

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРИЕМА-ПЕРЕДАЧИ КОМАНД УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОПороГОВЫХ ДЕКОДЕРОВ САМООРТОГОНАЛЬНЫХ КОДОВ

Белицкий А.М.¹, Овечкин Г.В.², Шевляков Д.А.²

¹ФБУ «Войсковая часть 53982», Москва, Россия (119021, г. Москва, переулок Хользунова, 16)

²ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», Рязань, Россия (390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1), e-mail: g_ovechkin@mail.ru

Выполнена постановка задачи для повышения достоверности передачи команд управления по радиоканалам, для решения которой выбрано помехоустойчивое кодирование. Проведен анализ существующих методов коррекции ошибок, из которых были выбраны многопороговые декодеры (МПД) самоортогональных кодов (СОК) как наиболее подходящие для применения в описанной системе. Представлены базовые сведения про МПД и используемые совместно с ними коды. Выбраны параметры кодов и построен ряд СОК, позволяющих обеспечить требуемые характеристики в системе передачи команд управления. Показано, что применение лучших из построенных СОК и настроенного для их декодирования МПД позволяет увеличить вероятность ошибки в канале, при которой обеспечивается требуемая достоверность передачи команд управления, с 0.067 до 0.09, что существенно улучшает возможности системы. Даны рекомендации по дальнейшему улучшению полученных характеристик.

Ключевые слова: команды управления, системы передачи данных, помехоустойчивое кодирование, самоортогональные коды, многопороговые декодеры, достоверность передачи данных, компьютерное моделирование.

IMPROVEMENT OF MANAGEMENT INSTRUCTIONS TRANSMISSION RELIABILITY WITH AID OF MULTITHRESHOLD DECODERS FOR SELF-ORTHOGONAL CODES

Belitskij A.M.¹, Ovechkin G.V.², Shevlyakov D.A.²

¹Military unit 53982 Moscow, Russia (119021, Moscow, lane Holzunova, 16)

²The Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia (390005, Ryazan, street Gagarina, 59/1), e-mail: g_ovechkin@mail.ru

The problem definition for increase of reliability of transmission of control instructions on radio channels for which decision noiseproof coding is selected is executed. The analysis of existing error correction techniques, which were selected from multithreshold decoders (MTD) self-orthogonal codes (SOC) as the most suitable for use in the described system. Options are selected codes and built a number of SOC, allowing to provide desired characteristics in the transmission of control commands. It is shown that the application of the best built and configured SOC to decode MTD can increase the probability of error in the channel in which provides the required accuracy of control commands from 0.067 to 0.09, which significantly improves the capabilities of the system. Recommendations for further improvement of the characteristics obtained.

Keywords: management instructions, communication system, error-correcting coding, self-orthogonal codes, multithreshold decoders, data transmission reliability, computer simulation.

Введение

В настоящее время для управления различными объектами часто используются команды, передаваемые объекту управления по радиоканалу. При этом в большинстве случаев правильность передачи команд по каналу, в котором на передаваемый сигнал действуют разного рода помехи, оказывается критичным. Одним из наиболее эффективных подходов, позволяющих решить задачу обеспечения требуемой достоверности передачи радиоконанд, является применение помехоустойчивого кодирования.

Известно, что на сегодняшний день существует большое число кодов и методов их декодирования, различающихся корректирующей способностью, вносимой избыточностью,

сложностью реализации и многими другими важными параметрами [4]. И для конкретной системы связи требуется выбирать лучшие коды с учетом накладываемых ограничений. Например, в известной авторам системе передачи команд управления по КВ-каналам используются сообщения с информационной длиной 1600 битов, допустима кодовая скорость используемых кодов $2/5$ и выше, применяется модуляция типа BPSK, возможно использование только жестких решений демодулятора, декодер реализуется в программном виде. В данной системе требуется обеспечить вероятность безошибочного приема радиокomанды (вероятность ошибки на блок) не менее 0.95 при вероятности ошибки в канале порядка 8...9%. При этом применяемые в настоящее время помехоустойчивые коды позволяют получить данную вероятность правильного приема только при вероятности ошибки в канале 0.067.

