

УДК 621.396.946

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОКАНАЛОВ СПУТНИКОВОГО МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ВЕЩАНИЯ

Э.Б. ЛИПКОВИЧ, В.А. КОВШИК, Е.А. ДОБРОВОЛЬСКИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 14 октября 2016

Представлены аналитические модели расчета помехоустойчивости систем с многопозиционными видами модуляции и помехоустойчивого кодирования для проведения исследований эффективности спутниковых каналов мультимедийного вещания. Приведены результаты расчета информационной, спектральной и энергетической эффективностей систем при использовании реальных и идеализированных характеристик спутниковых каналов стандартов DVB-S/S2.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, многопозиционная модуляция, энергетическая, спектральная и информационная эффективность.

Введение

Основными показателями спутниковых систем мультимедийного вещания являются информационная, спектральная и энергетическая эффективности, которые устанавливают меру использования полосы частот и мощности передачи. Поскольку спутниковый ресурс ограничен как по мощности, так и по полосе частот, то необходимы достаточно точные и простые математические модели расчета для проведения развернутых исследований. В статье представлены полученные соотношения помехоустойчивости систем с многопозиционными видами модуляции и кодированием, с помощью которых выполнены расчеты эффективности каналов стандартов DVB-S/S2.

Стандартом DVB-S [1] предусматривается квадратурная 4-позиционная фазовая модуляция (QPSK, $m = 2$), помехоустойчивое кодирование с использованием внешнего укороченного блочного кода Рида-Соломона (РС) и внутреннего сверточного кода (СК), когерентная демодуляция ФМ-сигналов и двухступенчатое декодирование с дескремблированием и депережежением байт. Стандартом DVB-S2 [2] регламентируется внешнее кодирование кодом Боуза-Чоудхури-Хоквингема (BCH) и внутреннее – кодом с низкой плотностью проверок на четность (LDPC). Для организации многопрограммного вещания рекомендована QPSK и 8-позиционная фазовая модуляция (PSK-8, $m = 3$), для проведения телерепортажей с мест событий на профессиональное оборудование приема – 16- и 32-позиционные виды амплитудно-фазовой модуляции (APSK-16, $m = 4$ и APSK-32, $m = 5$).

Расчетные соотношения и исследования

Исходным показателем пропускной способности спутниковых систем мультимедийного вещания и числа транслируемых ТВ-программ по каналам DVB-S/S2 является информационная скорость передачи данных V_0 , которая связана с удельной γ_0 и символьной V_C скоростью передачи

$$V_0 = V_C \cdot \gamma_0 = \Delta f_K \cdot \gamma_0 / (1 + \alpha_{СК}), \text{ бит/с;} \quad (1)$$

$$\gamma_0^{\text{DVB-S}} = m \cdot R_{\text{PC}} \cdot R_{\text{СК}}, \text{ бит/симв}; \quad (2)$$

$$\gamma_0^{\text{DVB-S2}} = m \cdot R_{\text{ВСН}} \cdot R_L / (1 + 80/K_{\text{ВСН}})(1 + 90m/n_L), \text{ бит/симв}, \quad (3)$$

$$R_{\text{ВСН}} = 1 - 16t/n_L \cdot R_L; \quad K_{\text{ВСН}} = n_L \cdot R_L - 16t, \quad (4)$$

где Δf_k – ширина полосы канала, Гц; $\alpha_{\text{СК}}$ – коэффициент скругления спектра фильтром Найквиста (фактор roll-off); R_{PC} , $R_{\text{СК}}$ – относительная скорость кода РС и СК; $R_{\text{ВСН}}$, R_L – относительная скорость кода ВСН и LDPC; t – исправляющая способность кода ВСН; n_L – длина кодового слова, равная 64800 бит (базовый вариант) либо 16200 бит (усеченный вариант).

