РАДИОТЕХНИКА, РАДИОЛОКАЦИЯ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 621.391.84

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ПРОЦЕДУРЫ КОДИРОВАНИЯ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ РАДИОСИГНАЛОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

С. Н. Кириллов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-3673-5709, e-mail: kirillov.lab@mail.ru
А. А. Лисничук, к.т.н., доцент кафедры РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-6562-6942, e-mail: a.a.lisnichuk@gmail.com
П. С. Писака, к.т.н., старший преподаватель кафедры РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-5399-5238, e-mail: pisaka-pavel@rambler.ru
К. В. Грибко, магистрант кафедры РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-4385-8563, e-mail: czarkost@yandex.ru

Рассматриваются вопросы повышения качества результатов обработки телеметрической информации в интересах объективной оценки состояния сложных технических объектов (СТО) в процессе проведения испытаний. ***Целью работы*** *является разработка многокритериальной процедуры выбора кодера (декодера) телеметрических радиосигналов СТО, обеспечивающего устойчивость к воздействию мешающих факторов в канале передачи. Проведено сравнение эффективности известных кодеров по критериям отношения энергии радиосигнала, приходящейся на один бит сообщения, к среднему значению мощности шума E_b/N_0 при частоте необнаруживаемых ошибок после декодирования менее 10^{-9}, задержки (в битах) между моментом появления бита источника в кодере канала и моментом воспроизведения данного бита в декодере без учета задержки для передачи, количества вычислительных операций на бит при декодировании, объема памяти (в Кбитах), необходимой для декодирования кода определенного вида. С применением многокритериального подхода показано, что для обеспечения компромисса между повышением помехоустойчивости телеметрических радиосигналов и снижением требований к аппаратным затратам на декодирование целесообразно использование кодов CC(3,1/2), CC(5,1/2), LDPC(128,64) и LDPC(256,128), обеспечивающих уменьшение значения показателя E_b/N_0 на 3,8 – 9,9 дБ относительно канала без кодирования.*

Ключевые слова: *радиосигнал, телеметрическая информация, помехоустойчивое кодирование, многокритериальный подход, сложный технический объект.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-75-3-14

Введение

Оценка состояния сложных технических объектов (СТО) осуществляется путем обработки и анализа телеметрической информации (ТМИ), сформированной на борту изделия и переданной по радиоканалу приемно-регистрирующим станциям (ПРС). В радиоканале присутствуют различные мешающие факторы в виде помех и шумов как естественного, так и искусственного происхождения. Данные факторы могут оказывать существенное влияние на передаваемый телеметрический радиосигнал, что, в свою очередь, приводит к приему и регистрации ПРС недостоверной ТМИ с искаженной структурой. Это может приводить к невозможности адекватной оценки состояния СТО.

Одним из способов повышения качества результатов обработки ТМИ является проведение совместной обработки телеметрических радиосигналов от нескольких ПРС, установленных на

протяжении трассы полета объекта. Так, в работе [1] обоснована процедура монтажа единого носителя ТМИ СТО. Другим важным направлением повышения качества результатов обработки ТМИ является обеспечение регистрации ПРС достоверной ТМИ, что представляется возможным при использовании радиосигналов, более устойчивых к действию мешающих факторов в канале передачи информации [2]. Кроме того, в целях дополнительного повышения достоверности ТМИ целесообразно применять помехоустойчивое кодирование информации [3]. Однако выбор данной процедуры по одному критерию качества (например, достоверности ТМИ) не всегда позволяет получить приемлемое решение с точки зрения других важных показателей (задержка данных, сложность декодера и пр.). Ситуация осложняется тем, что на практике с учетом многообразия воздействия внешних условий и характеристик различных СТО важность дополнительных критериев качества может значительно повышаться. Данные обстоятельства делают целесообразным использование многокритериального подхода при выборе процедуры помехоустойчивого кодирования ТМИ.

Постановка задачи

На борту СТО установлены различные системы – система управления, терморегулирования, электропитания и др., совместное корректное функционирование которых обеспечивает штатную эксплуатацию объекта в целом при проведении всех видов испытаний. Бортовая система телеметрических измерений (БСТИ) осуществляет сбор информации с датчиков, характеризующих состояние узлов, и формирование на ее основе группового телеметрического радиосигнала. В настоящее время разработан ряд отечественных БСТИ, характеризующихся различными требованиями по функционированию вычислительных модулей в неблагоприятных условиях эксплуатации [4]. В свою очередь, международным консультативным комитетом по космическим системам передачи данных (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS) предложены основные рекомендации по стандартизации процесса создания БСТИ как телеметрической системы CCSDS на основе двух основных категорий: пакетной передачи и кодирования ТМИ [5].

Цель работы – разработка многокритериальной процедуры выбора кодера (декодера) телеметрических радиосигналов, формируемых СТО и обеспечивающих устойчивость к воздействию мешающих факторов в канале передачи.

