

# Системы цифрового телевидения для тех, кто хочет понять: кодирование, исправляющее ошибки

Часть 8 (окончание). Начало в №№ 6...9/2020; 1...3/2021

Константин Гласман

## Кодирование с целью исправления ошибок в системах цифрового телевизионного вещания второго поколения DVB-2

Общая схема канального кодирования в системе DVB-2

Наиболее совершенными алгоритмами кодирования, применяемыми в настоящее время с целью исправления ошибок, обладают системы DVB второго поколения (DVB-T2, DVB-S2, DVB-C2) и система ATSC третьего поколения (ATSC 3.0). Эти алгоритмы кодирования называются в стандартах системами FEC (Forward Error Correction – прямое, или упреждающее исправление ошибок), которое и рассматривается здесь. Между алгоритмами кодирования в этих стандартах очень много общего. Ниже будет описано кодирование для систем DVB-2.

FEC-кодирование с целью исправления ошибок во всех системах цифрового телевидения (ЦТВ) выполняется путем применения двух кодов – внешнего и внутреннего. Для внешнего кодирования в этих системах используется код BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem Code – код Боуза-Чоудхури-Хоквингема). Для внутреннего кодирования применяется код LDPC (Low-Density Parity-Check Code – код с малой плотностью проверок на четность). И внешнее, и внутреннее кодирование является систематическим. Кодированию с целью исправления ошибок в

системах ЦТВ подвергается блок данных, называемый BBFrame (Base Band Frame). Блок данных BBFrame подвергается сначала внешнему кодированию. Образованный при этом кодированный блок кода BCH затем подвергается внутреннему кодированию.

Размеры информационных и кодовых блоков для внешнего и внутреннего кодирования приведены в таблице для нормального размера выходного блока системы FEC, равного 64800 битов (normal FECFRAME). Нормальный размер обеспечивает наивысшее возможное качество передачи данных. Данные в таблице даны для разных режимов, основным параметром которых является скорость внутреннего кода. В стандарте предусматривается также вариант так называемого короткого кадра (short FECFRAME), который может применяться в случаях, когда требуется малая задержка даже ценой ухудшения качества передачи.

### Внутреннее кодирование в системе DVB-2

Внутренний код BCH способен исправлять 10 или 12 ошибок в кодовом слове BCH. Длина блока проверочных данных составляет соответственно 192 или 160 битов. Размер информационного блока для внешнего кодирования  $k_{bch}$  меняется в широких пределах в зависимости от режима (от 32208 до 53840 битов).

Порождающий многочлен кода BCH получается путем перемножения первых  $t$  полиномов (см. табл. ниже) ( $t$  – число исправляемых ошибок), соответствующих нормальному размеру выходного блока системы FEC.

### Внешнее кодирование в системе DVB-2

Кодовый блок кода BCH длиной  $n_{bch}$  подвергается внутреннему кодированию с помощью кода LDPC с разными скоростями  $R_{ldpc}$  в диапазоне от 1/2 до 5/6. Размер кодового блока кода LDPC в разных режимах один и тот же и равен  $n_{ldpc} = 64800$  битов для нормального размера выходного блока системы FEC (normal FECFRAME).

Коды LDPC задаются с помощью проверочной матрицы. Но для достижения высокой эффективности длина кодового слова должна достигать десятков тысяч битов. При такой длине возникает проблема описания кода для выполнения операции кодирования и декодирования. Поэтому на структуру проверочной матрицы накладывается ряд ограничений.

Для кодирования надо иметь порождающую матрицу кода. Для любого линейного кода порождающая матрица может быть получена из проверочной матрицы с помощью матричных преобразований. Но получаемая таким путем порождающая матрица уже не обладает малой плотностью единиц. Это приводит к сложностям в процессе кодирования. Поэтому на проверочную матрицу кода накладываются дополнительные ограничения.

Проверочная матрица с размерами  $(n-k)$  строк и  $n$  столбцов должна состоять из двух блоков, называемых матрицей  $A$  с размерами  $(n-k)$  строк и  $k$  столбцов и квадратной матрицы  $B$ , имеющей  $(n-k)$  строк и  $(n-k)$  столбцов:

$$H_{(n-k) \times n} = [A_{(n-k) \times k} \quad B_{(n-k) \times (n-k)}]$$

Матрица  $B$  немного похожа на единичную матрицу, но имеет специальную лестничную структуру (см. табл.). Матрица имеет единицы вдоль центральной диагонали и нули в областях выше и ниже.

