перемежения. Блоки FEC с выхода перемежителя ячеек должны быть сгруппированы в чередующиеся TI-блоки, которые отображаются на один T2-кадр (рис. 4). Каждый кадр перемежения (Interliving Frame, IF) должен содержать динамически изменяемое целое число блоков FEC. Количество блоков FEC $N_{\text{BLOCK_FEC_IN_TI_BLOCK}}$ в TI-блоке временного перемежения может варьироваться от минимального значения 0 до максимального значения $N_{\text{MAX_BLOCK_FEC_IN_TI_BLOCK}}$.

Каждый кадр перемежения отображается непосредственно на один T2-кадр. Каждый кадр перемежения также разделен на один или несколько (N_{TI}) TI-блоков, где TI-блок соответствует одному использованию памяти временного перемежителя. TI-блоки внутри кадра перемежения могут содержать разное количество блоков FEC. Если кадр перемежения разделен на несколько TI-блоков, он должен быть сопоставлен только одному T2-кадру (рис. 4).

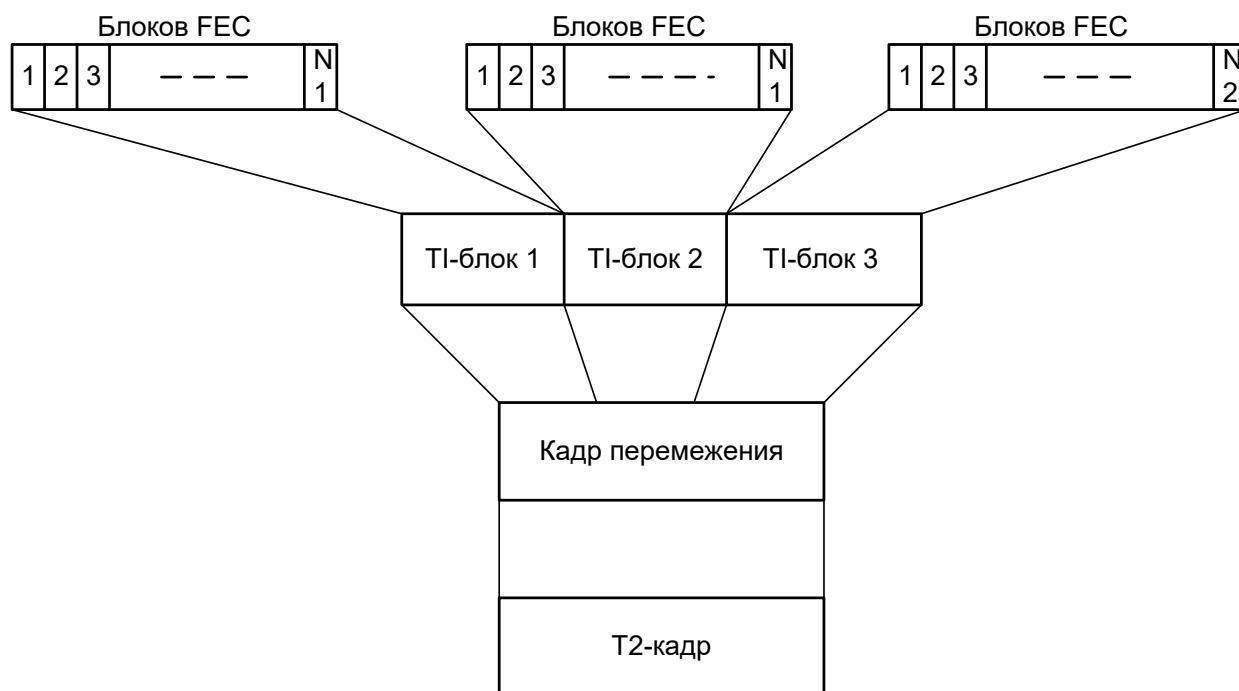


Рис. 4. Структура временного перемежения в T2-кадре

Блок временного перемежения TI (рис. 5) должен быть перемежителем блоков строк и столбцов. Число строк N_r в TI-блоке перемежения равно числу ячеек в блоке FEC ($N_{\text{CELLS_IN_BLOCK_FEC}}$), деленному на 5:

$$N_{\text{row_IN_TI}} = \frac{N_{\text{CELL_IN_BLOCK_FEC}}}{5}. \quad (3)$$

Количество строк в TI-блоке перемежения зависит от позиционности модуляции (табл. 1).

