

УДК 004.9

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, В КОТОРЫХ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК ИСПОЛЬЗУЕТСЯ СВЕРТОЧНОЕ КОДИРОВАНИЕ

Фрейман В.И.

*ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: vfrey@mail.ru*

Настоящая статья посвящена исследованию базовых принципов построения и коррекции ошибок в системах управления, реализующих избыточное сверточное кодирование, с применением аналитических и программных моделей. Показана важность и значимость использования эффективных помехоустойчивых кодов для обеспечения достоверной передачи данных между элементами и устройствами современных систем управления. Проанализированы аналитические способы построения сверточных кодов, а также процедуры их кодирования и декодирования. Разработана программа моделирования процедур кодирования и декодирования в среде программирования Borland Delphi, а также модель системы управления, использующей сверточное кодирование, в среде моделирования MathWorks Matlab. В результате разработана основа для программной реализации процедур кодирования и декодирования помехоустойчивых сверточных кодов в выбранном аппаратно-программном базисе современных систем управления.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, сверточный код, коррекция ошибок, диаграмма, алгоритм Витерби, модель, MatLab

PROGRAM REALIZATION AND RESEARCH OF CONTROL SYSTEMS MODELS, WITH USING A CONVOLUTION ENCODING FOR ERRORS CORRECTION

Freyman V.I.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Perm National
Research Polytechnic University, Perm, e-mail: vfrey@mail.ru*

This article is described to research of construction and errors correction basic principles in control systems, realizing excess convolution encoding, with using analytic and program models. Importance and significance of effective noise stability codes using for providing reliable data transfer between elements and devised of control systems. An analytic methods of convolution codes construction, encoding and decoding procedures are analyzed. A modeling program of encoding and decoding procedures realization with programming tools Borland Delphi, and also control system model with convolution encoding in the system MathWorks MatLab, are offered. As a result the basic of convolution code encoding and decoding procedures realization in the modern control systems selected hardware and software, is developed.

Keywords: noise stability coding, convolution code, errors correction, diagram, Viterby algorithm, model, MatLab

Для современных систем управления одной из наиболее приоритетных задач является обеспечение высоких показателей скорости, надежности и качества передачи управляющей информации [2]. Для этого система должна обладать требуемой *помехоустойчивостью*, которая характеризует способность системы сохранять заданные количественные и качественные показатели несмотря на наличие помех в канале связи [3]. На сегодняшний день одним из основных способов обеспечения высокой помехоустойчивости является применение *избыточных (корректирующих)* кодов, которые за счет введения дополнительных символов и процедур обработки сообщений позволяют обнаруживать и исправлять ошибки [5].

В связи с прогрессом в теории и технике кодирования в современных системах передачи информации, в том числе спутниковых системах связи, используются *сверточ-*

ные некодовые коды [5]. Использование сверточных кодов обусловлено высокой эффективностью – соотношением корректирующей способности и избыточности, превышающей соответствующие показатели аналогичных по размерности блоковых избыточных двоичных кодов (например групповых или циклических) [6–9]. Поэтому исследование сверточных кодов представляется важным и своевременным.

Краткая теория: принципы построения, кодирования и декодирования сверточных кодов

Сверточный код описывается тремя целыми числами [5]: n, k, K , где отношение k/n называется *степенью кодирования кода* (code rate) и показывает количество информации, приходящейся на закодированный бит. Целое число K является параметром, называемым *длиной кодового ограничения*;

оно указывает на число разрядов кодирующего регистра сдвига. Целое число k указывает на число бит данных, которые образуют вход блочного кодера. Число n – это суммарное количество разрядов в соответствующем кодовом слове на выходе кодера.

