

УДК 621.391.13

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ СВЯЗИ С КАСКАДНЫМ КОДИРОВАНИЕМ И МНОГОПОЗИЦИОННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Э.Б. ЛИПКОВИЧ, Е.А. БЕЛОКОНЬ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 9 марта 2021

Аннотация. Предложены аналитические соотношения расчета помехоустойчивости и энергетической эффективности систем связи с многопозиционными видами модуляции и каскадным кодированием без необходимости использования процедур компьютерного моделирования. Выполнены исследования для двух- и трехкаскадных конструкций, использующих сверточные коды с мягким декодированием.

Ключевые слова: каскадное кодирование, энергетическая эффективность, помехоустойчивость, достоверность приема.

Введение

Одним из способов повышения помехоустойчивости и эффективности систем связи с многопозиционными видами модуляции является каскадное кодирование и декодирование сигналов. Оно основано на последовательном включении на стороне передачи нескольких ступеней кодирования и соответствующего числа ступеней декодирования на стороне приема [1]. Наибольшее распространение среди известных решений получили составные конструкции с двухкаскадным кодированием и декодированием, в состав которых могут входить блочные, сверточные, двоичные и недвоичные коды. Например, в системах наземного телевизионного вещания стандарта DVB-T и спутникового мультимедийного вещания стандарта DVB-S в качестве внутреннего кода используется несистематический сверточный код (СК) с мягким декодированием, в качестве внешнего – укороченный недвоичный код Рида-Соломона (РС) с жестким решением [2, 3]. Теоретические результаты исследования этих структур обычно приводятся в виде табличных или графических построений, полученных с помощью средств компьютерного моделирования.

Недостатком сложившегося подхода к оценке помехоустойчивости и эффективности систем с кодированием является необходимость представления для исследований значительного многообразия графических зависимостей, учитывающих формат модуляции, способы и параметры кодирования, число и последовательность соединения кодов в каскадной конструкции. В результате исключается замкнутость аналитических исследований базовых характеристик систем (пороговая чувствительность, коэффициент системы, энергетический потенциал радиолиний, информационная эффективность и др.) и теряется понимание имеющихся взаимосвязей между системными показателями и структурой используемых кодов.

Цель статьи состоит в получении достаточно простых и общих аналитических выражений для прямого расчета помехоустойчивости и эффективности систем связи с каскадным кодированием и многопозиционной модуляцией при обеспечении требуемой достоверности приема. Предполагается, что для борьбы с образованием пакетных ошибок в канале связи предусмотрены устройства перемежения и деперемежения данных. Приведенные результаты расчетов даны для двух- и трехкаскадного сверточного кодирования с мягким декодированием.

Математическая модель расчета помехоустойчивости и эффективности систем связи с каскадным кодированием

Основываясь на работе [4], общее уравнение взаимосвязи между вероятностью ошибки P_{bN} на выходе приемного устройства с N -каскадным декодированием и отношением сигнал/шум (ОСШ) h'_k на его входе записывается в следующем виде:

$$P_{bN} = \frac{C_i \sqrt{\mu_{ipN}}}{q_i \sqrt{\pi \cdot h'_k}} \cdot 10^{-\mu_{ipN} \cdot h'_k / 2,3}, \quad (1)$$

$$\mu_{ipN} = \mu_{i1N} \cdot \mu_{i2N} \cdot \dots \cdot \mu_{iNN} = q_i \cdot \prod_{j=1}^N d_{cj} \cdot \beta_{ijN} \cdot R_{jN}; R_{jN} = \prod_{j=1}^N R_j, \quad (2)$$

где C_i – коэффициент, зависящий от формата модуляции; μ_{ipN} – результирующий показатель эффективности N -каскадного декодирования; μ_{ijN} – показатель эффективности декодирования j -ой ступени; q_i – квадрат коэффициента помехоустойчивости для используемого формата модуляции; $h'_k = E_0 / N_0$ – отношение энергии E_0 , затрачиваемой на передачу бита информации, к спектральной плотности мощности шума N_0 ; d_{cj}, β_{ijN} – свободное расстояние кода и функция взаимосвязи между параметрами j -ой ступени декодирования соответственно; R_{jN} – результирующая кодовая скорость; $R_j = k_j / n_j$ – кодовая скорость j -ой ступени кодирования; k_j, n_j – число информационных символов на входе и выходе j -ой ступени кодирования; N – число ступеней кодирования/декодирования; i – индекс, указывающий на используемый формат модуляции.

Расчетные выражения для определения значений C_i и q_i при использовании в системе многопозиционных сигналов с квадратурной амплитудной (КАМ-М), фазовой (ФМ-М), частотной (ЧМ-М), амплитудной (АМ-М) и относительной фазовой (ОФМ-М) модуляцией приведены в табл. 1, где $m = \log_2 M$.

Табл. 1. Расчетные формулы для определения коэффициентов C_i и q_i

Вид модуляции	C_i	q_i
КАМ-М, $m = 2, 4, 6...$	$C_1 = 2(1 - 1/\sqrt{M}) / m$	$q_1 = 3m / 2(M - 1)$
КАМ-М, $m = 3, 5, 7...$	$C_2 = 2 / m$	$q_2 = 3m / 2(M - 0,5)$
ФМ-2, $m = 1$	$C_3 = 0,5$	$q_3 = 1$
ФМ-М, $m \geq 2$	$C_4 = 1 / m$	$q_4 = m \sin^2(\pi / M)$
ЧМ-М, $m \geq 1$	$C_5 = M / 4$	$q_5 = m / 2$
АМ-М, $m \geq 1$	$C_6 = (M - 1) / mM$	$q_6 = 3m / (M^2 - 1)$
ОФМ-2, $m = 1$	$C_7 = 0,5$	$q_7 = 0,897$
ОФМ-М, $m \geq 2$	$C_8 = 1 / m$	$q_8 = m \sin^2(\pi / M \sqrt{2})$

Если в каскадных конструкциях используются сверточные коды с $R_j = 1/n_j$ или с $R_j = (n_j - 1)/n_j$, то функция взаимосвязи между параметрами отдельных ступеней декодирования определяется на основании следующего соотношения:

$$\beta_{ijN} = \left[1 - \frac{q_i w_j \cdot \lg(R_{jN} d_{cj})}{(n_j - r_j) \cdot (-\lg P_{bj})} \right] / \left[1 + w_j (n_j - 1) \sqrt{R_{jN} \cdot P_{bj}} \right], \quad (3)$$

где $w_j = d_{cj}^*/K_j$ – коэффициент, зависящий от параметров кодера; d_{cj}^* – свободное расстояние кода для $R_j = 1/2$; K_j – длина кодового ограничения j -ой ступени кодирования.

В табл. 2 приведены значения d_{cj} для часто используемых оптимальных кодов в зависимости от длины кодового ограничения K_j .

Табл. 2. Значение свободного расстояния кода

K_j	Расстояние кода d_{cj} при кодовой скорости R_j						
	1/4	1/3	1/2	2/3	3/4	5/6	7/8
5	16	12	8	5	4	3	2
7	20	15	10	7	5	4	3
9	24	18	12	8	6	5	4

Отметим, что большему значению d_{cj} соответствует большее значение β_{ijn} (3) и большая эффективность декодирования μ_{ipN} (2). Однако рост d_{cj} приводит к увеличению избыточности кода (меньше R_j) и усложнению его структуры.

Согласно (3) функция взаимосвязи β_{ijn} зависит как от параметров отдельных ступеней декодирования, так и вероятности ошибки P_{bj} на их выходах. Диапазон изменения β_{ijn} составляет от величин, близких к нулю при большом уровне ошибок ($P_{bj} \geq 5 \cdot 10^{-2}$), до единицы при $P_{bj} \rightarrow 0$. Имеющаяся зависимость β_{ijn} и, следовательно, μ_{ipN} от P_{bj} указывает на необходимость правильного выбора типа, параметров и места размещения кода в каскадной конструкции.

Для лучшего понимания проводимых исследований на рис. 1 приведена упрощенная структурная схема блока демодуляции и каскадного декодирования приемного устройства с указанием на ней скоростей передачи данных, вероятностей ошибок и значений, характеризующих эффективность декодирования, где B_0 – информационная скорость.

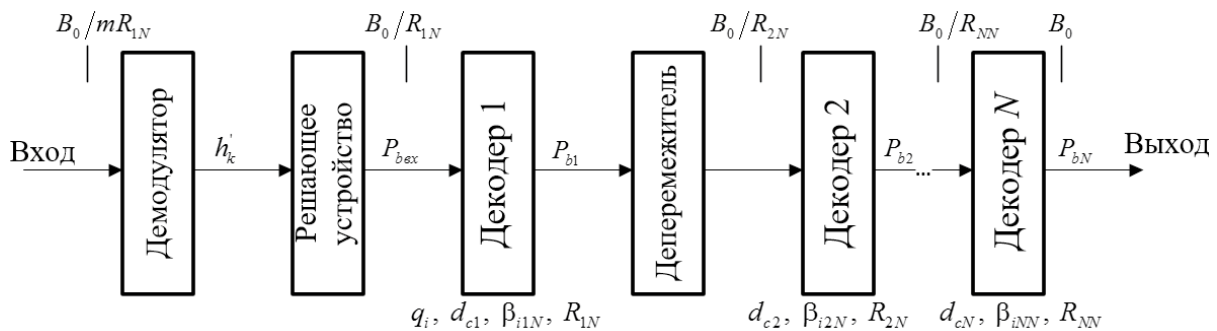


Рис. 1. Структурная схема блока демодуляции и каскадного декодирования

Основываясь на уравнении (1), представляется возможным выразить значение h'_k в зависимости от P_{bN} и получить соотношения для прямого определения помехоустойчивости систем связи с каскадным декодированием и многопозиционными видами сигналов

$$h'_k = \frac{2,3}{\mu_{ipN}} \left[D_{iN} - 0,5 \lg \left[\frac{2,3(D_{iN} - V_{iN})}{\mu_{ipN}} \right] \right]; \quad (4)$$

$$D_{iN} = -\lg P_{bN} - \alpha_i + 0,5 \lg(\mu_{ipN}); \alpha_i = \lg \left(\frac{q_i \sqrt{\pi}}{C_i} \right); V_{iN} = 0,5 \lg \left(\frac{2,3 D_{iN}}{\mu_{ipN}} \right). \quad (5)$$

Из рассмотрения соотношений (4), (5) можно сделать следующие выводы:

– полученные выражения являются достаточно общими для определения помехоустойчивости и энергетической эффективности систем с однокаскадным или N -каскадным декодированием;

– величина ОСШ системы определяется показателем эффективности декодирования первой ступени $\mu_{i1N} = q_i \cdot d_{c1} \cdot \beta_{i1N} \cdot R_{1N}$ и значением ошибки P_{b1} на ее выходе;

– при увеличении числа ступеней декодирования величина ОСШ не изменяется, а повышается исправляющая способность конструкции;

– улучшение помехоустойчивости и достоверности приема связано с увеличением числа ступеней и показателей их эффективности $\mu_{ijN} = d_{cj} \cdot \beta_{ijN} \cdot R_{jN}$;

– увеличение энергетической эффективности (снижение h'_k) обеспечивается увеличением μ_{i1N} первой ступени и выбором режима ее работы в области относительно большого уровня ошибок ($P_{b1} = 10^{-2} \dots 10^{-3}$) в предположении их исправления последующими ступенями.

В соответствии с изложенными выводами устанавливаются требования к параметрам используемых кодов, их структуре и месту размещения в кодовой конструкции.

На основании полученных аналитических соотношений (4), (5) представляется возможным проводить сравнительный анализ энергетического выигрыша от кодирования (ЭВК) при обеспечении равных ошибок на выходах сравниваемых устройств с одинаковыми или разными форматами модуляции. Расчетная формула для определения ЭВК следующая:

$$\Delta G_k = 10 \cdot \lg h'_{kI} / h'_{kII} = h_{kI} - h_{kII}, \text{ дБ}, \tag{6}$$

где h_{kI} , h_{kII} – значения ОСШ сравниваемых устройств, дБ.

При расчете ЭВК в случае сравнения режимов с кодированием и без него значение $h_{kI} = h_0$ определяется по формулам, приведенным в [4, 5].

В табл. 3 и 4 представлены рассчитанные значения h_k и ЭВК (по сравнению с режимом без кодирования) при использовании двух- и трехступенчатого кодирования и модуляции формата КАМ-М. Принято, что длина кодового ограничения $K = 9$, вероятность ошибок на выходах устройств составляет 10^{-6} и 10^{-10} и используется несколько схем кодовых конструкций. При двухкаскадном кодировании во внешней ступени $R_2 = 7/8$, во внутренней R_1 принимает два значения, равные $1/2$ и $3/4$. Для трехкаскадной кодовой конструкции $R_2 = R_3 = 7/8$ и R_1 соответственно $1/2$ и $3/4$.

Табл. 3. Эффективность декодирования для двухкаскадной кодовой структуры

Схема конструкции кода	$P_{b2} = 10^{-6}$		$P_{b2} = 10^{-10}$	
	h_k , дБ	ΔG_k , дБ	h_k , дБ	ΔG_k , дБ
1/2 + 7/8	1,84	8,70	2,76	10,30
3/4 + 7/8	3,15	7,39	3,84	9,22

Табл. 4. Эффективность декодирования для трехкаскадной кодовой структуры

Схема конструкции кода	$P_{b3} = 10^{-6}$		$P_{b3} = 10^{-10}$	
	h_k , дБ	ΔG_k , дБ	h_k , дБ	ΔG_k , дБ
1/2 + 7/8 + 7/8	1,60	8,94	1,70	11,36
3/4 + 7/8 + 7/8	2,75	7,79	2,87	10,19

Из анализа данных таблиц следует, что ЭВК для приведенных схем при обеспечении $P_b = 10^{-6}$ находится в пределах 7,4...8,7 дБ и 7,8...8,95 дБ для двух и трех ступеней декодирования соответственно. При реализации в системе квазибезошибочного приема с

$P_b = 10^{-10}$ выигрыш в ЭВК от использования трехкаскадной конструкции по сравнению с двухкаскадной составляет 1 дБ и растет по мере снижения P_b .

Заключение

Предложены расчетные соотношения для оценки помехоустойчивости и эффективности систем связи с многопозиционными видами модуляции и каскадным кодированием. Показано, что энергетическая эффективность такой системы определяется первой ступенью декодирования, а требуемая помехоустойчивость достигается за счет последующих ступеней в конструкции, обеспечивающих исправление ошибок. Результаты расчетов энергетического выигрыша от кодирования для двух- и трехкаскадных конструкций, использующих сверточные коды и мягкое декодирование, указывают на целесообразность перехода к трехкаскадным устройствам в случаях необходимости обеспечения высокой помехоустойчивости при сверхнизкой вероятности ошибок ($P_b \leq 10^{-10}$) на выходах систем связи.

IMMUNITY OF COMMUNICATION SYSTEMS WITH CASCADE CODING AND MULTI-POSITION MODULATION

E.V. LIPKOVICH, E.A. BELAKON

Abstract. Analytical relationships are proposed for calculating the noise immunity and energy efficiency of communication systems with multi-position modes of modulation and cascade coding without the need to use computer modeling procedures. Research has been carried out for two- and three-stage constructions using soft decoding convolutional codes.

Keywords: concatenated coding, energy efficiency, noise immunity, reception reliability.

Список литературы

1. Блох Э.Л., Зябков В.В. Линейные каскадные коды. М., 1982.
2. ETSI TR 101 290. Digital Video broadcasting (DVB); Measurement guidelines for DVB systems [Электронный ресурс]. URL: <http://www.etsi.org>.
3. ETSI 300 744. Digital Video broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television [Электронный ресурс]. URL: <http://www.etsi.org>.
4. Липкович Э.Б., Серченя А.А. // Электросвязь. 2020. № 10. С. 62–66.
5. Липкович Э.Б. Системы и устройства спутникового мультимедийного вещания и интерактивной связи. Минск: БГУИР, 2020.