

УДК 621.391.14

МЕТОДЫ НЕРАВНОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИМВОЛОВ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ

АЛЬ-АЛЕМ АХМЕД САИД, А.А. БОРИСКЕВИЧ, А.И. КОРОЛЁВ

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

Поступила в редакцию 28 апреля 2008

Предложены методы неравной защиты информационных символов от ошибок на основе сверточных кодов с разной корректирующей способностью и равномерных сверточных кодов. Приведен сравнительный анализ разработанных методов неравной защиты с известными методами. Установлено, что метод кодирования информации на основе равномерного сверточного кода (РСК) обеспечивает максимальную защиту значимых информационных символов от ошибок и передачу незначимых информационных символов с вероятностью ошибок в n_0 раз меньшей канальной ошибки P_k без введения дополнительной избыточной информации и снижения корректирующей способности кода.

Ключевые слова: диффузный сверточный код, самоортогональный сверточный код, равномерный сверточный код, пакетные и случайные ошибки, вероятность ошибочного приема символов, корректирующая способность кода.

Введение

Известные способы неравной защиты информационных символов от ошибок выполняются [1–3] либо на основе построения сигнально-кодовых конструкций с использованием многофазных и многоуровневых методов модуляции и групповых кодов с разной корректирующей способностью на соответствующих уровнях разбиения сигнальных множеств, либо с разделением передаваемой информации на потоки значимых и незначимых информационных символов. Значимые информационные символы кодируются каскадным кодом на основе циклических кодов Хэмминга, BCH-кодов и сверточных кодов с возможностью перфорации кодовых символов. Недостатками данных способов неравной защиты информационных символов являются высокая избыточность передаваемой информации $r \geq 60\%$ и сравнительно низкая достоверность передачи информации: вероятность ошибочного приема двоичного символа $P_{\text{ош.сим}} = 10^{-5} - 10^{-6}$.

В связи с этим актуальной является задача разработки методов неравной защиты информационных символов, обеспечивающих эффективное использование пропускной способности канала связи при минимальной вероятности ошибок по символам.

Метод неравной защиты информационных символов на основе сверточных кодов с разной корректирующей способностью

На рис. 1 приведена обобщенная структурная схема системы передачи информации с использованием канального кодирующего и декодирующего устройства (кодека), обеспечивающего неравную защиту информационных символов от ошибок.

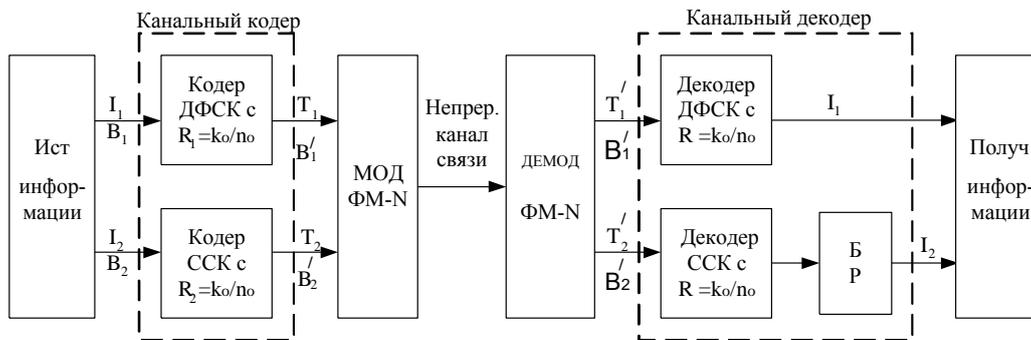


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы передачи информации с неравной защитой информационных символов от ошибок

Сущность метода неравной защиты информационных символов на основе сверточных кодов с разной корректирующей способностью состоит в следующем. Передающая часть системы передачи информации (канальный кодер) содержит два канала кодирования информационных символов. В первом канале кодирования используется диффузный сверточный код (ДФСК), обеспечивающий коррекцию одновременно пакетных и независимых (случайных) ошибок. Во втором канале кодирования используется самоортogonalный сверточный код (ССК), корректирующий только независимые ошибки. Скорости передачи кодов ДФСК $R_1=k_{01}/n_{01}$ и ССК $R_2=k_{02}/n_{02}$, где k_0 и n_0 — число информационных и кодовых символов соответственно, выбираются равными.