Исходное сообщение на входе обозначается последовательностью $m = m_1, m_2, \dots, m_p, \dots$, где m_i – двоичный бит, а i – индекс времени (расположение элемента внутри последовательности). Будем предполагать, что все m_i равновероятны единице или нулю и независимы между собой. Будучи независимой, последовательность битов нуждается в некоторой избыточности, т.е. значение бита m_i не дает информации о бите m_j . Кодер преобразует последовательность m в уникальную последовательность кодовых слов $U = G(m)$. Последовательность m однозначно определяет последовательность U . Несмотря на это, ключевой особенностью сверточных кодов является то, что данный k -кортеж внутри m не однозначно определяет связанные с ним n -кортежи внутри U . Это объясняется тем, что кодирование каждого k -кортежа является функцией не только k -кортежей, но и предыдущих $(K-1)$ k -кортежей.

Последовательность U можно разделить на последовательность кодовых слов: $U = U_1, U_2, \dots, U_p, \dots$. Каждое кодовое слово U_i состоит из двоичных кодовых символов, называемых *канальными битами* или *битами кода*; в отличие от битов входного сообщения, кодовые символы не являются независимыми.

Обычный сверточный кодер [5], показанный на рис. 1, реализуется с K -разрядным *регистром сдвига* и n *сумматорами* по модулю 2, где K – длина кодового ограничения. Длина кодового ограничения – это количество k -битовых сдвигов, после которых один информационный бит может повлиять на выходной сигнал кодера.

В каждый момент времени на место первых k разрядов регистра перемещаются k новых бит; все биты в регистре смещаются на k разрядов вправо, и выходные данные n сумматоров последовательно дискретизируются, давая в результате биты кода. Поскольку для каждой входной группы из k бит сообщения имеется n бит кода, степень кодирования равна k/n бит сообщения на бит кода, где $k < n$.

Для реализации сверточного кодирования можно воспользоваться методом решетчатой диаграммы. Решетчатая диаграмма отражает все возможные состояния регистра сдвига и выходные состояния кодера в течение всего числа тактов, требуемых для передачи входной последовательности. Решетчатая диаграмма для сверточного кодера показана на рис. 2.

Принцип построения диаграммы основан на том, что в каждый t_i момент времени в регистр сдвига входит бит – 0 или 1, изменяя состояние регистра. По состоянию регистра уже вычисляется кодовое слово, и на основе этих данных строится решетчатая диаграмма.

Декодирование сверточных кодов выполняется методом построения решетчатой диаграммы на основе данных решетчатой диаграммы кодера. Для решетки декодера каждую ветвь за каждый временной интервал удобно пометить *расстоянием Хэмминга* между полученным кодовым словом и кодовым словом, соответствующим той же ветви из решетки кодера. Пометки на решетке декодера накапливаются декодером в процессе. Другими словами, когда получен кодовый символ, каждая ветвь решетки декодера помечается метрикой подобия, между полученным кодовым символом и каждым словом ветви за этот временной интервал. В каждый момент времени t_i в решетке существует 2^{K-1} состояний, где K – длина кодового ограничения, и в каждое состояние может войти несколько путей. Решетчатая диаграмма сверточного декодера изображена на рис. 3.