Обзор рассматриваемых процедур помехоустойчивого кодирования информации

Рекомендациями CCSDS рассмотрено использование в радиосистемах передачи данных в целях кодирования ТМИ следующих процедур помехоустойчивого кодирования [5]:

1. Коды с малой плотностью проверок на четность (LDPC-коды).
2. Коды Боуза – Чоудхури – Хонвингема (BCH-коды) с исправлением одиночной ошибки (SEC) и с обнаружением тройной ошибки (TED).
3. Сверточные-коды (CC-коды).
4. Последовательно соединенные сверточные коды (SCCC-коды).

Коды LDPC задаются непосредственно матрицей проверки на четность $H_{m\times n}$, где m – количество линейно-независимых строк, представляющих собой уравнения проверки на четность, а n – количество столбцов, соответствующих числу разрядов кодированной последовательности. Таким образом, кодер LDPC однозначно отображает входной кадр из $k = n - m$ информационных разрядов в кодированную последовательность из n разрядов. В работе [6] предложены следующие коды LDPC вида (n,k): $\mathrm{LDPC}(128,64)$, $\mathrm{LDPC}(256,128)$, $\mathrm{LDPC}(512,256)$. Кодовая скорость r для кодера может быть определена как [7]:

$$r = k/n. \quad (1)$$

С учетом выражения (1) кодовая скорость r для кодов $\mathrm{LDPC}(128,64)$, $\mathrm{LDPC}(256,128)$, $\mathrm{LDPC}(512,256)$ составляет $r = 1/2$. Матрицы $H_{m\times n}$ для указанных видов кодов представлены в виде:

$$H_{64\times128}=\begin{bmatrix} I_M\oplus\Phi^7 & \Phi^2 & \Phi^{14} & \Phi^6 & O_M & \Phi^0 & \Phi^{13} & I_M \\ \Phi^6 & I_M\oplus\Phi^{15} & \Phi^0 & \Phi^1 & I_M & O_M & \Phi^0 & \Phi^7 \\ \Phi^4 & \Phi^1 & I_M\oplus\Phi^{15} & \Phi^{14} & \Phi^{11} & I_M & O_M & \Phi^3 \\ \Phi^0 & \Phi^1 & \Phi^9 & I_M\oplus\Phi^{13} & \Phi^{14} & \Phi^1 & I_M & O_M \end{bmatrix},$$

$$H_{128\times256}=\begin{bmatrix} I_M\oplus\Phi^{31} & \Phi^{15} & \Phi^{25} & \Phi^0 & O_M & \Phi^{20} & \Phi^{12} & I_M \\ \Phi^{28} & I_M\oplus\Phi^{30} & \Phi^{29} & \Phi^{24} & I_M & O_M & \Phi^1 & \Phi^{20} \\ \Phi^8 & \Phi^0 & I_M\oplus\Phi^{28} & \Phi^1 & \Phi^{29} & I_M & O_M & \Phi^{21} \\ \Phi^{18} & \Phi^{30} & \Phi^0 & I_M\oplus\Phi^{30} & \Phi^{25} & \Phi^{26} & I_M & O_M \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$H_{256\times512}=\begin{bmatrix} I_M\oplus\Phi^{63} & \Phi^{30} & \Phi^{50} & \Phi^{25} & O_M & \Phi^{43} & \Phi^{62} & I_M \\ \Phi^{56} & I_M\oplus\Phi^{61} & \Phi^{50} & \Phi^{23} & I_M & O_M & \Phi^{37} & \Phi^{26} \\ \Phi^{16} & \Phi^0 & I_M\oplus\Phi^{55} & \Phi^{27} & \Phi^{56} & I_M & O_M & \Phi^{43} \\ \Phi^{35} & \Phi^{56} & \Phi^{62} & I_M\oplus\Phi^{11} & \Phi^{58} & \Phi^3 & I_M & O_M \end{bmatrix},$$

где M – размер подматрицы, $M=k/4=n/8$, I_M – единичная матрица $M\times M$, O_M – нулевая матрица $M\times M$, Φ^j – j-й, $j=0,...,M-1$ правый круговой сдвиг матрицы I_M.

Для получения кода BCH используется полином генератора $h(x)$, обеспечивающий получение 7-ми бит четности вида [8]:

$$h(x)=x^7+x^6+x^2+1. \quad (3)$$

Сверточные коды вида (K,r) представляет собой кодированную n-разрядную последовательность для входного кадра из m информационных разрядов с ограничением $K=u+n$, где u – память кодера. Таким образом, число возможных состояний кодера определяется как 2^u.

В работе [9] предложены следующие СС-коды вида (K,r): $\mathrm{CC}(3,1/2)$, $\mathrm{CC}(5,1/2)$, $\mathrm{CC}(7,1/2)$, $\mathrm{CC}(9,1/2)$. Структура СС-кода определяется способом подключения сумматора к регистру сдвига, заданному с помощью множества порождающих полиномов $G^{(K)}$ с учетом значения кодового ограничения K как

$$G^{(K)}=\left\{g_j^{(K)}\right\},\ g_j^{(K)}=\left(g_{j,1},...,g_{j,u}\right),\ j=1,...,n, \quad (4)$$

где $g_j^{(K)}$ – вектор, $g_{j,l}$ – связь между j-м, $j=1,...,n$ элементом регистра сдвига и l-м, $l=1,...,u$ сумматором.

Так, для указанных СС-кодов векторы множества G представлены выражениями (5) – (8) соответственно:

$$g_1^{(3)}=(111_2)=x^2+x^1+1,\quad g_2^{(3)}=(101_2)=x^2+1. \quad (5)$$

$$g_1^{(5)}=(11111_2)=x^4+x^3+x^2+x^1+1,\quad g_2^{(5)}=(11011_2)=x^4+x^3+x^1+1. \quad (6)$$

$$g_1^{(7)}=(1111001_2)=x^6+x^3+x^2+x^1+1,\quad g_2^{(7)}=(1011011_2)=x^6+x^5+x^3+x^2+1. \quad (7)$$

$$g_1^{(9)}=(101110001_2)=x^8+x^4+x^3+x^2+1,\quad g_2^{(9)}=(111101011_2)=x^8+x^7+x^5+x^3+x^2+x^1+1. \quad (8)$$

SCCC задается двумя последовательно соединенными внешним и внутренним кодерами $\mathrm{CC}(3,1/2)$. На выходе внешнего кодера происходит выкалывание каждого 4-го выходного

разряда с последующим перемежением разрядов, для более равномерного распределения ошибочных бит. Применение алгоритма перемежения обеспечивает выдачу Z разрядов с адресами чтения, определяемыми как [10]:

$$v(i) = D\left[\left(\left[\frac{i}{D}\right] + \gamma(i_d)\right) \bmod 120\right] + \chi(i_d),\ i = 0,...,Z-1, \quad (9)$$

где $v(i)$ – адрес чтения i-го, $i = 0,...,Z-1,$ разряда, χ, γ – векторы параметров перемежителя длиной $D = Z/120$, $i_d \equiv (i \mod D)$.

На выходе внутреннего кодера выполняется выкалывание разрядов в целях получения требуемой скорости кодирования. При этом для выкалывания систематических разрядов и разрядов четности используются два различных алгоритма [10]. Оставшиеся после выкалывания разряды поступают на вход перемежителя типа «строка-столбец» следующим образом: вначале систематические разряды, а далее – разряды четности.

Теоретические основы многокритериального подхода к выбору процедуры кодирования телеметрических радиосигналов

Анализ эффективности рассматриваемых видов кодов целесообразно провести на основе многокритериального подхода, учитывающего конечное множество показателей качества $W = \{w_i\},\ i = 1,..,c$, где w_i – i-й частный показатель, c – количество показателей.

Обозначим через $w_{i,j}$ значение i-го, $i = 1,...,c$ показателя множества W для j-го, $j = 1,...,s,$ вида кода, где s – количество анализируемых видов кода.

Первым этапом многокритериального подхода является нормировка значений показателей $w_{i,j},\ i = 1,...,c,\ j = 1,...,s,$ при использовании выражения:

$$w^*_{i,j} = w_{i,j} \Big/ w_{i,j\ \max}, \quad (10)$$

где $w^*_{i,j}$ – нормированное значение показателя $w_{i,j},\ i = 1,...,c,\ j = 1,...,s$, $w_{i,j\ \max} = \max_j(w_{i,j})$ – максимальное значение i-го, $i = 1,..,c$ показателя $w_{i,j}$ для s анализируемых видов кодов.

Далее осуществляется выбор эффективной процедуры кодирования из рассматриваемых, для чего показатели качества $w^*_{i,j},\ i = 1,...,c,\ j = 1,...,s,$ для каждого анализируемого вида кода необходимо привести к виду, пригодному для минимизации с использованием множества весовых коэффициентов $R = \{\alpha_i\},\ i = 1,...,c,$ где α_i – i-й весовой коэффициент для i-го, $i = 1,..,c$ показателя множества W, c – количество весовых коэффициентов. Обязательным для выбора весовых коэффициентов $\alpha_i,\ i = 1,..,c,$ множества R является выполнение условия:

$$\sum_{i=1}^{c} \alpha_i = 1. \quad (11)$$

Выбор значений весовых коэффициентов $\alpha_i,\ i = 1,..,c,$ множества R должен осуществляться на основе необходимости повышения качества результатов обработки ТМИ в целях проведения объективной оценки состояния СТО. Применение помехоустойчивого кодирования ТМИ сопровождается увеличением защищенности телеметрических радиосигналов от воздействия мешающих факторов в канале передачи информации, с одной стороны, и снижением пропускной способности – с другой. Отсюда целесообразно множество весовых коэффициентов R выбирать исходя из характеристик эксплуатации отдельной БСТИ.

На заключительном этапе многокритериального подхода рассчитывается значение показателя β_j для j-го, $j = 1,..,s,$ вида кода в соответствии с выражением:

$$\beta_j = \sum_{i=1}^{c} \alpha_i w_{i,j}^*,\ i = 1,...,c,\ j = 1,...,s. \quad (12)$$

На основании выражений (11) и (12) можно сделать вывод о целесообразности использования j-го, $j = 1,...,s,$ вида помехоустойчивого кодирования телеметрических радиосигналов при достижении минимального значения $\beta_j, j = 1,...,s,$ для выбранного множества показателей W и множества весовых коэффициентов R.