Таблица 1. Параметры для временного перемежителя

Длина блока FEC, бит	Позиционность модуляции	Количество ячеек в FEC-блоке	Количество строк в блоке временного перемежения
64800	256-QAM	8100	1620
	64-QAM	10800	2160
	16-QAM	16200	3240
	QPSK	32400	6480

Графическое представление временного перемежителя показано на рис. 5. Первый блок FEC записывается по столбцам в первые 5 столбцов временного перемежителя, второй блок FEC записывается по столбцам в следующие 5 столбцов и так далее. Ячейки считываются по строкам.

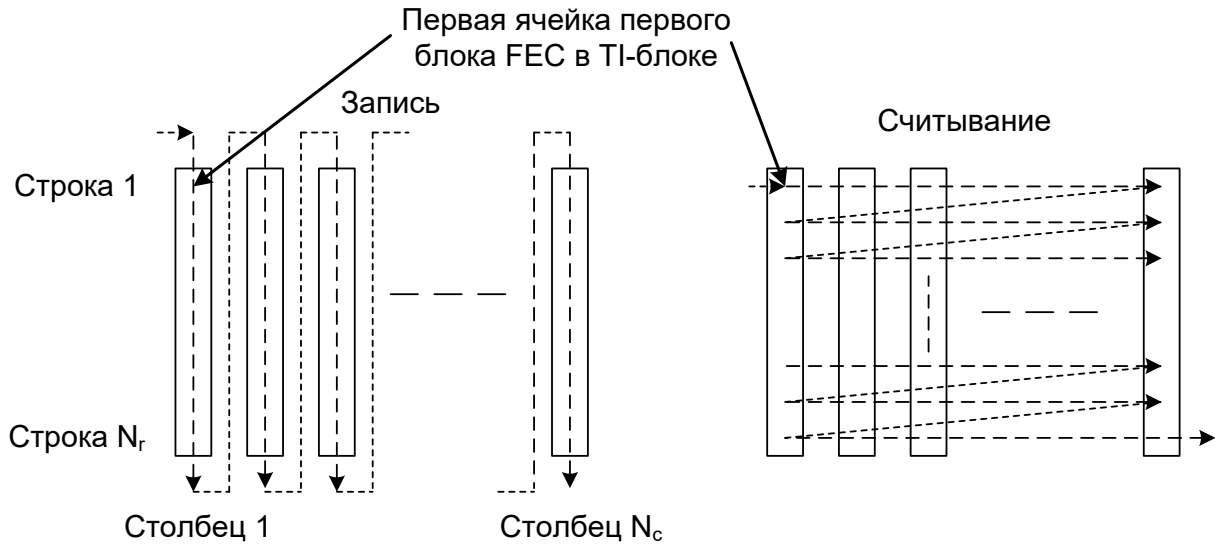


Рис. 5. Блок временного перемежения TI

Число столбцов в TI-блоке перемежения N_{COLLS} определяется количеством блоков FEC в TI-блоке перемежения $N_{BLOCK_FEC_IN_TI}$:

$$N_{COLLS_IN_TI} = 5 \times N_{BLOCK_FEC_IN_TI}. \quad (4)$$

Количество блоков FEC в TI-блоке перемежения зависит от ёмкости блока и количества OFDM-символов в T2-кадре. Максимальное количество ячеек памяти в одном блоке временного перемежителя [1]:

$$N_{CELL_MAX_IN_TI} = 2^{19} + 2^{15} = 557056 \text{ ячеек}. \quad (5)$$

Максимальное количество блоков FEC, которое можно разместить в одном блоке временного перемежителя равно:

$$N_{BLOCK_FEC_in_TI} = \frac{N_{CELL_MAX_IN_TI}}{C_{BLOCK_FEC}}. \quad (6)$$

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).

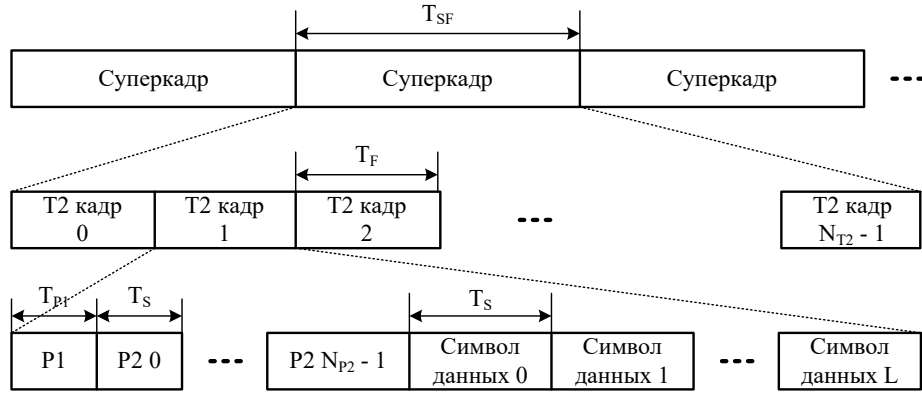


Рис. 6. Структура кадров в системе DVB-T2

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

$$T_{FRAME_T2_MAX} = 250 \text{ мс}. \quad (7)$$

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 PLP_i (рис. 7).