Возможное число ТВ-программ, транслируемых по спутниковому каналу при известной скорости данных на программу $B_{\text{П}}$, определяется по формуле

$$N_{\text{П}} = \text{int}(B_0/B_{\text{П}}). \quad (5)$$

В табл. 1 и 2 приведены рассчитанные значения γ_0 , B_0 , и $N_{\text{П}}$ для каналов стандарта DVB-S (модуляция QPSK; $\alpha_{\text{СК}} = 1,3$; $R_{\text{PC}} = 188/204$) и DVB-S2 (модуляция QPSK, PSK-8; $\alpha_{\text{СК}} = 1,2$) при $\Delta f_k = 36$ МГц. Принято, что средняя скорость на ТВ-программу с SD- и HD-разрешением и компрессией MPEG-4/H.264 AVC составляет 2,6 и 9,0 Мбит/с соответственно.

Таблица 1. Значения параметров для каналов DVB-S

$R_{\text{СК}}$	1/2	2/3	3/4	5/6	7/8
γ_0 , бит/симв	0,922	1,229	1,383	1,537	1,614
B_0 , Мбит/с	25,355	33,797	38,033	42,267	44,385
$N_{\text{П}}$, SD/HD	10/3	13/4	15/4	16/5	17/5

Таблица 2. Значения параметров для каналов DVB-S2

R_L		1/2	3/5	2/3	3/4	4/5	5/6	8/9	9/10
t		12	12	10	12	12	10	8	8
QPSK	γ_0 , бит/симв	0,989	1,188	1,322	1,487	1,587	1,655	1,766	1,789
	B_0 , Мбит/с	29,67	35,65	39,67	44,62	47,62	49,64	52,99	53,66
	$N_{\text{П}}$, SD/HD	11/3	14/4	15/4	17/5	18/5	19/6	20/6	21/6
PSK-8	γ_0 , бит/симв	-	1,780	1,980	2,228	-	2,478	2,646	2,679
	B_0 , Мбит/с	-	53,40	59,40	66,84	-	74,34	79,38	80,37
	$N_{\text{П}}$, SD/HD	-	21/6	23/6	26/7	-	28/8	30/9	31/10

Из таблиц следует, что при равных кратностях t и кодовых скоростях ($R_{\text{СК}} = R_L$) сравниваемых стандартов, рассчитанные значения выше при использовании DVB-S2, что связано с большими значениями $R_{\text{ВСН}}$ по сравнению с R_{PC} и меньшими $\alpha_{\text{СК}}$. С переходом на PSK-8 рассчитанные показатели увеличиваются примерно в 1,5 раза. Сокращение избыточности в цифровом потоке (увеличение R_L) повышает пропускную способность канала.

Соотношение между информационной скоростью B_0 и предельной C по Шеннону определяет информационную эффективность каналов:

$$\eta_{\text{инф}} = B_0/C = 0,3 \cdot \gamma_C / \lg(1 + 10^{0,1 \cdot \Delta p_{\text{ГР.ЭС}}}); \quad (6)$$

$$\gamma_C = (B_0/\Delta f_k) = \gamma_0 / (1 + \alpha_{\text{СК}}) = B_C \cdot R_{\text{К}} \cdot m / \Delta f_k, \text{ бит/с} \cdot \text{Гц}; \quad (7)$$

где γ_c – спектральная эффективность, бит/с·Гц; $\rho_{\text{ТР.ЗС}}$ – требуемое отношение мощности несущей (ОНШ) к мощности шума на входе демодулятора приемной системы (ПС) при обеспечении заданной достоверности приема, дБ.

Величина $\eta_{\text{ИНФ}}$ характеризует также соотношение между реальной γ_c и предельной $\gamma_{\text{Ш}} = C/\Delta f_k$ по Шеннону спектральными эффективностями

$$\eta_{\text{ИНФ}} = \gamma_c / \gamma_{\text{Ш}} = \gamma_0 \cdot \Delta f_k / (1 + \alpha_{\text{СК}}) \cdot C. \quad (8)$$

Из приведенных соотношений (1)-(8) следует, что для повышения информационной эффективности каналов необходимо увеличивать кратность модуляции, использовать длинные коды для повышения кодовой скорости, снижать $\alpha_{\text{СК}}$ и значения $\rho_{\text{ТР.ЗС}}$. Снижение $\alpha_{\text{СК}}$ улучшает использование полосы канала для передачи данных, однако деформируется спектр сигнала и растет вероятность ошибок из-за межсимвольных искажений.