Блок информации  $u = (u_1, u_2, \dots, u_k)$ , кодируемый с целью обнаружения и исправления ошибок с помощью кода LDPC, преобразуется в кодовый блок с использованием систематического кодирования:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) = (u_1, u_2, \dots, u_k, p_1, p_2, \dots, p_{n-k}).$$

Произведение кодового слова на проверочную матрицу должно быть равно нулю. Поэтому проверочные биты находятся путем решения следующего уравнения:  $xH^T = 0$ .

### Структура матрицы B кода LDPC

1					
1	1				
	1	1		0	
		1	.		
			.	.	
				.	1
	0				1
					1
					1

### Параметры кодирования канального кода системы DVB-T2/S2/C2 (для нормального размера выходного блока FECFRAME)

Скорость кода LDPC, $R_{ldpc}$	Длина информационного блока кода BCH, $k_{bch}$	Длина кодового блока кода BCH, $n_{bch}$ (длина информационного блока кода LDPC), $k_{ldpc}$	Число исправляемых ошибок кода BCH, $t$	Длина блока проверочных символов кода BCH, $n_{-k_{bch}}$	Длина кодового блока кода LDPC, $n_{ldpc}$
1/2	32208	32400	12	192	64800
3/5	36688	38880	12	192	64800
2/3	43040	43200	10	160	64800
3/4	48408	48600	12	192	64800
4/5	51648	51840	12	192	64800
5/6	53840	54000	10	160	64800

### Полиномы кода BCH (для нормального размера выходного блока FECFRAME $n_{ldpc}=64800$ )

$g_1(z)$	$1+z^2+z^3+z^5+z^{16}$
$g_2(z)$	$1+z+z^4+z^5+z^6+z^8+z^{16}$
$g_3(z)$	$1+z^2+z^3+z^4+z^5+z^7+z^8+z^9+z^{10}+z^{11}+z^{16}$
$g_4(z)$	$1+z^2+z^4+z^6+z^9+z^{11}+z^{12}+z^{14}+z^{16}$
$g_5(z)$	$1+z+z^2+z^3+z^5+z^8+z^9+z^{10}+z^{11}+z^{12}+z^{16}$
$g_6(z)$	$1+z^2+z^4+z^5+z^7+z^8+z^9+z^{10}+z^{12}+z^{13}+z^{14}+z^{15}+z^{16}$
$g_7(z)$	$1+z^2+z^5+z^6+z^8+z^9+z^{10}+z^{11}+z^{13}+z^{15}+z^{16}$
$g_8(z)$	$1+z+z^2+z^5+z^6+z^8+z^9+z^{12}+z^{13}+z^{14}+z^{16}$
$g_9(z)$	$1+z^5+z^7+z^9+z^{10}+z^{11}+z^{16}$
$g_{10}(z)$	$1+z+z^2+z^5+z^7+z^8+z^{10}+z^{12}+z^{13}+z^{14}+z^{16}$
$g_{11}(z)$	$1+z^2+z^3+z^5+z^9+z^{11}+z^{12}+z^{13}+z^{16}$
$g_{12}(z)$	$1+z+z^5+z^6+z^7+z^9+z^{11}+z^{12}+z^{16}$

Используется рекурсивный алгоритм решения приведенного выше уравнения относительно проверочных битов:

$$a_{11}u_1 + a_{12}u_2 + \dots + a_{1k}u_k + p_1 = 0 \rightarrow p_1$$

$$a_{21}u_1 + a_{22}u_2 + \dots + a_{2k}u_k + p_1 + p_2 = 0 \rightarrow p_2$$

.....

$$a_{(n-k)1}u_1 + a_{(n-k)2}u_2 + \dots + a_{(n-k)k}u_k + p_{n-k-1} + p_{n-k} = 0 \rightarrow p_{n-k}$$

Ограничения, накладываемые на проверочную матрицу  $H$ , приводят к очень небольшому увеличению порогового отношения сигнала к шуму (на 0,1 дБ). Проверочная

матрица кода не записывается в стандарте непосредственно. Она регламентируется с помощью специальных формул, позволяющих вычислить номера битовых узлов и номера проверочных узлов, которые соединяются ребрами графа Таннера.