Символы передаваемой информации делятся на два подпотока: I_1 — подпоток значимых информационных символов и I_2 — подпоток незначимых информационных символов. Оба подпотока имеют равные скорости передачи двоичных символов: $B_1=B_2$ бит/с. Символы данных подпотоков поступают соответственно на входы первого и второго каналов кодирования. Так как скорости передачи используемых кодов равны ($R_1=R_2=k_0/n_0$), то кодовые символы подпотоков T_1 и T_2 передаются с одинаковой скоростью, а именно $B'_1=B_1/R_1=B'_2=B_2/R_2$.

На приемной стороне во второй канал декодирования канального декодера вводится дополнительно буферный регистр (БР), обеспечивающий согласование по задержке значимых и незначимых информационных символов.

Выбором параметров ДФСК и ССК обеспечивается:

- а) высокая достоверность передачи как значимых, так и незначимых информационных символов;
- б) минимальная избыточность передаваемой информации. Относительная избыточность передаваемой информации двухканального кодера определяется избыточностью сверточных кодов $r=(n_0-k_0/n_0) \cdot 100\%$;
- в) минимальная задержка информации при декодировании или высокая скорость декодирования кодовых символов, которая обеспечивается выбором порогового алгоритма декодирования.

На рис. 2 приведены кривые вероятностей $P_{\text{ош}}$ ошибочного приема значимых и незначимых информационных символов в зависимости от выбранных параметров ДФСК и ССК для метода модуляции ДОФМ с когерентным способом обработки ФМ-сигналов. Для расчета вероятностей ошибочного декодирования ДФСК и ССК была выбрана модель двоичного симметричного канала связи без памяти.

Расчет вероятностей ошибочного декодирования с использованием ССК и ДФСК выполняется соответственно с помощью выражений [4, 6]:

$$P_{\text{ош.дек}} = \sum_{i=t_{\text{исп}}+1}^{n_e} C_{n_e}^i P_k^i (1-P_k)^{n_e-i}, \quad (1)$$

$$P_{\text{ош.дек}} = \frac{1}{n_A} \sum_{i=t_{\text{исп}}}^{n_e} C_{n_e}^i (P_k)^i (1-P_k)^{n_e-i}, \quad (2)$$

где P_k — вероятность ошибочного приема двоичного символа на выходе демодулятора дискретного канала связи; $n_A=(m+1)n_0$ — длина кодового ограничения; $n_e=1/2J+1/2J+1$ — эффективная длина кодового ограничения; m — максимальная степень порождающих полиномов сверточных кодов; J — количество формируемых проверочных уравнений сверточных кодов; $t_{исп}$ — кратность исправляемых ошибок.