Величина $\rho_{\text{ТР.ЗС}}$ определяет энергетическую эффективность (помехоустойчивость) системы и складывается из теоретического значения ОНШ $\rho_{\text{ОК}}$, при котором реализуется требуемая достоверность приема, и системного запаса в помехоустойчивости $\Delta\rho_{\Sigma}$:

$$\rho_{\text{ТР.ЗС}} = \rho_{\text{ОК}} + \Delta\rho_{\Sigma}, \text{ дБ}. \quad (9)$$

Обычно теоретические значения помехоустойчивости $\rho_{\text{ОК}}$ для различных видов модуляции, способов кодирования и декодирования приводятся в виде табличных значений, полученных в результате компьютерного моделирования или экспериментальных исследований. Ниже для расчета помехоустойчивости приема сигналов стандарта DVB-S предлагаются достаточно простые аналитические соотношения, справедливые в широком диапазоне вероятности ошибок:

$$\rho_{\text{ОК}} = 10 \lg \left[4,6 \left(A_1 - 0,5 \cdot \lg(2,3 A_1 / \mu) \right) / d_c \cdot \beta \right], \text{ дБ}; \quad (10)$$

$$A_1 = -\lg P_{\text{ОШ.В}} - 0,55 + \lg(1/\beta); \quad \mu = R_k \cdot d_c \cdot \beta; \quad (11)$$

$$\beta = 1 - \frac{\lg(R_k \cdot d_c \cdot \sqrt{K})}{-\lg P_{\text{ОШ.В}}}, \quad (12)$$

где d_c – свободное расстояние сверточного кода, равное 10, 7, 5, 4 и 3 для $R_{\text{СК}}$ 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, и 7/8 соответственно при длине кодового ограничения $K = 7$; $P_{\text{ОШ.В}}$ – вероятность ошибки на бит на выходе декодера Витерби с мягким решением; $R_k = R_{\text{СК}} \cdot R_{\text{РС}}$.

Системный запас в помехоустойчивости $\Delta\rho_{\Sigma}$ можно представить тремя слагаемыми, которые компенсируют снижение ОНШ из-за импорта тепловых шумов и переходных помех бортового ретранслятора (БР) на вход ПС $\Delta\rho_{\text{БР}}$, наличия внешних помех $\Delta\rho_{\text{М}}$ и внутрисистемных искажений $\Delta\rho_{\text{К}}$:

$$\Delta\rho_{\Sigma} = \Delta\rho_{\text{БР}} + \Delta\rho_{\text{М}} + \Delta\rho_{\text{К}}, \text{ дБ}. \quad (13)$$

Величина запаса $\Delta\rho_{\text{БР}}$ зависит от методов многостанционного доступа к ИСЗ, режима работы БР и назначения сети. Поскольку при мультимедийном вещании используется односигнальный режим передачи, то $\Delta\rho_{\text{БР}}$ обычно составляет 0,6...1,4 дБ. Величина $\Delta\rho_{\text{М}}$, согласно требованиям МСЭ, не должна превышать 1,0 и 1,5 дБ в системах фиксированных и радиовещательных спутниковых служб соответственно. Составляющая $\Delta\rho_{\text{К}}$, обеспечивающая компенсацию внутрисистемных искажений из-за неточной реализации устройств, частотного ограничения спектра, наличия амплитудных и фазовых искажений, рассчитывается по формуле

$$\Delta\rho_{\text{К}} = 1 + \xi \cdot R_k \cdot \lg m; \quad \xi = 2 \dots 3, \text{ дБ}. \quad (14)$$

В спутниковых системах мультимедийного вещания обычно используется прямая (прозрачная) ретрансляция сигналов. В этих условиях передачи сигналов величина $\Delta\rho_{БР}$ устанавливает взаимосвязь между требуемым ОНШ на входе ретранслятора $\Delta\rho_{БР}$ и помехоустойчивостью приема на стороне земной станции

$$\rho_{БР} = \rho_{ТР.ЗС} - 10\lg(10^{0,1\Delta\rho_{БР}} - 1), \text{ дБ.} \quad (15)$$