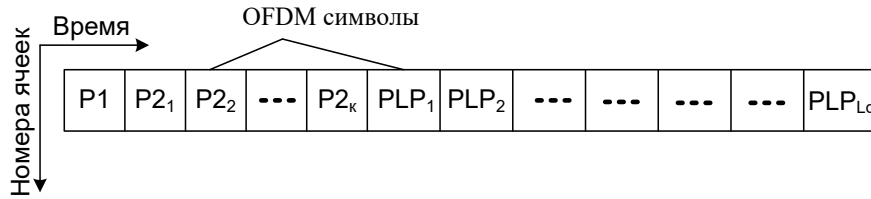


Рис. 7. Распределение фрагментов потоков в T2-кадре

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. 2). Длительность T2-кадра T_{T2_FRAME} вычисляется по формуле:

$$T_{T2_FRAME} = N_{OFDM_SYMB} \times T_S + T_{P1}, \quad (8)$$

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

$$T_{OFDM_SYMB} = T_S = T_U + T_{GI} = T_U \times (1 + GIF). \quad (9)$$

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

$$GIF = T_{GI} / T_U. \quad (10)$$

Длительность символа P1 составляет:

$$T_{P1} = 0.224 \text{ мс} . \quad (11)$$

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

$$N_{\text{OFDM_SYMB}} = N_{P2} + N_{\text{DATA_SYMB}} . \quad (12)$$

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

$$C_{\text{TOTAL_T2_FRAME}} = N_{\text{OFDM_SYMB}} \cdot N_{\text{SCF_USED}} . \quad (13)$$

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 (1K–32K) 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 $N_{\text{OFDM_SYMB}}$ в кадре T2 можно определить из уравнений (14) – (19), учитывая, что $T_{\text{T2_FRAME_MAX}} = 250 \text{ мс}$:

$$N_{\text{ODM_SYMB_MAX}} = \frac{T_{\text{T2_FRAME_MAX}} - T_{P1}}{T_{\text{OFDM_SYMB}}} = \frac{T_{\text{T2_FRAME_MAX}} - T_{P1}}{T_U \times (1 + \text{GIF})} . \quad (14)$$

Рассчитанное по выражению (14) максимальное число OFDM-символов $N_{\text{OFDM_SYMB}}$ в кадре T2 приведено в табл. 2. В зависимости от параметров OFDM-символа в T2-кадре может быть от 60 до 2098 OFDM-символов при полосе передачи 8 МГц.

Таблица 2. Максимальное число OFDM-символов $N_{\text{OFDM_SYMB_MAX}}$ в кадре T2 для различных значений IFFT size и GIF для полосы канала 8 МГц, включая символы N_{P2} и символы данных $N_{\text{DATA_SYMB}}$

IFFT size	T_U (ms)	GIF						
		1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
32 K	3.584	68	66	64	64	60	60	н.д.
16 K	1.792	138	135	131	129	123	121	111
8 K	0.896	276	270	262	259	247	242	223
4 K	0.448	н.д.	540	524	51219	495	485	446
2 K	0.224	н.д.	1081	1049	1038	991	970	892
1 K	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. 3.

Таблица 3. Зависимость числа символов P2 N_{P2} от размера БПФ

IFFT Size	N_{P2}
1 K	16
2 K	8
4 K	4
8 K	2
16 K	1
32 K	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. 4) [1].

Таблица 4. Количество ячеек пользовательских данных C_{P2} в одном символе P2

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

В DVB-T2 формируются 8 последовательностей пилот-ячеек PP1, PP2, ..., PP8 (табл. 5), которые могут быть выбраны в зависимости от размера БПФ и доли защитного интервала, принятых для конкретной передачи.

С учётом используемой последовательности пилот-ячеек изменяется количество доступных ячеек данных C_{data} в одном OFDM-символе (табл. 5).

Таблица 5. Количество доступных ячеек данных C_{data} в одном OFDM-символе

FFT size		C_{data} , cells							
		PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6	PP7	PP8
1K		764	768	798	804	818			
2K		1522	1532	1596	1602	1632		1646	
4K		3084	3092	3228	3234	3298		3328	
8K	Norm	6208	6298	6584	6588	6728		6698	6698
	Extend	6296	6298	6584	6588	6728		6788	6788
16K	Norm	12418	12436	12988	13002	13272	13288	13416	13406
	Extend	12678	12698	13262	13276	13552	13568	13698	13688
32K	Norm		24886		26022		26592	26836	26812
	Extend		25412		26572		27152	27404	27376

При расчёте нужно учесть фиктивные ячейки, которые появятся, если в T2-кадре количество блоков временного перемежения будет не целое.