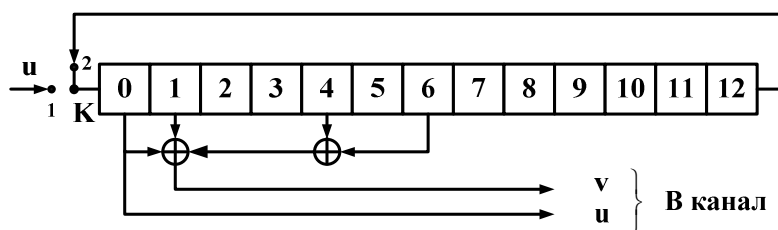
Цель исследования

Анализ известных помехоустойчивых кодов и методов их декодирования показал, что в наибольшей степени обеспечить подобные требования могут многопороговые декодеры (МПД) самоортогональных кодов (СОК) [1-3]. Данные методы обладают малой сложностью, что допускает их высокоскоростную практическую реализацию даже на цифровом сигнальном процессоре. Использование других методов коррекции ошибок, таких как турбо и низкоплотностные коды, представляется нецелесообразным, поскольку они значительно сложнее для реализации и для получения наилучшей эффективности требуют наличия оценок надежности решения демодулятора для каждого принятого бита.

Рассмотрим выбранные методы коррекции ошибок более подробно, после чего выберем параметры кода, который позволит обеспечить обозначенные требования, и выполним исследование его эффективности с помощью компьютерного моделирования.

Материал и методы исследования

Для иллюстрации основных принципов работы МПД, используемого для декодирования блоковых или сверточных самоортогональных кодов (СОК), рассмотрим схемы, реализующие операции кодирования и декодирования. Кодер для подобных кодов является простейшим устройством, состоящим только из регистров сдвига и сумматоров по модулю 2. Пример кодера для блокового СОК с кодовой скоростью $R=1/2$ и длиной 26 битов показан на рис. 1а. Достаточно простым для реализации является и сам МПД, пример схемы которого для такого же блокового кода показан на рис. 1б [1-3].