Согласно формулам (9) и (15), чем меньше $\Delta\rho_{БР}$, тем ниже уровень влияния тепловых и переходных шумов БР на помехоустойчивость ПС, но тем выше требуемое значение $\rho_{БР}$ и минимальный энергетический потенциал радиолинии «вверх»:

$$W_{\text{МИН.1}} = \rho_{БР} + 10\lg\left[\Delta f_K / (1 + \alpha_{СК})\right] = \mathcal{E}_{\text{ПД}} - a_{\Sigma 1} + D_{БР} + 228,6, \text{ дБГц,} \quad (16)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ПД}}$ – минимальное значение эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (ЭИИМ) передающей станции ЗС1 для обеспечения требуемого ОНШ на входе БР, дБВт; $a_{\Sigma 1}$ – суммарные потери мощности на радиолинии «вверх», дБ; $D_{БР}$ – добротность приемной системы БР, дБ/К.

Например, если $\Delta\rho_{БР} = 0,3$ дБ, то влияние шумов БР на ПС считается незначительным, однако, согласно (15), величина $\rho_{БР}$ превысит $\rho_{ТР.ЗС}$ на 11,56 дБ и возникнет существенная проблема реализации $W_{\text{МИН.1}}$. Если $\Delta\rho_{БР} = 1,5$ дБ, то $\rho_{БР}$ превысит $\rho_{ТР.ЗС}$ на 3,9 дБ, что упростит реализацию $W_{\text{МИН.1}}$, однако снизится помехоустойчивость приема, что потребует увеличения ЭП $W_{\text{МИН.2}}$ радиолинии «вниз» путем увеличения выходной мощности БР и диаметра приемной антенны

$$W_{\text{МИН.2}} = \rho_{ТР.ЗС} + 10\lg\left[\Delta f_K / (1 + \alpha_{СК})\right] = \mathcal{E}_{БР} - a_{\Sigma 2} + D_{ЗС} + 228,6, \text{ дБГц,} \quad (17)$$

где $\mathcal{E}_{БР}$ – ЭИИМ бортового ретранслятора, дБВт; $a_{\Sigma 2}$ – суммарные потери мощности на радиолинии «вниз», дБ; $D_{ЗС}$ – добротность приемной системы ЗС, дБ/К.

Поскольку возможности увеличения $\mathcal{E}_{БР}$ и $D_{ЗС}$ для обеспечения требуемого ЭП на линии «вниз» ограничены, то $W_{\text{МИН.1}}$ и $W_{\text{МИН.2}}$ следует устанавливать сбалансированно при проектировании.

Теоретические значения ОНШ для каналов DVB-S2 определены стандартом только для случая пакетных ошибок на выходе декодера BCH $P_{\text{ОШ.П}} = 10^{-7}$ (табл. 3). Это значение соответствует одной неисправленной ошибке в течение часа передачи со скоростью 5 Мбит/с, что сопоставимо с $P_{\text{ОШ.П}} = 10^{-4}$ на выходе декодера Витерби или $P_{\text{ОШ.РС}} = 5,5 \cdot 10^{-11}$ на выходе декодера РС для одиночных ошибок.

Таблица 3. Значения ОНШ для каналов стандарта DVB-S2 при $P_{\text{ОШ.П}} = 10^{-7}$, дБ

R_L	1/4	1/3	2/5	1/2	3/5	2/3	3/4	4/5	5/6	8/9	9/10
QPSK	-2,35	-1,24	-0,30	1,00	2,23	3,10	4,03	4,68	5,18	6,2	6,42
PSK-8	-	-	-	-	5,50	6,62	7,91	-	9,35	10,69	10,98
APSK-16	-	-	-	-	-	8,97	10,21	11,03	11,61	12,89	13,13
APSK-32	-	-	-	-	-	-	12,73	13,64	14,28	15,69	16,05

Для исследований характеристик каналов DVB-S2 в широком диапазоне значений РОШ.П предлагаются следующие соотношения для определения $\rho_{ОК}$ при использовании кодирования вида BCH+LDPC и принятых в стандарте способов модуляции:

