

ИСПРАВЛЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ОШИБОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МНОГОМЕРНЫХ СХЕМ КОДИРОВАНИЯ

Д.М. Романенко¹⁾, М.Ф. Кудлацкая²⁾, Р.И. Белькевич³⁾

- 1) к.т.н., заведующий кафедрой информатики и веб-дизайна Белорусского государственного технологического университета, г. Минск, Республика Беларусь, rdm@belstu.by
- 2) к.т.н., старший преподаватель кафедры информатики и веб-дизайна Белорусского государственного технологического университета, г. Минск, Республика Беларусь, m.kudlatskaya@gmail.com
- 3) аспирант кафедры информатики и веб-дизайна Белорусского государственного технологического университета, г. Минск, Республика Беларусь, belkevich1337@gmail.com

Аннотация: в данной статье рассматривался принцип построения кодов на основе последовательно-параллельных многомерных схем для исправления многократных, в том числе и пакетных ошибок.

Ключевые слова: избыточный код, многомерный итеративный код, многопороговый декодер, многомерная схема кодирования, ошибка, пакет, паритеты, декодер.

CORRECTION OF COMBINED ERRORS USING SERIES-PARALLEL MULTIDIMENSIONAL ENCODING SCHEMES

D.M. Romanenko¹⁾, M.F. Kudlatskaya²⁾, R.I. Belkevich³⁾

- 1) PhD, Head of the Informatics and Web-Design Department, Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus, rdm@belstu.by
- 2) PhD, Senior Lecturer of the Informatics and Web-Design Department, Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus, m.kudlatskaya@gmail.com
- 3) postgraduate Student of the Informatics and Web-Design Department, Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus, г. Минск, Республика Беларусь, belkevich1337@gmail.com

Abstract: The article describes the principle of constructing codes based on series-parallel multidimensional schemes for correction multiple and packet errors.

Keywords: redundant code, multidimensional iterative code, multithreshold decoder, multidimensional coding scheme, error, packet, parities, decoder.

В современном цифровом мире широкое распространение получили и продолжают быстро развиваться области, связанные с обработкой и передачей данных в беспроводных (спутниковых) сетях, системах хранения данных. В последние годы самым эффективным направлением в теории кодирования и распространенным в протоколах и стандартах связи, в частности, в системах беспроводной цифровой передачи информации, является использование комбинированных кодов: последовательные каскадные коды, параллельные турбо коды, многомерные коды. Для этого необходимы компонентные коды с широким спектром скоростей, корректирующих возможностей и эффективные алгоритмы декодирования: для нейтрализации ошибок типа «стирание» в каналах связи эффективно применяются «фонтанные» коды, для нейтрализации пакетов ошибок высокой кратности интересными являются коды Рида-Соломона или Файра, для исправления одиночных ошибок можно использовать коды Хэмминга, простые циклические или итеративные коды. Последние уже сами по себе являются примером комбинирования простых сверток по модулю 2.

Многомерные, например, трехмерные, равно как и двумерные итеративные коды, являются простейшим примером использования методов комбинирования известных кодов для построения новых и представляют собой прямое произведение нескольких кодов простой проверки на четность. В общем случае линейный трехмерный итеративный код по основанию два (ТЛИК) можно определить как блочный $(n_1, k_1, n_2, k_2, n_3, k_3)$ -код, формирующий кодовые последовательности длиной k ($k=k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$) информационных и $(k_1+k_2+1) \cdot (k_3+1) + k_1 \cdot k_2$ проверочных разрядов (в приведенном примере $k_1=k_2=k_3=3$). Для определенного набора k двоичных информационных символов кодовое слово можно представить в виде $k_1 \cdot k_3$ n_2 -разрядных кодовых слов строк, $k_2 \cdot k_3$ n_1 -разрядных кодовых слов столбцов; и $k_1 \cdot k_2$ n_3 -разрядных кодовых z -слов ($n_1 = k_1 + 1, n_2 = k_2 + 1, n_3 = k_3 + 1$).

Для исправления группирующихся ошибок была предложена модификация структуры ТЛИК с максимальным возможным числом столбцов в плоскости: 2 типа проверок между плоскостями (вертикальные со сдвигом по горизонтали и z -проверки) и 2 проверки в плоскости (горизонтальные, вертикальные), причем специально было увеличено количество вертикальных проверок (до 16) и уменьшено количество

горизонтальных, чтобы повысить корректирующие возможности на предмет исправления пакетов ошибок (ТЛИК4-16) [1]. Минимальное кодовое расстояние (d) предложенного ТЛИК4-16 равно 5, а проверочная матрица представлена в [2].

Для декодирования предполагается использовать модификацию многопорогового декодера [2], реализующую декодирование в две стадии с пороговым значением 3 на 1-й и 2-й стадиях декодирования. Эффективность исправления ошибок предложенным трехмерным кодом совместно с предложенным двустадийным вариантом МПД, представленная в таблице 1, была получена на основе разработанной имитационной модели [3-4].

Таблица 1 – Исправление группирующихся ошибок методом модифицированного многопорогового декодирования кода ТЛИК4-16

Кратность ошибки	Доля исправленных пакетных ошибок, %	Доля исправленных пакетных ошибок совместно с однократными, %	Доля исправленных пакетных ошибок совместно с двукратными, %
2	100	99.99	98.89
3	100	99.94	98.37
⋮	⋮	⋮	⋮
7	100	99.25	94.78
8	100	99.03	92.04
9	100	98.52	92.08
10	100	98.21	88.73
⋮	⋮	⋮	⋮
15	100	94.72	80.33
16	100	94.09	77.92
17	100	81.64	66.41
18	81.63	76.80	63.32
19	95.89	74.97	59.35

Отметим, что выбор числа столбцов в плоскости кода непосредственно связан с максимальной кратностью пакетной ошибки, которую необходимо исправлять. Параметр k_2 должен быть либо равен кратности пакетной ошибки или превышать его. При этом эффективность исправления ошибок зависит не только от используемого кода, но и от декодера.

Анализ полученных результатов показывает, что метод исправления группирующихся ошибок на основе модифицированного многопорогового декодирования трехмерного итеративного кода с максимальным числом столбцов в плоскости достаточно эффективно справляется с

группирующимися ошибками по сравнению с обычным двумерными и трехмерными итеративными кодами,

Однако, необходимо отметить, что наиболее сложным вариантом является появление независимых многократных ошибок в дополнение одной или нескольким группирующимся ошибкам. Будем такие ошибки называть комбинированными. Для их нейтрализации предлагается использовать последовательную каскадную схему с набором компонентных кодов, но для сокращения затрачиваемого времени, как на стадии кодирования, так и декодирования может выступать реализация «многopotочности» через использование модифицированной каскадной схемы кодирования, которая по сути соединена с многомерной схемой итеративных кодов. Получим своего рода последовательно-параллельную схему кодирования/декодирования (рисунок 1).

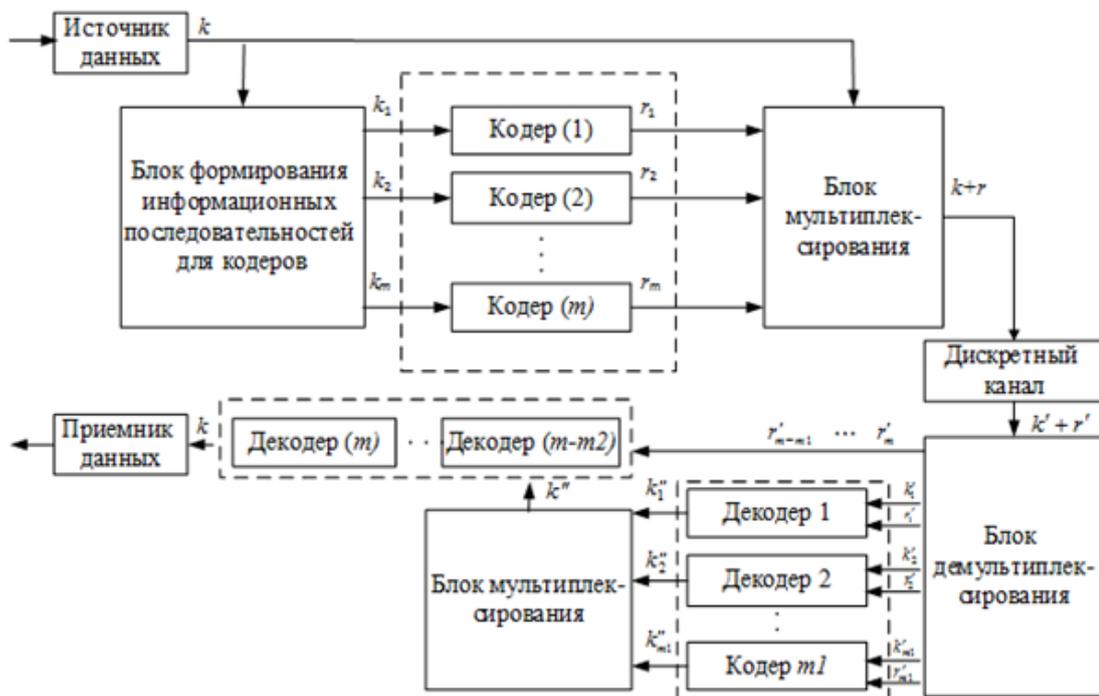
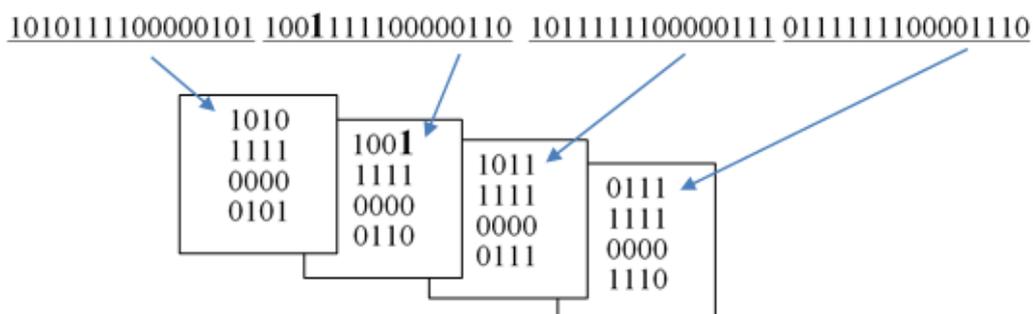


Рисунок 1 – Принципиальная схема последовательно-параллельной схемы кодирования с m компонентными кодами

Отметим, что в блоке формирования информационных последовательностей для кодеров информационная последовательность (k) может преобразовываться к набору кодовых последовательностей от 1 до



m , например, путем записывания в трехмерную структуру (куб или параллелограмм), при котором линейный адрес каждого информационного бита преобразуется в адрес с тремя координатами: номер плоскости, номер строки в плоскости, номер столбца в плоскости (рисунок 2). На данном же этапе можно при необходимости осуществлять перемежение путем изменения последовательности записи бит.

Рисунок 2 – Принцип формирования трехмерной структуры информационной последовательности

Далее из информационных бит в соответствии с новыми трехмерными адресами формируется набор информационных последовательностей ($k_1, k_2 \dots k_m$), каждая из которых подается на блок кодирования, состоящий из m кодеров. Примером последовательности могут быть как строка или столбец в плоскости, так и все плоскость в целом. Используемые коды могут быть как одинаковые, так и отличаться.

Таким образом для внутренних блочных кодов малой длины могут быть использованы следующие информационные последовательности:

- для 1-го блочного кода малой длины 1010111100000101 ;
- для 2-го блочного кода малой длины 1001111100000110 ;
- для 3-го блочного кода малой длины 1011111100000111 ;
- для 4-го блочного кода малой длины 0111111100001110 .

Для внешнего многомерного кода, например, со структурой ТЛИК4-16, будут сформированы последовательности в соответствии с порождающей матрицей [2].

В блоке мультиплексирования осуществляется формирование итоговой кодовой последовательности ($k+r$, где $r = r_1 + r_2 + \dots + r_m$) путем объединения информационных бит (k) и полученных корректирующих символов ($r_1, r_2 \dots r_m$). После передачи данных на принимающей стороне осуществляется многостадийное декодирования принятой кодовой последовательности $k'+r'$, причем на первой стадии некоторое число декодеров (m_1), равное количеству блочных кодов малой длины, выполняют операции параллельно, а декодированная информационная последовательность (k'') отправляется на следующую стадию декодирования, которая в случае использования многопорогового декодера будет состоять из нескольких итераций (количество которых равно m_2), выполняемых последовательно.

Декодирование внутреннего кода предлагается выполнить в виде множества параллельно-декодируемых блочных кодов малой длины (будут применяться, например, к информационным последовательностям одной плоскости, как показано выше), что позволит исправить одиночные и

независимые многократные ошибки в плоскостях без группирующихся ошибок, но которые создают определенные проблемы для дальнейшего исправления группирующихся ошибок внешним кодером, базирующимся, например, на многопороговом декодировании специализированного многомерного итеративного кода.

Список использованных источников:

1. Виткова, М.Ф. Адаптивное многопороговое декодирование многомерных итеративных кодов / М.В. Виткова, Д.М. Романенко // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. – Минск. – Вып. XX. – 2012. – С. 134–138.
2. Романенко, Д.М. Исправление пакетов ошибок с использованием многомерных схем кодирования / Д.М. Романенко, М.Ф. Кудлацкая, Р.И. Белькевич // прикладные вопросы точных наук. – 2019. – № 3(3).
3. Горovenko Л.А. Математические методы компьютерного моделирования физических процессов: учебное пособие / Л.А. Горovenko. – Армавир: РИО АГПУ, 2016. – 104 с.
4. Теория и практика компьютерного моделирования физических процессов : учеб. пособие / Л. А. Горovenko, Е. В. Коврига ; Куб. гос. технол. ун-т, Армав. мех.-технол. ин-т. - Армавир : АГПУ, 2017. - 131с.