### Заключение

Система канального кодирования, разработанная для цифрового телевидения DVB второго поколения (DVB-T2, DVB-S2, DVB-C2), обладает очень высокими показателями (они описаны в первой части статьи), достигая «почти шенноновского» уровня эффективности. Эти показатели – факты сегодняшнего дня.

Пройдет время, будут предложены новые системы кодирования, которые позволят превзойти эти показатели. Факты сегодняшнего дня станут забываться, как это происходит с показателями канального кодирования телевидения DVB первого поколения. И это нормально. Гельвеций сказал: «Знание некоторых принципов легко возмещает незнание некоторых фактов». Знание каких принципов должно остаться с нами, чтобы понять факты следующего поколения систем цифрового телевизионного вещания? Эти принципы – теория канального кодирования, которая стала инструментом проектирования цифровых систем и составляющей научно-технической культуры. ▶

## НОВОСТИ

### Весенние новинки Telestream



Интерфейс ContentAgent

Следуя многолетней традиции представлять в апреле новые разработки, компания Telestream провела 14 апреля онлайн-брифинг, на котором было довольно много интересного.

Как и ранее, на традиционных живых встречах с журналистами, открыл пресс-конференцию вице-президент Telestream по маркетингу Скотт Мюррей, а об общих успехах рассказал генеральный директор компании Дэн Каулс (Dan Castles).

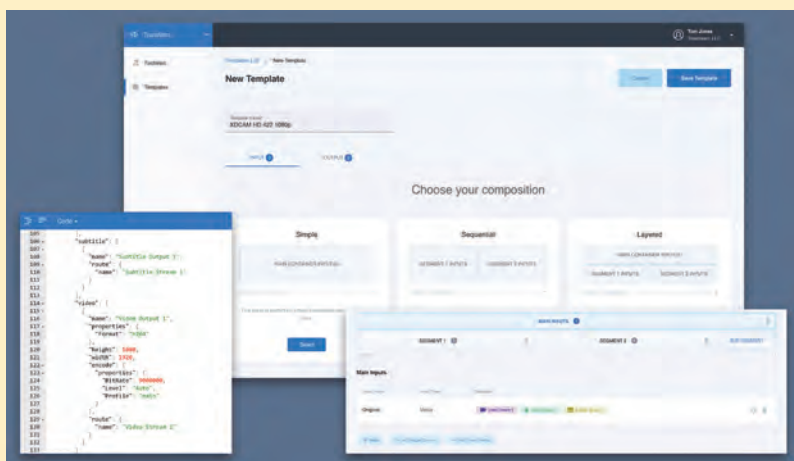
В частности, речь шла и об очередном приобретении – Telestream купила у Vecima Networks приложение ContentAgent. Оно широко применяется по всему миру вещателями, производящими компаниями и другими игроками медиарынка для повышения эффективности рабочего процесса создания контента. В частности, приложение автоматизирует различные процедуры, включая перенос материала со сменных носителей в общее хранилище и создание файловых материалов, таких как просмотрные и мастер-копии. Вместе с приложением в Telestream волился и коллектив, его создавший.

Далее представители Telestream назвали пять основных движущих сил современной медиainдустрии. Это работа в дистанционном режиме, переход от SDI к IP, распространение формата 4K/UHD с широким динамическим диапазоном и расширенным цветовым пространством, облака, а также OTT и живой стриминг.

Практически по каждому из этих направлений у Telestream есть что предложить пользователям, но самой громкой, пожалуй, новинкой весны 2021 года стал новый облачный сервис Telestream Cloud Transform. В его основе лежит API, сам сервис не привязан к какому-то конкретному облаку и обеспечивает обработку и транскодирование медиаданных.

Сторонние разработчики получают возможность писать свои собственные коды для процессов обработки медиаданных, имея в основе технологию транскодирования и обработки от Telestream. Модель оплаты – плата за то, что используешь. Сервис уже прошел тестирование в условиях реальной эксплуатации и показал свою эффективность и поддержку широчайшего спектра кодеков и форматов, включая AVC I, AVC Ultra, DNxHD и HR, IMX, JPEG2000, XAVC, XDCAM, ProRes 422/444 и других.

Помимо Telestream Cloud Transform на пресс-конференции были представлены и другие новинки, включая контрольно-измерительную технику серии Prism, которая появилась в портфеле компании благодаря приобретению фирмы Tektronix.



Интернет-ресурс Telestream Cloud Transform



Контрольно-измерительные приборы серии Prism