Практические аспекты применения многокритериального подхода к выбору процедуры кодирования телеметрических радиосигналов

В качестве элементов множества W целесообразно использовать следующие показатели:

1. w_1 – отношение E_b/N_0, необходимое для обеспечения требуемого качества частоты необнаруживаемых ошибок после декодирования менее 10^{-9}, где E_b – энергия сигнала, приходящаяся на один бит сообщения, N_0 – среднее значение мощности шума в канале передачи информации.

2. w_2 – задержка (в битах) между моментом появления первого бита в кодере канала и моментом воспроизведения данного бита в декодере без учета задержки для передачи.

3. w_3 – количество вычислительных операций при декодировании в расчете на один бит.

4. w_4 – память, определяемая как количество Кбит, необходимое для декодирования кода определенного вида.

Таким образом, сформировано множество показателей $W = \{w_i\}$, $i = 1,...,c$, $c = 4$, необходимых для применения многокритериального подхода к выбору кодера телеметрических радиосигналов. Исходные данные для анализа $s = 12$ кодеров представлены в таблице 1 [5].

Таблица 1 – Исходные данные для анализа кодеров

Table 1 – Initial data for the analysis of encoders

№ п/п	Код	w_1, дБ	w_2, бит	w_3, операций/бит	w_4, Кбит
1	BCH, SEC	9,60	56	1	0,006
2	BCH, TED	9,90	56	2	0,069
3	BCH	9,00	56	1	0,069
4	CC(3,1/2)	9,60	10	12	0,072
5	CC(5,1/2)	8,11	20	48	0,450
6	CC(7,1/2)	7,20	40	192	2,300
7	CC(9,1/2)	6,09	60	768	11,800
8	LDPC(128,64)	5,30	96	248	8,200
9	LDPC(256,128)	3,50	192	992	32,000
10	LDPC(512,256)	3,00	384	3968	128,000
11	SCCC	6,50	96	290	7,200
12	Без кодирования	13,4	0	0	0

На основании исходных данных, представленных в таблице 1, с использованием выражения (10) проведена нормировка значений показателей $w_{i,j}$, $i = 1,...,4$, $j = 1,...,12$. Результаты нормировки приведены в таблице 2.

В интересах учета особенностей эксплуатации отдельных БСТИ [4] при различных условиях целесообразно рассмотреть множества R, состоящие из значений весовых коэффициентов α_i, $i = 1,..,c$, $\alpha_i = [0;1]$ с шагом 0,1, принимая во внимание условие (11). Поскольку

значения показателей w_3 и w_4 в равной степени оказывают влияние на производительность БСТИ, для них целесообразно использовать один весовой коэффициент $\alpha_3^{'}$ равный:

$$\alpha_3^{'} = \alpha_3 + \alpha_4, \quad \alpha_3 = \alpha_4. \tag{13}$$

Таблица 2 – Результаты нормировки значений показателей
Table 2 – Results of normalized values of indicators

№ п/п	Код	w_1^*	w_2^*	w_3^*	w_4^*
1	BCH, SEC	0,716	0,146	0,00025	0,00005
2	BCH, TED	0,739	0,146	0,00050	0,00054
3	BCH	0,672	0,146	0,00025	0,00054
4	$CC(3,1/2)$	0,716	0,026	0,00302	0,00056
5	$CC(5,1/2)$	0,605	0,052	0,01210	0,00352
6	$CC(7,1/2)$	0,537	0,104	0,04839	0,01797
7	$CC(9,1/2)$	0,454	0,156	0,19355	0,09219
8	$LDPC(128,64)$	0,396	0,250	0,06250	0,06406
9	$LDPC(256,128)$	0,261	0,500	0,25000	0,25000
10	$LDPC(512,256)$	0,224	1,000	1,00000	1,00000
11	SCCC	0,485	0,250	0,07308	0,05625
12	Без кодирования	1,000	0,000	0,00000	0,00000

С учетом выражения (13) условие (11) принимает вид:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3^{'} = 1. \tag{14}$$

С практической точки зрения большой интерес представляет определение компромисса между повышением помехоустойчивости телеметрических радиосигналов, с одной стороны, и снижением требований к аппаратным затратам на декодирование – с другой. В результате формируется множество целевых функций:

$$\beta_j\left(\alpha_1, \alpha_3^{'}\right) = w_1^*\alpha_1 + w_2^*\alpha_2 + \left(w_3^* + w_4^*\right)\alpha_3^{'}, \quad j = 1,..,12. \tag{15}$$

При этом в выражении (15) значение весового коэффициента α_2 определяется с учетом выражения (14). На основе сформированных множеств весовых коэффициентов R с учетом выражения (15) проведен расчет значений целевой функции $\beta_j\left(\alpha_1, \alpha_3^{'}\right)$, $j = 1,..,12$. Для каждого множества R определена j-я , $j = 1,..,12,$ процедура помехоустойчивого кодирования, для которой соответствующее значение целевой функции $\beta_j\left(\alpha_1, \alpha_3^{'}\right)$, $j = 1,...,12,$ минимально. Результаты расчета минимального значения целевой функции $\beta_j\left(\alpha_1, \alpha_3^{'}\right)$, $j = 1,...,12,$ для рассматриваемых множеств R, а также выбора соответствующей процедуры помехоустойчивого кодирования при заданных значениях весовых коэффициентов α_1 и $\alpha_3^{'}$ представлены в таблице 3.

В соответствии с таблицей 3 при $\alpha_1 + \alpha_3^{'} = 1$, где $\alpha_1 > \alpha_3^{'}$, проанализировано семейство процедур помехоустойчивого кодирования, применение которых позволяет обеспечить наилучший результат в достижении требуемого качества частоты необнаруживаемых ошибок после декодирования телеметрических радиосигналов при воздействии мешающих факторов в канале передачи информации. В свою очередь, при $\alpha_1 + \alpha_3^{'} = 1$, где $\alpha_1 < \alpha_3^{'}$, проанализировано семейство процедур помехоустойчивого кодирования с приоритетом на минимальные требования к аппаратным затратам на декодирование.

Таблица 3 – Многокритериальный выбор процедуры помехоустойчивого кодирования на основе целевой функции $\beta_j(\alpha_1, \alpha_3^{'}), \quad j = 1,...,12$

Table 3 – Multi-criteria choice of error-correcting coding procedure based on objective function $\beta_j(\alpha_1, \alpha_3^{'}), \quad j = 1,...,12$

$\alpha_3^{'}$ / α_1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}026$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}024$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}022$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}019$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}017$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}015$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}013$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}01$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}008$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}006$	BCH, SEC, $\beta = 0{,}0003$
0,1	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}095$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}093$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}091$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}088$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}086$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}084$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}082$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}079$	CC (3,1/2) $\beta = 0{,}077$	BCH $\beta = 0{,}068$	-
0,2	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}163$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}159$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}155$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}152$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}184$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}144$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}141$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}137$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}134$	-	-
0,3	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}218$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}214$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}211$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}207$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}203$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}199$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}196$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}192$	-	-	-
0,4	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}273$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}269$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}266$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}262$	CC (5,1/2) $\beta = 0{,}256$	LDPC (128,64) $\beta = 0{,}247$	LDPC (128,64) $\beta = 0{,}234$	-	-	-	-
0,5	CC (9,1/2) $\beta = 0{,}305$	LDPC (128,64) $\beta = 0{,}31$	LDPC (128,64) $\beta = 0{,}298$	LDPC (128,64) $\beta = 0{,}286$	LDPC (128,64) $\beta = 0{,}274$	LDPC (128,64) $\beta = 0{,}261$	-	-	-	-	-
0,6	CC (9,1/2) $\beta = 0{,}335$	LDPC (128,64) $\beta = 0{,}325$	LDPC (128,64) $\beta = 0{,}313$	LDPC (128,64) $\beta = 0{,}301$	LDPC (128,64) $\beta = 0{,}288$	-	-	-	-	-	-
0,7	LDPC (256,128) $\beta = 0{,}333$	LDPC (256,128) $\beta = 0{,}333$	LDPC (128,64) $\beta = 0{,}328$	LDPC (128,64) $\beta = 0{,}315$	-	-	-	-	-	-	-
0,8	LDPC (256,128) $\beta = 0{,}309$	LDPC (256,128) $\beta = 0{,}309$	LDPC (256,128) $\beta = 0{,}309$	-	-	-	-	-	-	-	-
0,9	LDPC (256,128) $\beta = 0{,}285$	LDPC (256,128) $\beta = 0{,}285$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	LDPC (512,256) $\beta = 0{,}244$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

В первом случае, при $\alpha_1 > \alpha_3^{'}$, достижение наименьшего значения целевой функции $\beta_j\left(\alpha_1, \alpha_3^{'}\right)$, $j = 1,...,12$, обеспечивается применением кодов LDPC с различной размерностью матрицы проверки на четность $H_{m\times n}$. Размерность выбирается исходя из минимальных требований к вычислительным затратам на декодирование, что приводит к повышению защищенности телеметрических радиосигналов от воздействия мешающих факторов в канале передачи информации. При $\alpha_1 = 1$, $\alpha_3^{'} = 0$ процедурой, реализующей наилучшее достижение требуемого качества частоты необнаруживаемых ошибок после декодирования, является LDPC(512,256), что обеспечивает уменьшение значения показателя $w_1 = E_b/N_0$ на 10,4 дБ (с 13,4 до 3 дБ) относительно канала без кодирования. При этом выигрыш в отношении E_b/N_0 составляет 77,6 %.

Во втором случае, при $\alpha_1 < \alpha_3^{'}$, целесообразно использовать процедуры помехоустойчивого кодирования BCH SEC, BCH, CC(5,1/2) и LDPC(128,64). При $\alpha_1 = 0$, $\alpha_3^{'} = 1$ наибольший приоритет в обеспечении минимальных требований к аппаратным затратам на декодирование достигается применением кода BCH SEC, что обеспечивает уменьшение значения показателя $w_1 = E_b/N_0$ на 3,8 дБ (с 13,4 до 9,6 дБ) относительно канала без кодирования. При этом выигрыш в отношении E_b/N_0 составляет 28,4 %.

В свою очередь, при $\alpha_1 = \alpha_3^{'} = 0,5$, т.е. когда в процессе проектировании БСТИ показатели качества: отношение $w_1 = E_b/N_0$ при заданных вероятностных характеристиках, количество вычисляемых операций на бит w_3 и затраты памяти на декодирование w_4 имеют одинаковые значения весовых коэффициентов, целесообразно использование кода LDPC(128,64), что обеспечивает уменьшение значения показателя $w_1 = E_b/N_0$ на 8,1 дБ (с 13,4 до 5,3 дБ) относительно канала без кодирования. При этом выигрыш в отношении E_b/N_0 составляет 60,4 %.

Из анализа таблицы 3 следует что, при значениях весового коэффициента $\alpha_1 \in [0;0,5)$ достижение минимального значения целевой функции $\beta_j\left(\alpha_1, \alpha_3^{'}\right)$, $j = 1,...,12$, обеспечивается в случае использования сверточных кодов различной длины K. При этом с ростом значения весового коэффициента α_1, характеризующего вес показателя отношения E_b/N_0, длина сверточного кода K увеличивается.

Так, использование кода CC(5,1/2) обеспечивает уменьшение значения показателя $w_1 = E_b/N_0$ на 1,49 дБ (с 9,6 до 8,11 дБ) по сравнению с применением кода CC(3,1/2). Отсюда, применение кода CC(5,1/2) по сравнению с кодом CC(3,1/2) характеризуется:

1) выигрышем на 15,5 % в отношении E_b/N_0, необходимом для обеспечения требуемого качества частоты необнаруживаемых ошибок после декодирования менее 10^{-9};

2) увеличением в 4 раза (с 12 до 48 операций/бит) количества вычислительных операций при декодировании в расчете на один бит;

3) увеличением в 6,25 раза (с 0,072 до 0,45 Кбит) объема памяти, необходимой для декодирования заданного кода.

Кроме того, применение кода CC(5,1/2) обеспечивает уменьшение значения показателя $w_1 = E_b/N_0$ на 5,29 дБ (с 13,4 до 8,11 дБ) относительно канала без кодирования. При этом выигрыш в отношении E_b/N_0 составляет 39,5 %.

С ростом значения весового коэффициента α_1 вес выигрыша в отношении E_b/N_0, необходимом для обеспечения требуемого качества частоты необнаруживаемых ошибок после

декодирования менее 10^{-9} в целевой функции $\beta_5\left(\alpha_1,\alpha_3^{'}\right)$ повышается, а вес увеличения количества вычислительных операций при декодировании в расчете на один бит и памяти, необходимой для декодирования заданного кода, представленных весовым коэффициентом $\alpha_3^{'}$ уменьшается. Однако при малых значениях весового коэффициента $\alpha_1 \in [0;0,2)$ использование кода $\mathrm{CC}(3,1/2)$ обеспечивает достижение меньшего значения целевой функции $\beta_4\left(\alpha_1,\alpha_3^{'}\right) < \beta_5\left(\alpha_1,\alpha_3^{'}\right)$ при соответствующем увеличении значения весового коэффициента $\alpha_3^{'}$, а следовательно, и параметров, им определяющихся. Кроме того, применение кода $\mathrm{CC}(3,1/2)$ обеспечивает уменьшение значения показателя $w_1 = E_b/N_0$ на 3,8 дБ (с 13,4 до 9,6 дБ) относительно канала без кодирования. При этом, выигрыш в отношении E_b/N_0 составляет 28,4 %.

При $\alpha_1 \in [0,5;1]$ достижение минимального значения целевой функции $\beta_j\left(\alpha_1,\alpha_3^{'}\right)$, $j=1,...,12,$ обеспечивается в случае использования LDPC кодов с матрицей проверки на четность $H_{m\times n}$ различной размерности. При этом с ростом значения весового коэффициента α_1, характеризующего вес показателя отношения E_b/N_0, размерность матрицы $H_{m\times n}$ увеличивается.

Использование кода $\mathrm{LDPC}(128,64)$ обеспечивает уменьшение значения показателя $w_1 = E_b/N_0$ на 2,81 дБ (с 8,11 до 5,3 дБ) по сравнению с применением кода $\mathrm{CC}(5,1/2)$. Отсюда применение кода $\mathrm{LDPC}(128,64)$ по сравнению с кодом $\mathrm{CC}(5,1/2)$ характеризуется:

1) выигрышем на 34,7 % в отношении E_b/N_0, необходимом для обеспечения требуемого качества частоты необнаруживаемых ошибок после декодирования менее 10^{-9};

2) увеличением в 5,1 раз (с 48 до 248 операций/бит) количества вычислительных операций при декодировании в расчете на один бит;

3) увеличением в 18,2 раза (с 0,45 до 8,2 Кбит) объема памяти, необходимого для декодирования заданного кода.

Кроме того, в соответствии с вышеизложенным, применение кода $\mathrm{LDPC}(128,64)$ обеспечивает уменьшение значения показателя $w_1 = E_b/N_0$ на 8,1 дБ (с 13,4 до 5,3 дБ) относительно канала без кодирования. При этом выигрыш в отношении E_b/N_0 составляет 60,4 %.

Использование кода $\mathrm{LDPC}(256,128)$ обеспечивает уменьшение значения показателя $w_1 = E_b/N_0$ на 1,8 дБ (с 5,3 до 3,5 дБ) по сравнению с применением кода $\mathrm{LDPC}(128,64)$. Отсюда применение кода $\mathrm{LDPC}(256,128)$ по сравнению с кодом $\mathrm{LDPC}(128,64)$ характеризуется:

1) выигрышем на 34 % в отношении E_b/N_0, необходимом для обеспечения требуемого качества частоты необнаруживаемых ошибок после декодирования менее 10^{-9};

2) увеличением в 4 раза (с 248 до 992 операций/бит) количества вычислительных операций при декодировании в расчете на один бит;

3) увеличением в 3,9 раза (с 8,2 до 32 Кбит) объема памяти, необходимого для декодирования заданного кода.

Кроме того, применение кода $\mathrm{LDPC}(256,128)$ обеспечивает уменьшение значения показателя $w_1 = E_b/N_0$ на 9,9 дБ (с 13,4 до 3,5 дБ) относительно канала без кодирования. При этом выигрыш в отношении E_b/N_0 составляет 73,9 %.

При значении весового коэффициента $\alpha_1 = 1$ применение кода $\mathrm{LDPC}(512,256)$ обеспечивает достижение значения целевой функции $\beta_{10}\left(\alpha_1,\alpha_3^{'}\right)$, меньшего, чем $\beta_9\left(\alpha_1,\alpha_3^{'}\right)$ при

применении кода LDPC (256,128), т.е. $\beta_{10}(1,0) < \beta_9(1,0)$. Данное условие выполняется в случае, когда при проектировании БСТИ наиболее важным является обеспечение требуемого качества частоты необнаруживаемых ошибок после декодирования менее 10^{-9}. При этом производительность БСТИ не анализируется. Кроме того, в данном случае, применение кода LDPC (512,256) обеспечивает уменьшение значения показателя $w_1 = E_b/N_0$ на 0,5 дБ (с 3,5 до 3, дБ), что соответствует выигрышу 14,3 % в отношении E_b/N_0 .

Кроме того, в соответствии с вышеизложенным применение кода LDPC (512,256) обеспечивает уменьшение значения показателя $w_1 = E_b/N_0$ на 10,4 дБ (с 13,4 до 3 дБ) относительно канала без кодирования. При этом, выигрыш в отношении E_b/N_0 составляет 77,6 %.

Заключение

Рассмотрены вопросы многокритериального выбора процедуры помехоустойчивого кодирования телеметрических радиосигналов, формируемых СТО. Проведено сравнение эффективности различных видов кодов по критериям отношения энергии сигнала, приходящейся на один бит сообщения, к среднему значению мощности шума в канале передачи информации при частоте необнаруживаемых ошибок после декодирования менее 10^{-9}, задержки (в битах) между моментом появления бита источника в кодере канала и моментом воспроизведения данного бита в декодере без учета задержки для передачи, количества вычислительных операций на бит, объема памяти (в Кбитах), необходимой для декодирования кода определенного вида. Сформирована таблица кодов с минимальными значениями целевой функции при различных наборах весовых коэффициентов. По результатам анализа даны рекомендации по выбору процедуры помехоустойчивого кодирования, учитывающей одновременно защищенность телеметрических радиосигналов от воздействия мешающих факторов в канале передачи информации, с одной стороны, и снижение требований к аппаратным затратам на декодирование – с другой. С применением многокритериального подхода показано, что для обеспечения минимальных требований к аппаратным затратам на декодирование целесообразно использование кода BCH SEC, что позволяет уменьшить значение показателя E_b/N_0 на 3,8 дБ (с 13,4 до 9,6 дБ) относительно канала без кодирования. Для достижения требуемого качества частоты необнаруживаемых ошибок после декодирования целесообразно использование кода LDPC(512,256), что обеспечивает уменьшение значения показателя E_b/N_0 на 10,4 дБ (с 13,4 до 3 дБ) относительно канала без кодирования. В свою очередь, в целях обеспечения компромисса между повышением помехоустойчивости телеметрических радиосигналов и снижением требований к аппаратным затратам на декодирование целесообразно использование кодов CC(3,1/2), CC(5,1/2), LDPC(128,64) и LDPC(256,128), что обеспечивает уменьшение значения показателя E_b/N_0 на 3,8 – 9,9 дБ относительно канала без кодирования.

Библиографический список

1. **Кириллов С. Н., Писака П. С.** Процедура монтажа единого носителя телеметрической информации изделий ракетно-космической техники при территориально-распределенных приемных станциях // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 65. С. 12-18. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-12-18.

2. **Лисничук А. А.** Процедура многокритериального синтеза сигналов с прямым расширением спектра для адаптации когнитивных радиосистем передачи информации к сложной помеховой обстановке // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 66-1. С. 9-15. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-9-15.

3. **Муттер В. М.** Основы помехоустойчивой телепередачи информации. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.

4. Современная телеметрия в теории и на практике: учебный курс / под ред. **Г. И. Козырева**. СПб.: Наука и техника, 2007. 672 с.

5. Next Generation Uplink, Green Book, Issue 1, Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) Report Concerning Space Data System Standards 230.2-G-1, Jul. 2014.

6. CCSDS 231.1-O-1, "Short block length LDPC codes for TC synchronization and channel coding", The Consultative Committee for Space Data Systems, Orange book, Issue 1, April 2015.

7. **Кларк Дж., Кейн Дж.** Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. – 392 с.

8. CCSDS 231.0-B-3, «TC synchronization and channel coding», The Consultative Committee for Space Data Systems, Blue book, Recommended Standard, issue 3, September 2017.

9. CCSDS 130.1-G-3, «TM synchronization and channel coding – summary of concept and rationale», The Consultative Committee for Space Data Systems, Green book, Informational Report, issue 3, June 2020.

10. CCSDS 131.2-B-1, «Flexible Advanced Coding and Modulation Scheme for High Rate Telemetry Applications», The Consultative Committee for Space Data Systems, Blue book, Recommended Standard, Issue 1, March 2012.

UDC 621.391.84

MULTI-CRITERIA APPROACH TO SELECT THE PROCEDURE OF TELEMETRIC RADIO SIGNALS CODING IN COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

S. N. Kirillov, Dr. in technical sciences, full Professor, Head of the Department of Radio control and Communications, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-3673-5709, e-mail: kirillov.lab@mail.ru
A. A. Lisnichuk, PhD (technical sciences), Associate Professor of the Department of Radio control and Communications, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-6562-6942, e-mail: a.a.lisnichuk@gmail.com
P. S. Pisaka, PhD (technical sciences), Senior Lecturer at the Department of Radio control and Communications, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-5399-5238, e-mail: pisaka-pavel@rambler.ru
K. V. Gribko, master student of the Department of Radio control and Communications, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-4385-8563, e-mail: czarkost@yandex.ru

The issues of improving the quality of the results in telemetric information processing are considered in the interests of an objective assessment of the state of complex technical objects (STO) in the process of testing. ***The aim of the work*** *is to develop a multi-criteria procedure for choosing an encoder (decoder) of telemetric radio signals of a service station, which ensures resistance to the influence of interfering factors in transmission channel. Comparison of known encoders efficiency is made according to the following criteria: the ratio of radio signal energy per one message bit to the average value of noise power* E_b/N_0 *with undetectable error rate after decoding less than* 10^{-9}*, the delay (in bits) between the moment when a source bit appears in channel encoder and the moment of bit reproduction in a decoder neglecting transmission delay, the number of computational operations per bit during decoding, the amount of memory (in Kbits) required to decode a code of a certain type. Multi-criteria approach has shown that a compromise between increased error correction of telemetric radio signals and reduced requirements to hardware costs for decoding requires the application of CC (3.1 / 2), CC (5.1 / 2), LDPC codes (128, 64) and LDPC (256,128), providing the decrease in indicator value* E_b/N_0 *on 3,8 – 9,9 dB relative to uncoded channel.*

Key words: *radio signal, telemetry information, error-correcting coding, multi-criteria approach, complex technical object.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-75-3-14

References

1. **Kirillov S. N., Pisaka P. S.** Procedura montazha edinogo nositelja telemetricheskoj infor-macii izdelij raketno-kosmicheskoj tehniki pri territorial'no-raspredelennyh priemnyh stancijah. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 2018, no. 65, pp. 12-18. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-12-18. (in Russian).

2. **Lisnichuk A.A.** Procedura mnogokriterial'nogo sinteza signalov s prjamym rasshireniem spektra dlja adaptacii kognitivnyh radiosistem peredachi informacii k slozhnoj pomehovoj obstanovke. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 2018, no. 66-1, pp. 9-15. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-9-15. (in Russian).

3. **Mutter V. M.** *Osnovy pomehoustojchivoj teleperedachi informacii*. L.: Jenergoatomizdat. Leningr. otd-nie. 1990, 288 pp. (in Russian).

4. *Sovremennaja telemetrija v teorii i na praktike*. Uchebnyj kurs / pod red. **G. I. Kozyreva**. Spb.: Nauka i tehnika. 2007, 672 pp. (in Russian).

5. *Next Generation Uplink, Green Book*, Issue 1, Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) Report Concerning Space Data System Standards 230.2-G-1, Jul. 2014.

6. CCSDS 231.1-O-1, «*Short block length LDPC codes for TC synchronization and channel coding*», The Consultative Committee for Space Data Systems, Orange book, Issue 1, April 2015.

7. **Klark Dzh., Kejn Dzh.** *Kodirovanie s ispravleniem oshibok v sistemah cifrovoj svjazi*: Per. s angl. Moscow.: Radio i svjaz'. 1987, 392 pp. (in Russian).

8. CCSDS 231.0-B-3, «*TC synchronization and channel coding*», The Consultative Committee for Space Data Systems, Blue book, Recommended Standard, issue 3, September 2017.

9. CCSDS 130.1-G-3, «*TM synchronization and channel coding – summary of concept and rationale*», The Consultative Committee for Space Data Systems, Green book, Informational Report, issue 3, June 2020.

10. CCSDS 131.2-B-1, «*Flexible Advanced Coding and Modulation Scheme for High Rate Telemetry Applications*», The Consultative Committee for Space Data Systems, Blue book, Recommended Standard, Issue 1, March 2012.