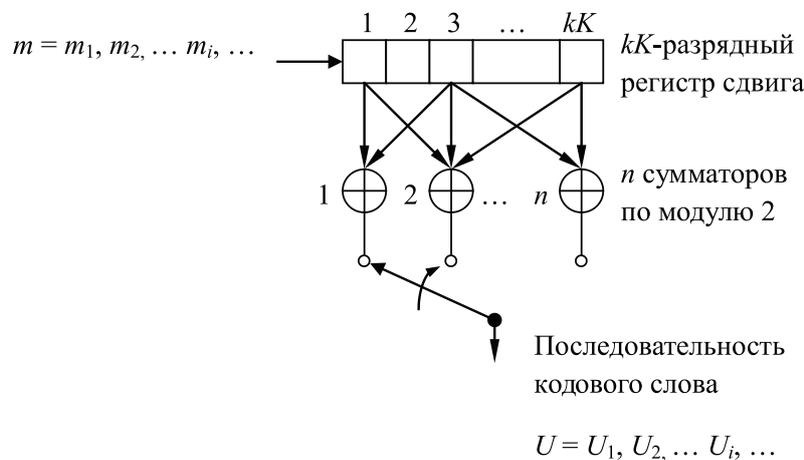


Рис. 1. Сверточный кодер

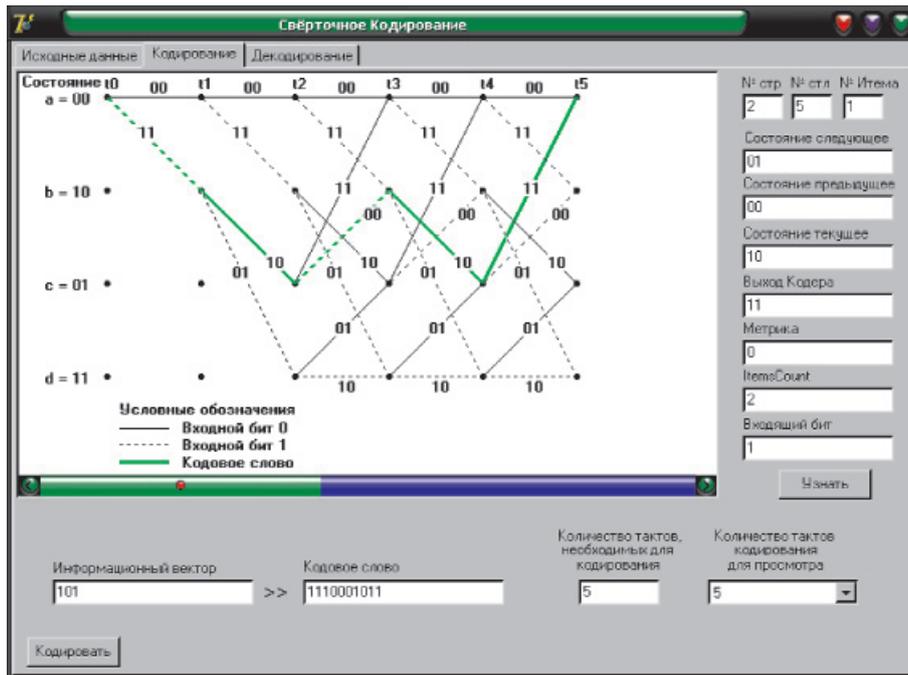


Рис. 2. Решетчатая диаграмма кодера ($K = 3, k = 1, g_1(x) = 1 \oplus x^2, g_2(x) = 1 \oplus x$)

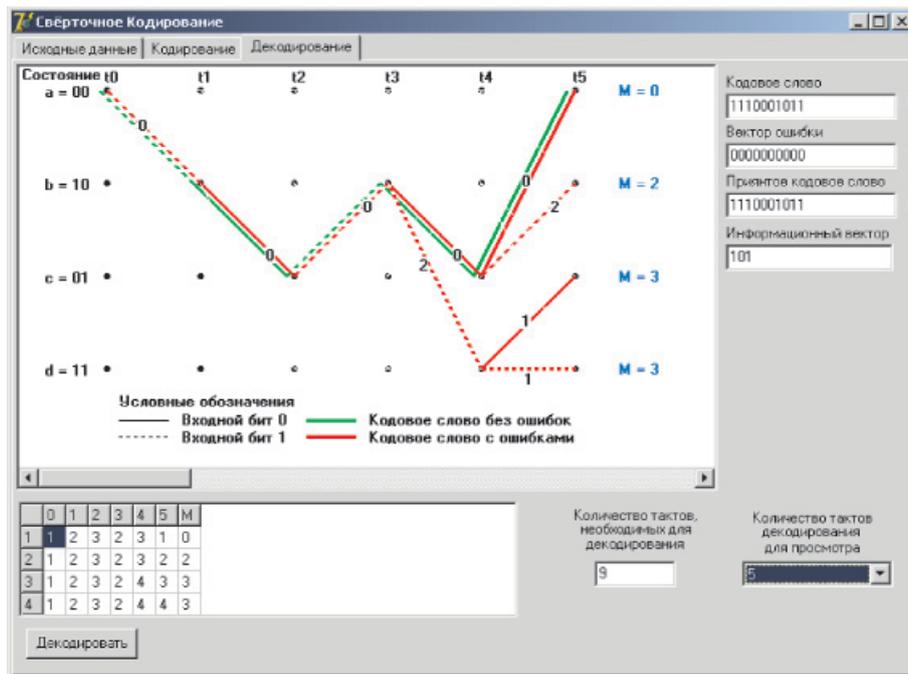


Рис. 3. Решетчатая диаграмма работы сверточного декодера

Наибольшую популярность получил алгоритм декодирования Витерби. Принцип декодирования основан на сравнении метрик путей, входящих в каждое состояние, и исключении всех, кроме пути с минимальной метрикой. Таким образом, в каждый момент времени на решетчатой диаграмме получается не больше 2^{K-1} возможных пу-

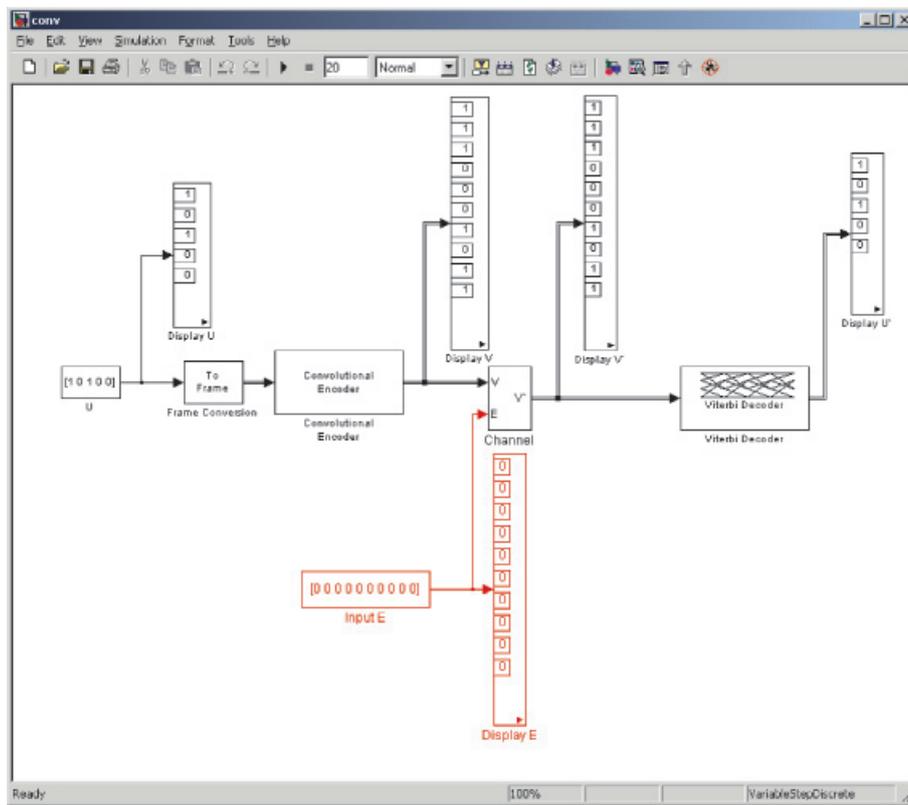
тей для правильного декодирования последовательности. После исключения для каждого момента времени t_i анализируются все предыдущие моменты времени декодирования для $0 \leq j < i$. Если на интервале $t_{j-1} \dots t_j$ остается только один путь, то соответствующий ему символ и считается правильно декодированным. В зависимости от

кратности и распределения ошибок декодирования может осуществляться количество тактов, в несколько раз превышающее количество принятых символов, т.е. с временной задержкой. Корректирующая способность кода (исправление ошибок) связана с длиной кодового ограничения (по аналогии с шириной сигнальной зоны – для блоковых кодов).

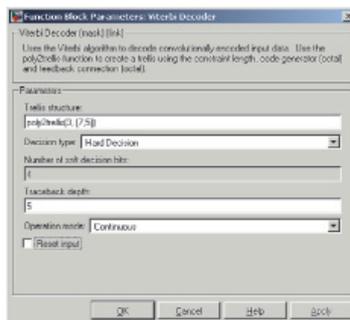
Разработка и исследование модели системы управления, в которой используется сверточное кодирование данных

Изучение вопросов построения и реализации сверточных кодов предлагается осуществить в рамках лабораторного практикума. Для этого разработан и под-

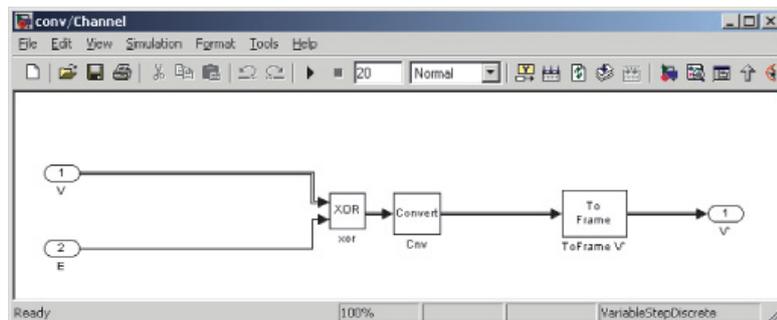
готовлен виртуальный лабораторный стенд, реализованный в двух вариантах. Программная модель (рис. 2, 3), разработанная в среде объектно-ориентированного программирования Borland Delphi 7.0, позволяет изучить и промоделировать работу процедур кодирования и декодирования, корректирующие свойства кода с заданными параметрами. Программная модель системы управления (рис. 4, а), реализованная в среде MathWork MatLab [10], пакете Simulink, позволяет исследовать корректирующие свойства кода, задавая в модели канала связи ошибки разной конфигурации (рис. 4, б) и параметры кодирующих и декодирующих устройств (рис. 4, в).



а



б



в

Рис. 4. Модель системы управления в пакете Simulink

Исследование традиционно состоит из двух частей: расчетной и исследовательской. В *расчетной* части необходимо выполнить расчет параметров сверточного кода по заданным исходным данным, промоделировать работу кодирующего устройства, построить решетчатую диаграмму и по ней промоделировать работу кодера и декодера в режиме исправления ошибок различного местоположения и кратности. В качестве исходных данных указываются: длина информационной части n , длина кодового ограничения K , количество бит k , которые образуют вход блочного кодера, полиномиальные генераторы $g(x)$, варианты полинома ошибок $e(x)$.

В *исследовательской* части необходимо исследовать все возможности сверточных кодов с помощью модели системы управления, используя результаты расчетной части. Для этого им необходимо будет ввести характеристики кода (количество связей кодера, количество входных бит данных, количество разрядов кодирующего регистра сдвига). Согласно этим характеристикам кода студенты с помощью программы моделируют работу кодирующего и декодирующего устройств, проверяют достоверность переданных последовательностей и принимают решения об эффективности сверточного кодирования.

Заключение

Целью статьи является рассмотрение вопросов разработки комплекса исследовательских работ, направленных на изучение современных методов помехоустойчивого кодирования информации, что важно для профессиональной подготовки специалистов в области систем управления [1, 4]. Был произведен аналитический обзор кодирования и декодирования избыточных сверточных кодов, рассмотрены процедуры кодирования и декодирования. Также показаны основные подходы к организации лабораторной работы с использованием виртуального лабораторного стенда, построенного в среде объектно-ориентированного программирования Borland Delphi 7.0 и MathWorks Matlab.

Список литературы

1. Волкова В.Н., Козлов В.Н., Горелова Г.В., Лыпарь Ю.И., Паклин Н.Б., Фирсов А.Н., Черненькая Л.В. Моделирование систем и процессов: учебник. Серия 58. Бакалавр. Академический курс (1-е изд.). – М.: Изд-во Юрайт, 2016. – 450 с.
2. Гаврилов А.В., Кон Е.Л., Фрейман В.И. К вопросу об управлении распределенными гетерогенными мультивендорными инфокоммуникационными системами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2011. – № 5. – С. 264–270.
3. Кон Е.Л., Фрейман В.И. Теория электрической связи. Помехоустойчивая передача данных в информационно-управляющих и телекоммуникационных системах: модели, алгоритмы, структуры: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 317 с.: ил.

4. Никифоров В.И., Речинский А.В., Черненькая Л.В. Понятийно-терминологический аппарат государственных образовательных стандартов системы непрерывного профессионального образования // Alma mater (Вестник высшей школы). – 2013. – № 11. – С. 43–47.

5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – 2-е изд., испр.: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.: ил.

6. Фрейман В.И., Пирожков А.П. Изучение эффективного (экономного) кодирования данных в телекоммуникационных системах в рамках лабораторного практикума // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2012. – № 1. – С. 308–317.

7. Фрейман В.И., Пирожков А.П. Исследование моделей дискретных каналов с памятью в рамках лабораторного практикума, построенного на базе пакета Matlab // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – Т. 1. – № 7. – С. 26–36.

8. Фрейман В.И., Пирожков А.П. Исследование эффективного кодирования в системах передачи и хранения информации // Научные исследования и инновации. – 2012. – Т. 6. № 1-4. – С. 214–222.

9. Фрейман В.И., Савиных В.А. Изучение систем передачи с многократным повторением и обратной связью при помощи моделирования в среде Matlab // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2011. – № 5. – С. 271–275.

10. MATLAB Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/matlab/> (дата обращения: 04.07.2016).

References

1. Volkova V.N., Kozlov V.N., Gorelova G.V., Lypar Ju.I., Paklin N.B., Firsov A.N., Chernenkaja L.V. *Modelirovanie sistem i processov: uchebnik. Serija 58. Bakalavr. Akademicheskij kurs (1-e izd.)* [The modeling of systems and processes: textbook. 58 series. Bachelor. Academic course (1-st rel.)]. Moscow, Youright Publ., 2016, 450 p.
2. Gavrilov A.V., Kon E.L., Frejman V.I. *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Jeletrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravlenija*, 2011, no. 5, pp. 264–270.
3. Kon E.L., Frejman V.I. *Teorija jelektricheskoj svjazi. Pomehoustojchivaja peredacha dannyh v informacionno-upravljajushih i telekommunikacionnyh sistemah: modeli, algoritmy, struktury* [The theory of telecommunications. Noise stability data transfer on the information and control systems: models, algorithms, structures]. Perm, Perm state techn. un-ty Publ., 2007, 317 p.
4. Nikiforov V.I., Rechinskij A.V., Chernenkaja L.V. *Alma mater (Vestnik vysshej shkoly)*, 2013, no. 11, pp. 43–47.
5. Skljар B. *Cifrovaja svjaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* [Digital communications. Fundamentals and Applications]. Moscow, Williams Publ., 2003, 1104 p.
6. Frejman V.I., Pirozhkov A.P. *Jenergetika. Innovacionnye napravlenija v jenergetike. CALS-tehnologii v jenergetike*, 2012, no. 1, pp. 308–317.
7. Frejman V.I., Pirozhkov A.P. *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Jeletrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravlenija*, 2013, v. 1, no. 7, pp. 26–36.
8. Frejman V.I., Pirozhkov A.P. *Nauchnye issledovanija i innovacii*, 2012, v. 6, no. 1-4, pp. 214–222.
9. Frejman V.I., Savinyh V.A. *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Jeletrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravlenija*. 2011, no. 5, pp. 271–275.
10. MATLAB Documentation (2016), Available at: <http://www.mathworks.com/help/matlab/> (accessed 4 July 2016).