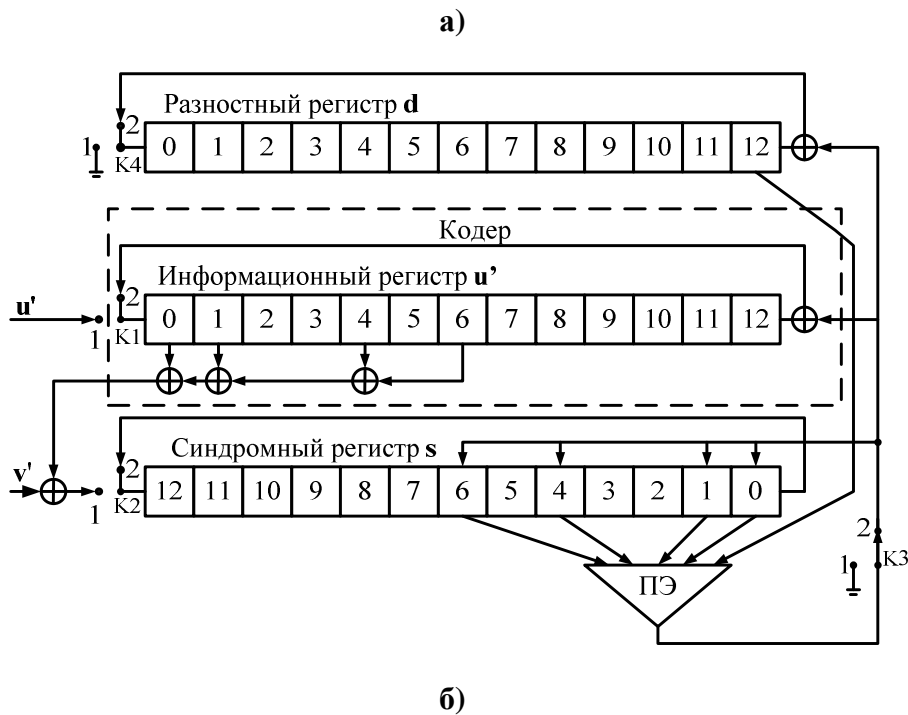


Рис. 1. Схема кодера и декодера МПД блочного кода

Опишем принципы работы кодера СОК на примере представленной на рис. 1 схемы. В процессе работы кодер формирует проверочные символы в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Перед началом кодирования кодового блока ключ **К** находится в состоянии 1.
2. Информационный вектор $\mathbf{u} = (u_0, u_1, \dots, u_{12})$ посимвольно подается на вход регистра сдвига. Пусть в результате информационный символ u_0 располагается в ячейке 12, u_1 – в ячейке 11 и т.д.
3. Ключ **К** переводится в состояние 2.
4. Для j от 0 до 12 выполняется циклический сдвиг регистра, поле чего вычисляется j -й проверочный символ v_j :

$$v_j = \sum_{k=1}^4 u_{(j-g_k) \bmod 13} \cdot$$

В результате выполнения алгоритма формируется проверочный вектор $\mathbf{v} = (v_0, v_1, \dots, v_{12})$, который вместе с информационным вектором образует кодовое слово $\mathbf{c}=(\mathbf{u},\mathbf{v})$, передаваемое по каналу.

Далее опишем основные принципы работы многопорогового декодера [2].

Пусть после передачи по двоичному симметричному каналу (ДСК) декодер получает вместо кодового слова \mathbf{c} искаженное шумами сообщение $\mathbf{y}=(\mathbf{u}',\mathbf{v}')$ длины n . Сначала, как и в обычном пороговом декодере, вычисляется синдром $\mathbf{s}=\mathbf{H}\mathbf{y}$ (здесь \mathbf{H} – проверочная матрица кода) принятого сообщения, и для каждого информационного символа u_j , $1 \leq j \leq k$, выделяется

множество $\{s_p\}$ элементов синдрома Θ_j , называемых проверками относительно символа u_j и содержащих в качестве слагаемого ошибку e_j в этом символе.

Двоичный вектор \mathbf{d} длиной k , называемый разностным, первоначально заполняется нулями. В данном векторе будут отмечаться измененные информационные символы для того, чтобы декодер «помнил» принятое из канала сообщение и всегда мог вычислить разность между этим сообщением и кодовым словом, находящимся в информационном регистре.

Основной шаг декодирования заключается в том, что для произвольно взятого символа u_j вычисляется функция правдоподобия L_j , зависящая от относящихся к нему проверок и j -го элемента вектора \mathbf{d} :

$$L_j = \sum_{p \in \Theta_j} s_p + d_j, \quad (1)$$

где d_j – символ разностного вектора, относящийся к декодируемому символу u_j (равный 0 или 1); s_p – p -й элемент вектора синдрома, входящий во множество проверок относительно декодируемого символа u_j ; Θ_j – множество номеров проверок, контролирующих j -й информационный символ.

Общее число слагаемых в (1) равно кодовому расстоянию d . Если $L_j > T$, где $T = (d-1)/2$ – пороговое значение, то символ u_j , все участвующие при получении L_j проверки и символ d_j инвертируются, после чего выбирается другой символ u_m , $m \neq j$, для него снова вычисляется сумма L_m и т.д. Если же $L_j \leq T$, то сразу осуществляется переход к декодированию следующего символа u_m .