Количество OFDM-символов данных L_F (длина кадра) в T2-кадре:

$$N_{OFDM_SYMB} = L_F = N_{P2} + L_{data} \cdot \quad (15)$$

Из (15) следует, что количество символов данных равно:

$$L_{data} = L_F - N_{P2} \cdot \quad (16)$$

Общее количество ячеек данных в T2-кадре:

$$C_{total_T2_F} = N_{P2} \cdot C_{P2} + L_{data} \cdot C_{data} \cdot \quad (17)$$

Количество ячеек $C_{P2} = \theta(FFT_{size})$ и $C_{data} = \theta(FFT_{size}, PP)$ берутся из табл. 9 и 10 [1], причём C_{data} – без учёта пилот-ячеек. Здесь FFT_{size} – размер преобразования Фурье, PP – пилот-ячейки.

Подставляя (6) в (4), определим количество FEC-блоков в кадре T2:

$$N_{BLOCK_FEC_in_T2} = \frac{N_{P2} \cdot C_{P2} + L_{data} \cdot C_{data}}{C_{BLOCK_FEC}}. \quad (18)$$

Максимальное количество блоков FEC, которое можно разместить в одном блоке временного перемежителя, с учётом выражения (5) равно

$$N_{MAX_BLOCK_FEC_in_TI} = \frac{N_{C_MAX_TI}}{C_{BLOCK_FEC}}. \quad (19)$$

Из выражений (18) и (19) определим максимальное количество блоков временного перемежения N_{TI_MAX} в кадре T2:

$$N_{TI_MAX} = \frac{N_{BLOCK_FEC_in_T2}}{N_{MAX_BLOCK_FEC_in_TI}}. \quad (20)$$

Длительность кадра T2 определяется произведением количества OFDM-символов $N_{OFDM_SYMB} = L_F$ и длительности одного OFDM-символа:

$$T_{FRAME_T2} = N_{OFDM_SYMB} \times T_{OFDM_SYMB}. \quad (21)$$

Длительность одного OFDM-символа определяется в (9), при этом доля активной части символа T_U составит:

$$T_{U_FRACT} = \frac{T_U}{T_S} = \frac{T_U}{T_U + T_{GI}}. \quad (22)$$

Время, отводимое на один блок временного перемежения (глубина перемежения), будет равно:

$$T_{TI} = \frac{T_{FRAME_T2}}{N_{TI}}. \quad (23)$$

Количество блоков FEC в одном блоке временного перемежения равно:

$$N_{BLOCK_FEC_IN_TI} = \frac{N_{BLOCK_FEC_MAX_IN_TI} \times N_{OFDM_SYMB_IN_TI}}{N_{OFDM_SYMB_MAX_IN_TI}}. \quad (24)$$

Глубина перемежения в символах с учётом (10) и (11) будет равна:

$$N_{SYMB_int_depth} = \frac{T_{TI}}{T_{OFDM_SYMB}} = \frac{T_{FRAME_T2}}{N_{TI} [T_U \times (1 + GIF)]}. \quad (25)$$

При этом количество блоков временного перемежения N_{TI} в кадре T2 с заданным числом OFDM-символов L_F в нём можно определить с использованием выражения:

$$N_{TI_in_T2F} = \frac{N_{OFDM_SYMB_in_T2F}}{N_{MAX_OFDM_SYMB_in_TI}} = \frac{L_F}{N_{MAX_OFDM_SYMB_in_TI}}. \quad (26)$$

В (26) максимальное количество OFDM-символов в блоке временного перемежения можно определить по выражению:

$$N_{MAX_OFDM_SYMB_in_TI} = \frac{N_{C_MAX_TI}}{N_{C_in_OFDM_SYMB}} = \frac{N_{C_MAX_TI}}{N_{SCF_in_OFDM_SYMB}}. \quad (27)$$

Из (24) определим количество фиктивных ячеек, используя десятичные знаки количества блоков FEC в T2-кадре:

$$C_{dummy} = (N_{BLOCK_FEC_in_T2F} - N_{BLOCK_FEC_IN_TI} \times N_{TI_in_T2F}) \cdot C_{BLOCKFEC}. \quad (28)$$

При этом количество ячеек данных в T2-кадре (17) с учётом фиктивных ячеек составит:

$$C_{T2F} = N_{P2} \cdot C_{P2} + L_{data} \cdot C_{data} - C_{dummy}. \quad (29)$$

Уменьшение скорости передачи пользовательских данных из-за использования фиктивных ячеек составит:

$$\Delta R_{bUP} = \frac{C_{T2F}}{C_{totalT2F}} = \frac{N_{P2} \cdot C_{P2} + L_{data} \cdot C_{data} - C_{dummy}}{N_{P2} \cdot C_{P2} + L_{data} \cdot C_{data}}. \quad (30)$$

Скорость передачи пользовательской информации R_{b_UP} [5] уменьшается относительно суммарной скорости передачи $R_{b\Sigma}$ из-за необходимости: передавать служебную информацию в сигнале основной полосы OHF_{BB_FRAME} , в кадре T2 N_{P2} , в пилот-сигналах OHF_{PP} ; вводить избыточное кодирование FEC $R_{cFEC} = R_{cBCH} \times R_{cLDPC}$ и защитный интервал T_{U_FRAC} :

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

На основе полученных выражений (1) ÷ (31) определим глубину перемежения OFDM-символов и скорость передачи пользовательской информации для следующих условий [5]:

- полоса частот 8 МГц;
- $FFT_{SIZE} = 32KE$;
- $N_{b_LDPC} = 64800$;
- $M_{mod} = 256$;
- $N_{P2} = 1$;
- $C_{P2} = 22432$;
- $C_{data} = 27404$;
- $T_U = 3.584$ мс;
- $GIF = 1/128$;
- $N_{SCF} = 27840$;
- $R_{c_LDPC} = 3/5$;

- $T_{PI} = 0.224$ мс;
- $T_U = 3.584$ мс;
- $(1 - OHF_{BB_FRAME}) = 0.9985$;
- $R_{C_BCH} = 0.997$;
- $(1 - OHF_{PP7}) = 0.9896$;
- $T_{U_FRACT} = 0.9922$.

Максимальное количество OFDM-символов в одном блоке временного перемежения в соответствии с (27) равно:

$$N_{OFDM_SYMB_MAX_IN_TI} = \frac{N_{C_MAX_TI}}{N_{SCF_in_OFDM_SYMB}} = \frac{557056}{27840} = 20.009 \Rightarrow 20. \quad (32)$$

Максимальное количество блоков FEC в одном блоке временного перемежения в соответствии с (6) равно:

$$N_{BLOCK_FEC_MAX_IN_TI} = \frac{N_{C_MAX_TI}}{C_{BLOCK_FEC}} = \frac{557056}{8100} = 68.772 \Rightarrow 68. \quad (33)$$

Количество строк в одном блоке временного перемежения в соответствии с (3) равно:

$$N_{ROW_IN_TI} = \frac{C_{BLOCK_FEC}}{5} = \frac{8100}{5} = 1620. \quad (34)$$

В [1, 5] для рассматриваемых условий выбрана длина кадра T_2 , содержащая $L_F = 60$ OFDM-символов. Для этого случая в соответствии с выражениями (26) и (27) получим необходимое число блоков временного перемежения в кадре T_2 :

$$N_{TI_in_T2F} = \frac{L_F}{N_{OFDM_SYMB_MAX_IN_TI}} = \frac{60}{20} = 3. \quad (35)$$

При длине кадра T_2 , содержащего $L_F = 55$ OFDM-символов, получим необходимое число блоков временного перемежения:

$$N_{TI_in_T2F} = \frac{L_F}{N_{OFDM_SYMB_MAX_IN_TI}} = \frac{55}{20} = 2.75 = 3. \quad (36)$$

При длине кадра T_2 , содержащего $L_F = 65$ OFDM-символов, получим необходимое число блоков временного перемежения:

$$N_{TI_in_T2F} = \frac{L_F}{N_{OFDM_SYMB_MAX_IN_TI}} = \frac{65}{20} = 3.25 = 4. \quad (37)$$

При этом в каждом блоке временного перемежения TI при заданном числе символов будет содержаться следующее количество OFDM-символов:

$$N_{OFDM_SYMB_IN_TI} = \frac{L_F}{N_{TI_in_T2F}}. \quad (38)$$

В соответствии с (38) количество OFDM-символов в одном блоке временного перемежения ТІ при заданном числе символов L_F в кадре Т2:

$$\begin{aligned} L_F = 55, N_{OFDM_S_IN_TI} = 18; L_F = 60, N_{OFDM_S_IN_TI} = 20; L_F = 65, \\ N_{OFDM_S_IN_TI} = 16 \end{aligned} \quad (39)$$

Полученное в (39) количество OFDM-символов в одном блоке временного перемежения ТІ *определяет глубину перемежения* этих символов.

Теперь определим количество фиктивных ячеек, которое будет создано во всех блоках $N_{TI_in_T2F}$ временного перемежения в кадре Т2.

Сначала определим с учётом выражений (32) и (33) количество блоков FEC в одном блоке временного перемежения ТІ:

$$N_{BLOCK_FEC_IN_TI} = \frac{N_{BLOCK_FEC_MAX_IN_TI} \times N_{OFDM_SYMB_IN_TI}}{N_{OFDM_SYMB_MAX_IN_TI}}. \quad (40)$$

В соответствии с (40) количество блоков FEC в одном блоке временного перемежения ТІ при заданном числе символов L_F в кадре Т2 будет равно:

$$L_F = 55, N_{FEC_IN_TI} = 61; L_F = 60, N_{FEC_IN_TI} = 68; L_F = 65, N_{FEC_IN_TI} = 54. \quad (41)$$

Затем определим число столбцов в одном блоке временного перемежения ТІ (4) с учётом (40) и (41):

$$L_F = 55, N_{COL_IN_TI} = 305; L_F = 60, N_{COL_IN_TI} = 340; L_F = 65, N_{COL_IN_TI} = 275. \quad (42)$$

Заметим, что число строк (ячеек) в блоке временного перемежения постоянно и в соответствии с (34) равно 1620.

Определим количество фиктивных ячеек при $L_F = 60$ OFDM-символов в кадре Т2. При этом в кадре Т2 содержится три блока временного перемежения ТІ (35), в каждом из трёх блоков содержится по 20 OFDM-символов (39). В одном ТІ-блоке 1620 строк (ячеек) (34) и 340 столбцов (42). Таким образом, в одном блоке временного перемежения всего 550800 ячеек и, следовательно, 68 блоков FEC. Всего в кадре перемежения при трёх ТІ-блоках будет содержаться 204 блока FEC (42). При этом общее количество блоков FEC в Т2-кадре в соответствии с выражениями (16) и (18) равно:

$$N_{BLOCKFECT2F} = \frac{N_{P2} \cdot C_{P2} + L_{data} \cdot C_{data}}{C_{BLOCK_FEC}} = \frac{(1 \cdot 22432 + 59 \cdot 27404)}{8100} = 202.3787. \quad (43)$$

Следовательно, количество фиктивных ячеек в трёх блоках временного перемежения с учётом (28) и (43) будет определяться дробной частью общего количество блоков FEC в Т2-кадре

$$C_{dummy} = (N_{BLOCK_FEC_IN_T2F} - N_{BLOCK_FEC_IN_T2F}) \times C_{BLOCK_FEC}. \quad (44)$$

Тогда с учётом (43) и (44) количество фиктивных ячеек в трёх блоках временного перемежения будет равно:

$$C_{dummy} = 0.3787 \times 8100 = 3067. \quad (45)$$

В соответствии с выражениями (29) и (43) – (45) относительное снижение числа информационных ячеек или скорости передачи из-за наличия фиктивных ячеек равно:

$$\Delta C_{T2F} = \frac{N_{P2} \cdot C_{P2} + L_{data} \cdot C_{data} - C_{dummy}}{N_{P2} \cdot C_{P2} + L_{data} \cdot C_{data}} = \frac{1639268 - 3067}{1639268} = 0.9982. \quad (46)$$

Таким образом, снижение скорости составит 0.18 %. Из формулы (31) следует, что без учёта фиктивных ячеек скорость пользовательских данных $R_b \text{ WITHOUT dummy} = 36.288$ Мбит/с, а с учётом использования фиктивных ячеек – $R_b \text{ WITH dummy} = 36.222$ Мбит/с.

Результаты расчётов влияния фиктивных ячеек на изменение скорости передачи для трёх значений $L_F = 55, 60$ и 65 символов приведены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты расчётов влияния фиктивных ячеек на изменение скорости передачи

L_F	N_{TI}	$N_{SYMB \text{ IN } TI}$	$N_{FEC \text{ BL IN } T2F}$	$N_{FEC \text{ BL IN } NTI}$	C_{dummy}	$\Delta R_b \text{ UP}$
54	3	18	182.0795	183	64	0.000043
60	3	20	202.3787	204	3067	0.0018
64	4	16	215.9116	216	7383	0.0042

Из табл. 6 следует, что использование фиктивных ячеек практически не изменяет скорость передачи из-за их малого количества.

На рис. 8 приведены результаты расчётов глубины перемежения (график 1) и скорости передачи (график 2) от длины кадра T_2 . Из этого рисунка видно, что выбор длины кадра с $L_F = 60$ OFDM-символов даёт практически максимальную скорость передачи битов, а также максимизирует глубину перемежения, т.е. повышает помехоустойчивость приёма.

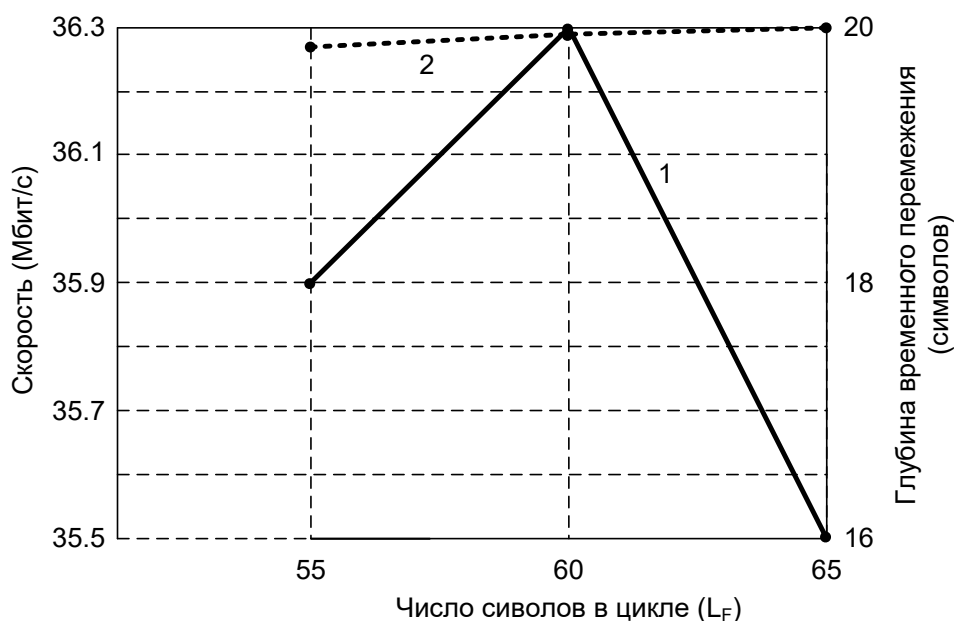


Рис. 8. Зависимость глубины перемежения (1) и скорости передачи (2) от длины кадра T_2 (полоса частот 8 МГц; $FFT_{SIZE} = 32KE$; $M_{mod} = 256$; $T_U = 3.584$ мс; $N_{SCF} = 27840$; $N_{P2} = 2$; $R_{C_LDPC} = 3/5$)

На основе полученных выражений (1) ÷ (31) определим глубину перемежения OFDM-символов и скорость передачи пользовательской информации для других сочетаний параметров стандарта DVB-T2 [5]:

- полоса частот 8 МГц;
- $FFT_{SIZE} = 8KN$;
- $N_{b_LDPC} = 64800$;

- $M_{\text{mod}} = 64$;
- $N_{P2} = 2$;
- $C_{P2} = 4472$;
- $T_U = 0.896$ мс;
- $GIF = 1/4$;
- $N_{\text{SCF_USED}} = 6816$;
- $R_{C_LDPC} = 3/4$;
- $T_{P1} = 0.224$ мс;
- $(1 - \text{OHF}_{\text{BB_FRAME}}) = 0.9983$;
- $R_{C_BCH} = 0.996$;
- $(1 - \text{OHF}_{\text{PP7}}) = 0.9896$;
- $T_{U_FRACT} = 0.8$.

Результаты проведённых расчётов для второго сочетания параметров стандарта DVB-T2 приведены в табл. 7 и на рис. 9.

Таблица 7. Зависимость глубины перемежения и скорости передачи от длины кадра L_F

L_F	N_{TI}	$N_{\text{SYMB IN TI}}$	$R_b \text{ UP, Мбит/с}$	$\Delta R_b \text{ UP}$
76	4	19	20.099	0.000546
80	4	20	20.110	0.0000
85	5	17	20.127	0.000844

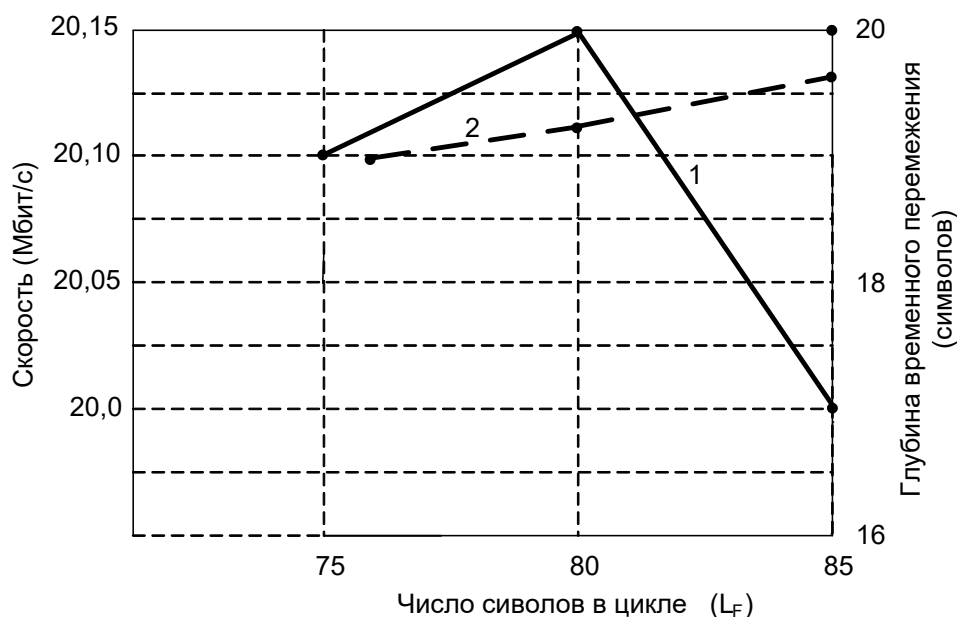


Рис. 9. Зависимость глубины перемежения (1) и скорости передачи (2) от длины кадра T_2 (полоса частот 8 МГц; $\text{FFT}_{\text{SIZE}} = 8\text{KN}$; $M_{\text{mod}} = 64$; $N_{P2} = 2$; $T_U = 0.896$ мс; $N_{\text{SCF}} = 6816$; $R_{C_LDPC} = 3/4$)

Из табл. 7 и рис. 9 видно, что для данного сочетания параметров выбор длины кадра с $L_F = 80$ OFDM-символов даёт практически максимальную скорость передачи битов и при этом максимизирует глубину перемежения, т.е. повышает помехоустойчивость приёма.

Разработанная методика определения оптимальной длины кадра в стандарте наземного цифрового телевизионного вещания DVB-T2 может быть использована для выбора оптимальных параметров 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. Новосибирск: СибГУТИ, 2012. 352 с.
4. Шахнович И. В. DVB-T2 – новый стандарт цифрового телевизионного вещания // Связь и телекоммуникации. 2009. № 6. С. 30–35.
5. Носов В. И., Зиновьев М. В., Ладан А. С. Особенности определения параметров цифрового телевизионного вещания // Вестник СибГУТИ. 2021. № 2. С. 71–83.

*Статья поступила в редакцию 11.04.2022;
переработанный вариант – 16.05.2022.*

Носов Владимир Иванович

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

Ладан Александра Сергеевна

аспирант кафедры ЦТРВ и СРС СибГУТИ, e-mail: lad_al@mail.ru.

Зиновьев Максим Вячеславович

аспирант кафедры ЦТРВ и СРС СибГУТИ, e-mail: neo136@list.ru.

Determination of the optimal frame length of digital television broadcasting

Vladimir I. Nosov

Doctor of technical sciences, Professor, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), nvi@sibguti.ru.

Aleksandra S. Ladan

Postgraduate student, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), lad_al@mail.ru.

Maksim V. Zinoviev

Postgraduate student, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), neo136@list.ru.

The paper proposes a simple method for determining the optimal frame length in the DVB-T2 standard based on simple and understandable formulas based on the sequence of processing user data in the DVB-T2 standard. There should always be an integer number of FEC blocks in a T2 frame, the remaining cells that do not make up an entire FEC block will be dummy cells as a rule and represent a speed loss. As a result, the total bit rate and the depth of interleaving in the smallest details depend on the exact number of OFDM characters, and consequently, the cells in the T2 frame.

Keywords: DVB-T2 standard, T2-frame, OFDM symbol, FEC block, dummy cells, interleaving depth, optimal frame length.

References

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. Nosov V.I. *Obrabotka signalov pri ortogonal'nom chastotnom mul'tipleksirovanii* [Signal processing with orthogonal frequency multiplexing]. SibGUTI, Novosibirsk, 2012. 352 p.
4. SHahnovich I.V. DVB-T2 – novyj standart cifrovogo televizionnogo veshchaniya [DVB-T2 – a new standard for digital television broadcasting]. *Svyaz' i telekommunikacii*, 2009, no. 6, pp. 30-35.
5. Nosov V.I., Zinov'ev M.V., Ladan A.S. Osobennosti opredeleniya parametrov cifrovogo televizionnogo veshchaniya [Features of determining the parameters of digital television broadcasting]. *Vestnik SibGUTI*, 2021, no. 2, pp. 71-83.