- при модуляции PSK-8

$$\rho_{ОК} = 10\lg\left[2,97 \cdot R_L (0,873 + R_L^4)(B_1 - 0,51\lg B_1)\right], \text{ дБ;} \quad (18)$$

$$B_1 = \frac{-\lg P_{\text{ош.п}}}{30,5} + 2,2 \cdot R_L^4 + 1,65; \quad (19)$$

- при модуляции QPSK, APSK-16 и APSK-32

$$\rho_{\text{ок}} = 10 \lg \left[0,217 \cdot M \cdot R_L (0,873 + R_L^4) (B_2 - 0,5 \lg B_2) \right], \text{ дБ}; \quad (20)$$

$$B_2 = \frac{-\lg P_{\text{ош.п}}}{30,5} - \ln \left[m / \left(1 - 1/\sqrt{M} \right) \sqrt{R_L} \right] + 0,5 \cdot m \cdot R_L^4 + 3,85. \quad (21)$$

На рис. 1, а, б приведены рассчитанные зависимости информационной эффективности спутниковых каналов стандарта DVB-S ($\alpha_{\text{СК}} = 0,3$) и DVB-S2 ($\alpha_{\text{СК}} = 0,2$) для реальных и идеализированных ($\alpha_{\text{СК}} = 0$ и $\Delta\rho_{\Sigma} = 0$) параметров от значений кодовых скоростей R_K . Для каналов DVB-S величина $P_{\text{ош.в}}$ на выходе декодера Витерби принята 10^{-5} , для DVB-S2 $P_{\text{ош.п}} = 10^{-8}$.

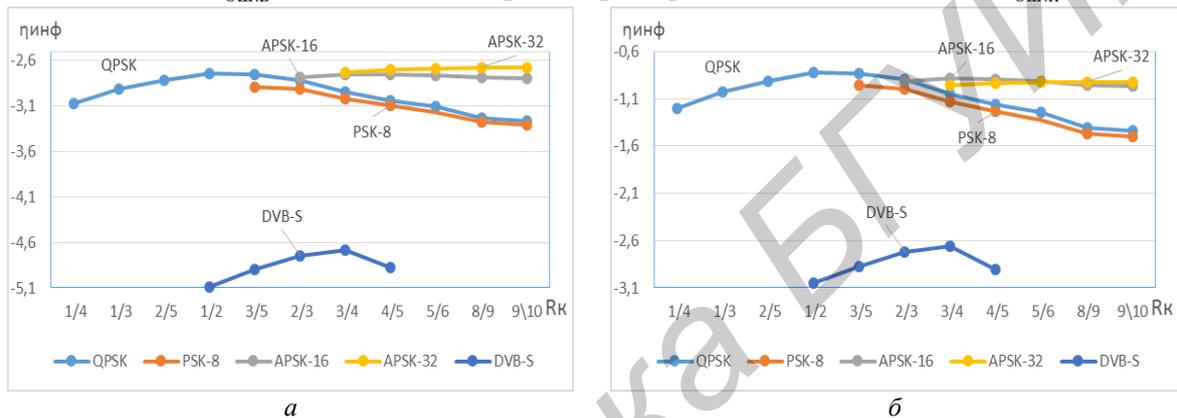


Рис. 1. Зависимости информационной эффективности спутниковых каналов стандартов DVB-S и DVB-S2 для реальных параметров – а и идеализированных параметров – б

Из приведенных зависимостей следует, что информационная эффективность для реальных каналов DVB-S2 составляет $0,5 \dots 0,53$ дБ, для каналов DVB-S $0,33 \dots 0,35$. Идеализация характеристик позволяет улучшить эти показатели в 1,6 раза.