В [2] показано, что основным свойством МПД является строгое приближение его решения к решению оптимального (по максимуму правдоподобия) декодера при каждом изменении декодируемого символа. Это определяется тем, что при изменении символа суммарный вес синдрома \mathbf{s} и разностного вектора \mathbf{d} обязательно уменьшается и, таким образом, происходит переход к кодовому слову, которое более правдоподобно, чем кодовое слово, находившееся в МПД в предыдущий момент времени.

Выбор параметров многопорогового декодера для обеспечения требования системы передачи команд управления по радиоканалу

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к системе передачи радиокоманд управления, необходимо обеспечить вероятность правильного декодирования 0.95 и более (вероятность ошибочного блока 0,05 и менее) при 8...9% ошибок в канале связи. При этом предполагается, что ошибки в канале появляются независимо друг от друга и с равной вероятностью, т.е. можно использовать модель двоичного симметричного канала (ДСК). Оценим параметры кода (в данном случае нас интересует только минимальное кодовое расстояние), который сможет обеспечить такие характеристики.

В худшем случае, если предположить, что ошибки в декодированных блоках появляются независимо друг от друга, вероятность ошибки в блоке длиной 1600 битов определяется выражением

$$P_{BL} = 1 - (1 - P_b)^{1600}, \quad (2)$$

где P_b – вероятность битовой ошибки декодирования. Из данной формулы следует, что для обеспечения вероятности ошибки декодирования на блок не более 0.05 требуется обеспечить вероятность ошибки декодирования на бит не менее $3.2 \cdot 10^{-5}$.

Для МПД известно, что с его помощью можно обеспечить вероятность ошибки декодирования, близкую к вероятности ошибки декодирования, обеспечиваемую оптимальным декодером и оцениваемую как

$$P_b = \sum_{i=(d+1)/2}^d C_d^i p_0^i (1 - p_0)^{d-i}, \quad (3)$$

где d – кодовое расстояние СОК (нечетное); p_0 – вероятность ошибки в канале.

Из (3) следует, что требуемые характеристики при $p_0=0.08\dots 0.09$ способны обеспечить коды с кодовым расстоянием d , равным 13 или 15. Нами был построен и исследован ряд СОК с такими значениями d и кодовой скоростью 4/10, содержащих 4 информационных и 6 проверочных ветвей, среди которых были выбраны два лучших кода с кодовым расстоянием 13 и 15. Далее представим результаты их исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 показана зависимость вероятности ошибки МПД с 30 итерациями декодирования на блок от вероятности ошибки в канале типа ДСК для построенных кодов. Отметим, что код с кодовым расстоянием 15 позволяет обеспечить требуемую вероятность ошибки декодирования на блок, равную 0.05 при вероятности ошибки в канале 0.09, а код с кодовым расстоянием 13 – при вероятности ошибки в канале 0.085. Также видно, что код с кодовым расстоянием 15 оказывается лучше, чем код с кодовым расстоянием 13, при вероятности ошибки в канале 0.095 и меньшей. Это объясняется тем, что ошибки в блоке после его декодирования не являются независимыми. Т.е. если кодовый блок содержит ошибки, то их обычно несколько. Заметим, что в области эффективной работы МПД (при вероятности ошибки декодирования на блок 0.1 и менее) ошибки в принятом блоке в основном оказываются одиночными. Поэтому при необходимости уменьшения вероятности ошибки декодирования на блок можно использовать каскадирование СОК с кодами с контролем четности, позволяющее на 1...2 порядка уменьшить вероятность ошибки [3].