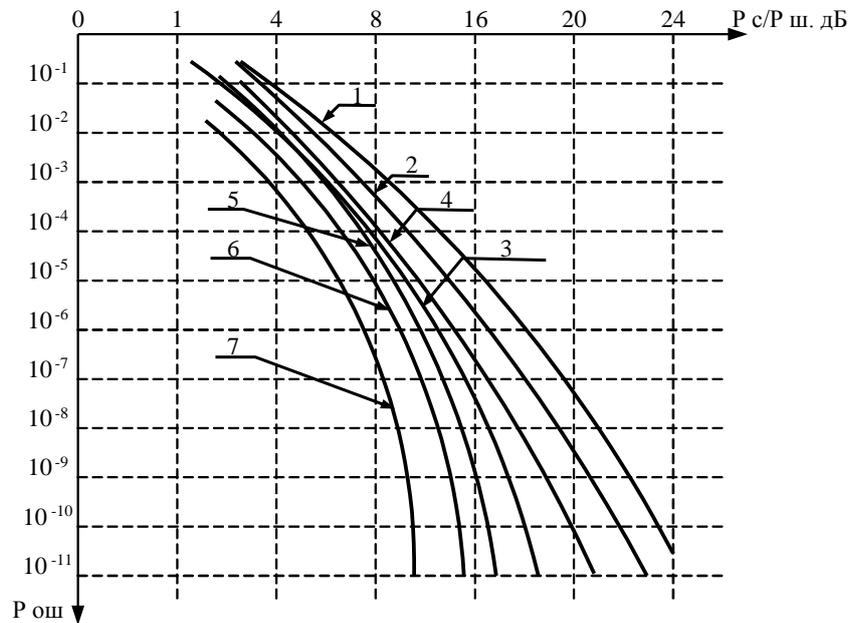


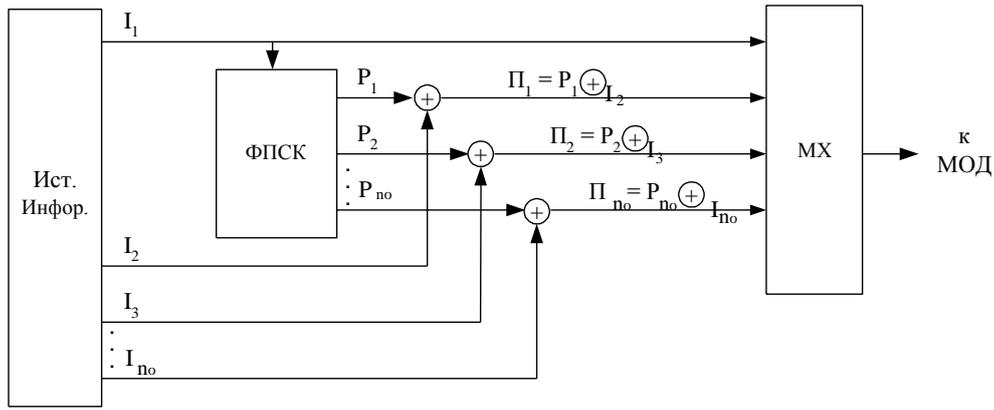
Рис. 2. Вероятности $P_{ош}$ ошибочного приема значимых и незначимых информационных символов при использовании ДФСК и ССК: 1 — вероятность посимвольной ошибки когерентного демодулятора ДОФМ в зависимости от отношения мощности сигнала P_c к мощности шумов $P_{ш}$ на выходе дискретного канала связи при увеличении скорости передачи информационных символов в 1,25 раза за счет введения избыточных (проверочных) символов; 2 — ССК с $R=7/8$, $t_H=2$ бита; 3 — ДФСК с $R=7/8$, $t_H=2$ бита, $t_n=7$ бит; 4 — ССК с $R=4/5$, $t_H=2$ бита; 5 — ДФСК с $R=4/5$, $t_H=2$ бита, $t_n=7$ бит; 6 — ССК с $R=3/4$, $t_H=2$ бита; 7 — ДФСК с $R=3/4$, $t_H=2$ бита, $t_n=6$ бит (t_H — кратность независимых ошибок; t_n — кратность (длина) пакета ошибок)

Из рис. 2 видно, что минимальная вероятность ошибочного приема как значимых, так и незначимых информационных символов обеспечивает использование ДФСК с $R=3/4$ и $r=25\%$.

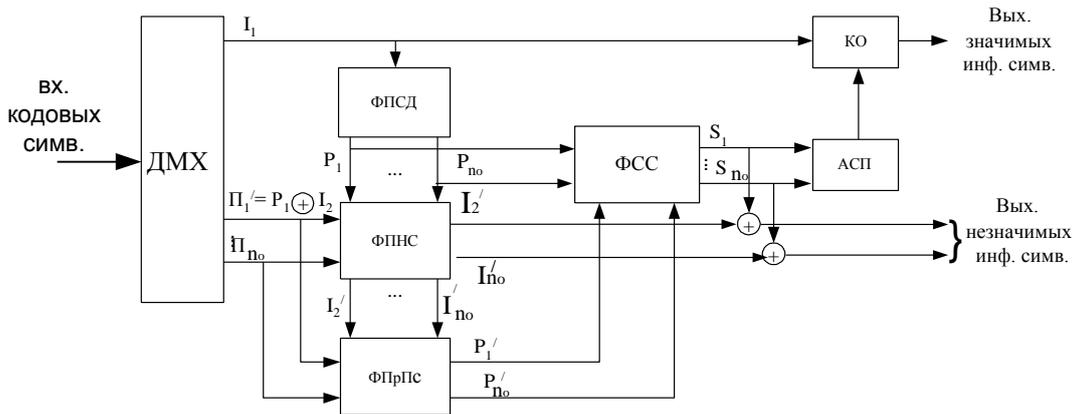
Метод неравной защиты информационных символов на основе равномерных сверточных кодов

Известно, что равномерные сверточные коды (РСК) обеспечивают высокую корректирующую способность. Однако данные коды имеют высокую избыточность ($r \geq 50\%$), передаваемой информации, что ограничивает их широкое применение в реальных системах связи [3–5].

Принцип построения РСК позволяет эффективно использовать их для организации неравной защиты информационных символов от ошибок. Разработанный метод неравной защиты информационных символов от ошибок на основе РСК относится к методам вложенного кодирования-декодирования сверточных кодов. Ниже приведены структурные схемы кодера (рис. 3,а) и декодера (рис. 3,б) канального кодера РСК, обеспечивающего неравную защиту информационных символов от ошибок и реализующего метод вложенного кодирования и декодирования сверточных кодов.



а)



б)

Рис. 3. Структурная схема канального кодера на основе метода неравной защиты информационных символов от ошибок: а — кодер; б — декодер. ФПСК — формирователь проверочных символов кодера; ФПСД — формирователь проверочных символов декодера; ФПрПС — формирователь принятых проверочных символов; ФПНС — формирователь подпотоков незначимых информационных символов; ФСС — формирователь синдромных символов; АСП — анализатор синдромных последовательностей; КО — корректор ошибок; МХ и ДМХ — мультиплексор и демultipлексор; МОД — модулятор

В соответствии с [4] скорость передачи линейного двоичного РСК равна $R=1/2^m=1/n_0$ при $m \geq 2$. Относительная избыточность РСК $r=(1-2^{-m}) \cdot 100\% (1-n_0^{-1}) \cdot 100\%$. Длина кодового ограничения равна $n_A=(m+1)n_0=(m+1)2^m$ двоичных символов, минимальное расстояние данных кодов определяется равенством $d_{0p}=(m+2)2^{m-1}$, а количество ортогональных проверок кода определяется выражением $J=d_{0p}-1$. Количество корректируемых ошибок кодом составляет не менее $t_{исп} \leq J/2=(d_{0p}-1)/2$ двоичных символов.

Следовательно, ошибочное декодирование возможно только лишь при наличии на входе декодера ошибок кратностью $t \geq [(2+m)2^{m-1}]/2$ двоичных символов, а сформированный декодером пакет ошибок, как правило, не превышает $n_0=2^m$ двоичных символов.

Сущность метода неравной защиты информационных символов на основе РСК состоит в следующем. Передаваемые информационные символы делятся на подпоток значимых информационных символов I_1 и на $(n_0-1)=2^m-1$ подпотоков незначимых информационных символов ($I_2 \div I_{n_0}$). Скорости передачи символов всех информационных подпотоков равны: $B_1=B_2=\dots=B_{n_0}$. Значимые информационные символы поступают одновременно на вход МХ кодера и на вход ФПСК, который формирует $(n_0-1)=2^m-1$ подпотоков проверочных символов ($P_1 \div P_{n_0}$). Символы проверочных подпотоков поступают на один из входов соответствующего

сумматора по модулю два, на вторые входы которых поступают незначимые символы соответствующих информационных подпотоков ($I_2 \div I_{n_0}$).

В результате суммирования по модулю двух проверочных и незначимых информационных символов формируются $(n_0-1)=2^m-1$ подпотоков псевдослучайных последовательностей (ПСП), а именно: $\Pi_1=P_1 \oplus I_2$, $\Pi_2=P_2 \oplus I_3$, ..., $\Pi_{m_0}=P_{n_0} \oplus I_{n_0}$. Символы сформированных ПСП $\Pi_1 \div \Pi_{m_0}$ поступают на соответствующие входы МХ, который формирует последовательный поток кодовых символов.

Исходя из метода формирования кодовых символов $\Pi_1 \div \Pi_{m_0}$ следует, что скорость передачи РСК разработанного метода вложенного кодирования информации практически равна 1. Это подтверждается следующим равенством:

$$R_{B_{n_0}} = \frac{k_0 + (n_0 - k_0)}{n_0} = \frac{n_0}{n_0} = 1. \quad (3)$$

В связи с этим относительная избыточность РСК, используемого в методе вложенного кодирования информации, равна нулю в соответствии с выражением

$$r = (1 - R_{B_{n_0}})100\% = \left[1 - \frac{k_0 + (n_0 - k_0)}{n_0} \right] 100\% = 0. \quad (4)$$

В канальном декодере поток кодовых символов $\Pi_1 \div \Pi_{m_0}$ разделяется на подпоток значимых информационных символов I_1 и (n_0-1) подпотоков ПСП: $\Pi_1 \div \Pi_{m_0}$. Значимые информационные символы поступают одновременно на входы КО и ФПСД. ФПСД формирует проверочные символы (n_0-1) подпотоков ($P_1 \div P_{n_0}$), которые поступают одновременно на соответствующие входы ФСС и ФПНС.

Символы (n_0-1) подпотоков ПСП поступают одновременно на соответствующие входы ФПрПС и ФПНС. Принятые проверочные символы подпотоков ($P'_1 \div P'_{n_0}$) поступают на соответствующие входы ФСС, который формирует синдромные символы подпотоков $S_1 \div S_{n_0}$, используемые АСП для коррекции ошибочных значимых информационных символов ($I'_2 \div I'_{n_0}$). Синдромные символы подпотоков $S_1 \div S_{n_0}$ одновременно используются для коррекции незначимых информационных символов (n_0-1) подпотоков, которые сформированы ФПНС по правилу $\Pi'_i = (P'_i \oplus I'_i) \oplus P'_i = I'_i$, где P'_i — принятые проверочные символы; I'_i , Π'_i — принятые символы псевдослучайной последовательности.

Расчет вероятностей ошибочного приема (декодирования) для значимых и незначимых информационных символов выполняется соответственно с помощью следующих выражений [6, 7]:

$$P_{\text{ош.дек}} = \frac{1}{2^m} \sum_{i=i_{\text{исп}}+1}^{n_A} C_{n_A}^i (P_k)^i (1 - P_k)^{n_A-i}; \quad (5)$$

$$P_{\text{ош.незнач.}} = P_k / n_0. \quad (6)$$

На рис. 4 приведены результаты расчетов ошибочного приема значимых и незначимых информационных символов метода вложенного кодирования информации на основе РСК с пороговым алгоритмом декодирования. В качестве модели дискретного канала связи выбрана модель двоичного симметричного канала (ДСК) связи с коэффициентом группирования ошибок

$$\alpha = 1 - (\lg P(\geq 1, n_A / P_k) / \lg n_A), \quad (7)$$

где $\lg P(\geq 1, n)$ — вероятность принятия кодовой последовательности n_A с одной и более ошибками; P_k — вероятность ошибок по двоичным символам (битам) на выходе демодулятора дискретного канала связи.

При $\alpha=0,1-0,25$ данная модель ДСК соответствует дискретному каналу связи спутниковых систем связи [4]. Вид модуляции — ДОФМ, а способ обработки ФМ-сигналов — когерентный.

На рис. 4 представлены вероятности ошибочного приема по символам на выходе демодулятора ДОФМ и значимых информационных символов при использовании РСК.

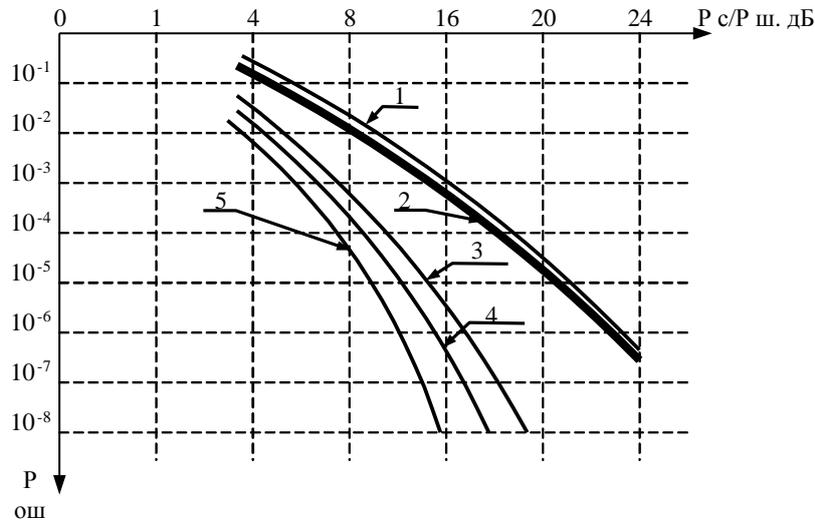


Рис. 4. Вероятности ошибочного приема значимых и незначимых информационных символов при использовании РСК: 1 — с учетом увеличения скорости передачи кодовых символов в (n_0-1) раз; 2 — область ошибочного приема незначимых символов (n_0-1) информационных подпотоков; 3 — РСК с $R=1/n_0=1/4$, $J=12$, $n_A=80$; 4 — РСК с $R=1/n_0=1/5$, $J=16$, $n_A=135$; 5 — РСК с $R=1/n_0=1/8$, $J=16$, $n_A=384$

Из рис. 4 видно, что минимальная вероятность ошибочного приема как значимых, так и незначимых информационных символов обеспечивает использование РСК с $R=1/8$ и минимальной избыточностью.

Заключение

Предложены методы неравной защиты информационных символов от ошибок на основе сверточных кодов с разной корректирующей способностью и равномерных сверточных кодов.

Установлено, что минимальная вероятность ошибочного приема $P_{ош}$ как значимых, так и незначимых информационных символов обеспечивает использование ДФСК с $R=3/4$ и избыточностью $r=25\%$.

Метод кодирования информации на основе РСК обеспечивает максимальную защиту значимых информационных символов от ошибок и передачу незначимых информационных символов с вероятностью ошибок в n_0 раз меньшей канальной ошибки P_k без введения дополнительной избыточной информации и снижения корректирующей способности кода. Определено, что минимальная вероятность ошибочного приема как значимых, так и незначимых информационных символов обеспечивает использование РСК с $R=1/8$ и минимальной избыточностью.

В реальных системах связи предпочтительнее использовать метод неравной защиты информационных символов от ошибок на основе ДФСК и ССК, так как в этом случае дополнительно реализуется операция разделения канальных пакетных ошибок на два канала.

Вероятностные характеристики канальных кодеков, реализующих предложенные методы неравной защиты информационных символов от ошибок, могут быть улучшены более чем на один порядок при использовании канальными декодерами квантованных (нежестких) решений демодулятора дискретного канала связи.

METHODS OF THE UNEQUAL PROTECTION OF INFORMATION SYMBOLS ON BASIS OF THE CONVOLUTIONAL CODES

AHMED SAID ALALEM, A.A. BORISKIVECH, A.E. KOROLEV

Abstract

Method of coding information on basis of uniform convolutional code [UCC] ensures the maximum protection of the significant information symbols from the errors and the transfer of insignificant information symbols with the probability of errors in n_0 times smaller channel error P_k without the additional redundant information and reduction in the corrective ability of the code is offered.

Литература

1. *Карташевский В.Г., Семенов С.Н., Фирстова Т.В.* Сети подвижной связи. М., 2001.
2. *Wahlen B.E., Mai C.Y.* // IEEE Comin. Letters. 2000. Vol. 4, № 2. P. 65–77.
3. *Морелос-Сарагоса Р.* Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М., 2005.
4. *Касами Т., Токура Н., Ивадари Е. и др.* Теория кодирования: Пер. с японск. М., 1978.
5. *Блейхут Р.* Теория и практика кодов, контролирующих ошибки: Пер с англ. М., 1986.
6. *Кларк Дж. мл., Кейн Дж.* Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. М., 1987.
7. *Королев А.И.* Модифицированные алгоритмы порогового декодирования сверточных кодов. Минск, 1997.