Потери в энергетической $\delta\rho$ и спектральной $\delta\gamma_c$ эффективностях спутниковых каналов по сравнению с предельными значениями $\rho_{\text{ш}}$ и $\gamma_{\text{ш}}$ по Шеннону определяются следующими формулами:

$$\delta\rho = \rho_{\text{тр.зс}} - \rho_{\text{ш}} = \rho_{\text{тр.зс}} - 10 \lg (10^{0,3\gamma_c} - 1), \text{ дБ}; \quad (22)$$

$$\delta\gamma_c = \gamma_{\text{ш}} - \gamma_c = \left[\lg (1 + 10^{0,1\rho_{\text{тр.зс}}}) / 0,3 \right] - \gamma_c = \gamma_c \left(\frac{1}{\eta_{\text{инф}}} - 1 \right); \text{ бит/с} \cdot \text{Гц}. \quad (23)$$

В табл. 4 и 5 на основании (22) и (23) приведены результаты расчета минимально возможных потерь $\delta\rho$ и $\delta\gamma_0$ в случае идеализации параметров спутниковых каналов ($\gamma_c = \gamma_0$ и $\rho_{\text{тр.зс}} = \rho_{\text{ок}}$) стандартов DVB-S2 (QPSK, $P_{\text{ош.п}} = 10^{-7}$) и DVB-S (QPSK, $P_{\text{ош.в}} = 10^{-4}$). Для наглядности на рис. 2 показано поведение энергетических и спектральных характеристик по сравнению с границей Шеннона.

Таблица 4. Потери в энергетической и спектральной эффективностях каналов DVB-S2

R_L	1/4	1/3	2/5	1/2	3/5	2/3	3/4	4/5	5/6	8/9	9/10
$\delta\rho$, дБ	1,65	1,2	1,06	1,1	1,15	1,32	1,48	1,68	1,88	2,4	2,53
$\delta\gamma_0$, бит/с·Гц	0,177	0,146	0,16	0,183	0,226	0,27	0,343	0,41	0,456	0,53	0,643

Таблица 5. Потери в энергетической и спектральной эффективности каналов DVB-S

$R_{СК}$	1/2	2/3	3/4	5/6	7/8	1
$\delta\rho$, дБ	3,6	3,9	3,8	3,9	4,9	6,6
$\delta\gamma_0$, бит/с·Гц	0,69	0,85	0,9	0,96	1,2	1,9



Рис. 2. Зависимость $\gamma_0 = \Psi(\rho_{ок})$ при идеализированных параметрах спутниковых каналов

Результаты расчета показывают, что минимальные энергетические потери $\delta\rho$ для DVB-S2 составляют 1,06 дБ при $R_L = 2/5$, для DVB-S 3,6 дБ при $R_{СК} = 1/2$. При характерной для спутникового вещания кодовой скорости 3/4 значения $\delta\rho = 1,48$ дБ и $\delta\gamma_0 = 0,343$ при использовании DVB-S2 и $\delta\rho = 3,48$ дБ и $\delta\gamma_0 = 0,9$ при использовании DVB-S. Переход от кодирования вида PC+CK при DVB-S к BCH+LDPC при DVB-S2 позволяет обеспечить выигрыш по энергетической эффективности на 2,32 дБ и по спектральной эффективности на 0,557 бит/с·Гц. Дальнейшее улучшение показателей спутниковых каналов сопряжено с использованием более эффективных методов кодирования и декодирования.

Заключение

На основании предложенных аналитических соотношений для расчета помехоустойчивости систем стандарта DVB-S/S2 выполнены исследования информационной, энергетической и спектральной эффективностей при реальных и идеализированных характеристиках спутниковых каналов. Показаны уровни отставания данных показателей от границы Шеннона, которые указывают на необходимость дальнейшего улучшения параметров каналов и способов помехоустойчивого кодирования и декодирования.

MATHEMATICAL CALCULATION MODELS OF EFFICIENCY OF SATELLITE MULTIMEDIA BROADCASTING RADIO CHANNELS

E.B. LIPKOVICH, V.A. KOVSHIK, E.A. DOBROVOLSKI

Abstract

Analytical calculating models the noise immunity of systems with multi-position modulation types and error control coding for conducting studies of the efficiency of satellite multimedia broadcasting channels are represented. The calculation results of information, spectral and energy efficiency of systems are given using real and idealized characteristics of satellite channels standards DVB-S/S2.

Keywords: error control coding, multi-position modulation, energy, spectral and information efficiency.

Список литературы

1. ETSI EN 300 421. Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services.
2. ETSI EN 302307. Стандарт DVB-S2. Система цифрового ТВ-вещания.