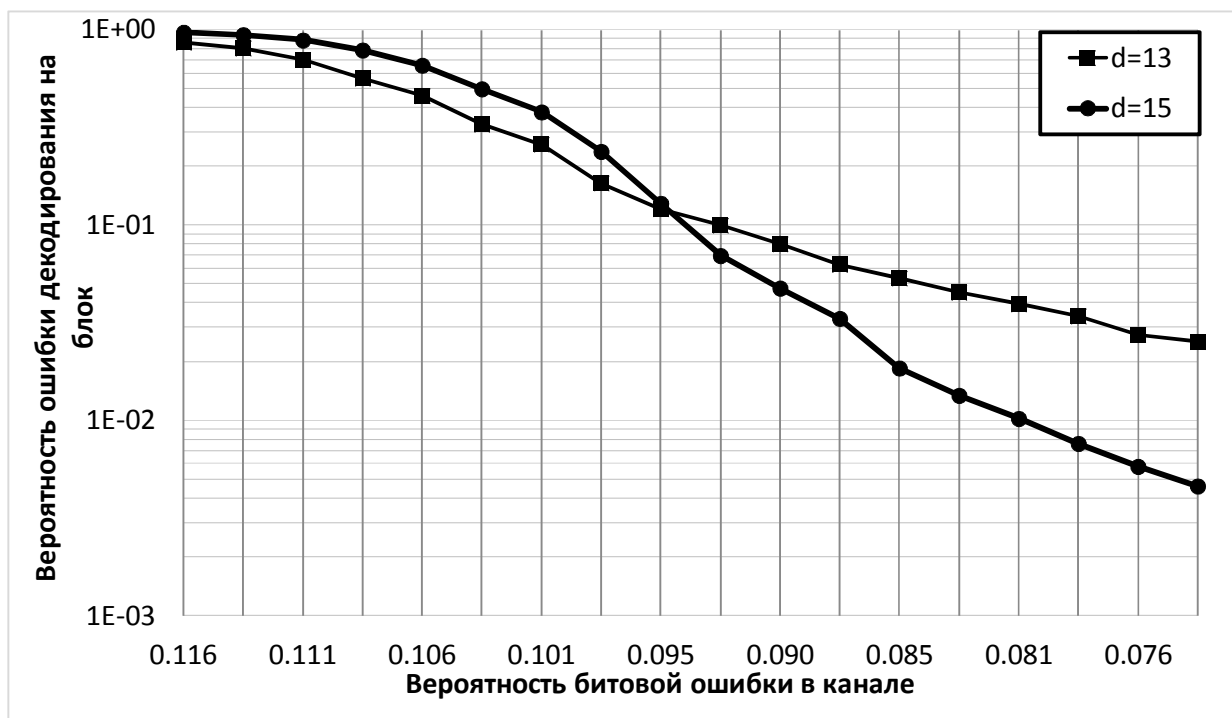


Рис. 2. Вероятность ошибки декодирования на блок в ДСК

На рис. 3 кривыми 1 и 2 для удобства показана зависимость вероятности правильного декодирования блока от вероятности ошибки в канале типа ДСК для построенных кодов. Выводы совпадают с выводами из предшествующего рисунка.

Заметим, что выбранные коды при благоприятных условиях приема (малый шум в канале) могут быть легко изменены на коды с более высокими кодовыми скоростями 4/9, 4/8, 4/7, 4/6, 4/5. Так можно осуществлять управление долей полезной информации в передаваемом потоке данных. Декодер при этом не меняется.

Возможности МПД для кодов с высокими кодовыми скоростями (т.е. с малой избыточностью) иллюстрируются на рис. 3 кривыми 3 и 4, которые показывают характеристики МПД для кодов с кодовой скоростью 4/7 и 4/6. Требуемая вероятность правильного приема блока 0.95 обеспечивается при вероятности ошибки в канале 0.037 и 0.022 соответственно, что является хорошим результатом. Заметим, что это только первоначальные результаты для самых простых из построенных кодов, которые в дальнейшем могут быть еще существенно улучшены.

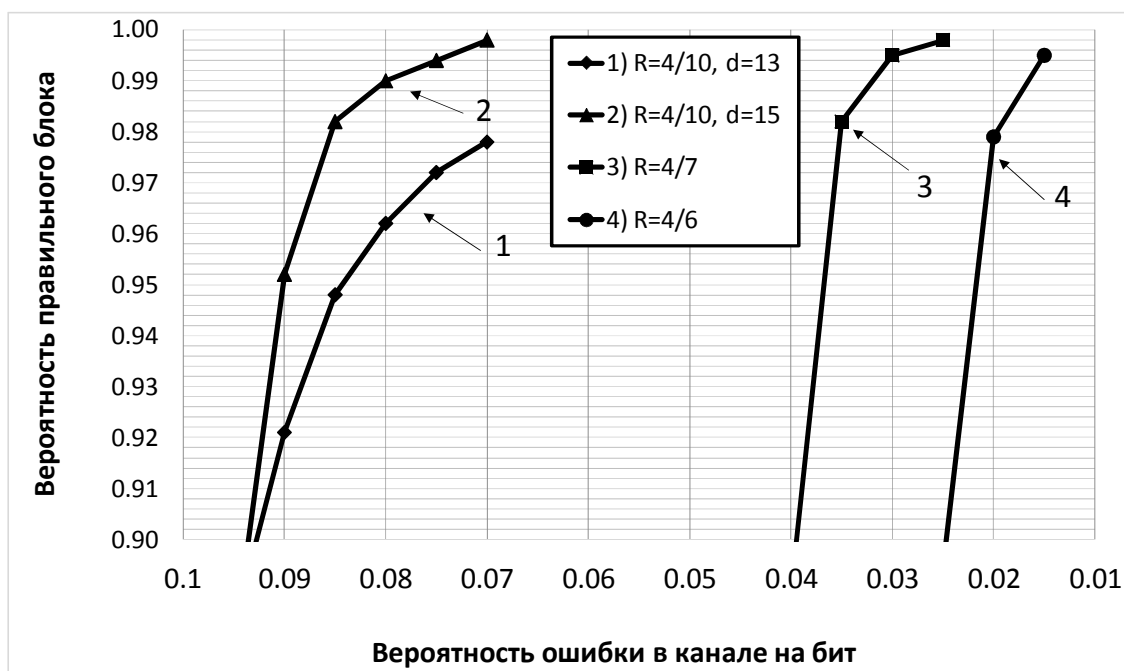


Рис. 3. Вероятность правильного приема блока в ДСК

Выводы

В результате проведенной работы показано, что за счет использования многопорогового декодера самоортогональных кодов при передаче команд управления по радиоканалам можно обеспечить увеличение вероятности ошибки, при которой достигается вероятность правильно принятого блока 0.95, с величины 0.067, получаемой классическими методами коррекции ошибок, до 0.09. За счет этого можно улучшить многие параметры системы управления, такие как дальность связи, скорость и надежность передачи и другие. Отметим, что хотя представленные расчеты и исследования выполнены для конкретных требований системы передачи команд управления, они легко адаптируются и под другие требования [5].

Список литературы

1. Золотарев В.В. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования / под ред. чл.-корр. РАН Ю.Б. Зубарева. - М. : Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2006. - 276 с.
2. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Повышение надежности передачи и хранения данных с использованием многопороговых методов декодирования помехоустойчивых кодов // Цифровая обработка сигналов. – 2012. - № 1. - С. 16–21.
3. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Использование многопорогового декодера в каскадных схемах // Вестник РГРТА. - 2003. - Вып. 11. - С. 112-115.
4. Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных // Электросвязь. - 2008. - № 12. - С. 2–11.

5. Новый алгоритм многопорогового декодирования. - М., 2004-2012 [Электронный ресурс].
- URL: <http://www.mtdbest.ru> (дата обращения: 17.12.2013).

Рецензенты:

Кузнецов А.Е., д.т.н., профессор, зам. дир. НИИ «Фотон», ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань.

Костров Б.В., д.т.н., профессор кафедры ЭВМ, ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань.