

ИСПРАВЛЕНИЕ ПАКЕТОВ ОШИБОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 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., ассистент 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 многомерных схем для исправления многократных, в том числе и пакетных ошибок.

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

CORRECTION OF ERROR PACKAGES USING MULTIDIMENSIONAL CODING 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, assistant 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 multidimensional schemes for correction multiple and packet errors.

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

В настоящее время широкое распространение получили и продолжают быстро развиваться области, связанные с обработкой и передачей данных в беспроводных (спутниковых) сетях, системах хранения данных. Передаваемые сигналы подвергаются специальной обработке для эффективного обнаружения изменений данных в условиях помех без потери информации. В последние годы самым эффективным направлением в теории кодирования и распространенным в протоколах и стандартах беспроводной связи, является использование методов комбинирования известных кодов, что позволяет приблизиться к оптимальной пропускной способности канала. 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.

В данном исследовании за основу была выбрана схема комбинирования, основанная на кронекеровском произведении кодов [1]. Классический итеративный код [1] по сути и является прямым произведением двух сверток по модулю два. Развитием идеи комбинирования известных кодов стал трехмерный линейный итеративный код (ТЛИК) – код, полученный прямым произведением линейного итеративного кода и кода с простой проверкой четности [2]. При использовании трех и более кодов можно получить многомерные схемы кодирования, т.е. многомерные коды. Многомерные схемы итеративных кодов с числом проверок 5 (ТЛИК5), 7 (ТЛИК7) и 9 (ТЛИК9) описаны [3]. Однако в контексте передачи по беспроводным или спутниковым каналам важным является адаптация представленных в [3] итеративных кодов под исправление пакетов ошибок, особенно при возникновении комбинации пакетной и независимых ошибок.

Исследования проводились с помощью методов компьютерного имитационного моделирования [4]. На основе проведенного анализа результатов имитационного моделирования была предложена модификация структуры многомерного итеративного кода с пятью паритетами (ТЛИК5) с увеличением числа столбцов в плоскости. Анализ процесса декодирования ТЛИК5 показал, что диагональные проверки между плоскостями со смещением по горизонтали приводят к размножению ошибок. Поэтому целесообразно использовать следующую модификацию многомерного итеративного кода: 2 типа проверок между плоскостями (вертикальные со

сдвигом по горизонтали (*dzh1*), *z*-проверки) и 2 проверки в плоскости (горизонтальные (*h*), вертикальные (*v*)), причем специально было увеличено количество вертикальных проверок и уменьшено количество горизонтальных, чтобы повысить корректирующие возможности на предмет исправления пакетов ошибок. Так если необходимо закодировать информационное слово длиной $k = 64$ символа, то учитывая, что k_2 (число столбцов в плоскости) должно быть максимальным и $k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$, то целесообразно принять $k_1 = k_3 = 2$, а k_2 , следовательно, равно 16. Минимальное кодовое расстояние такого кода (ТЛИК4-16) $d = 5$, а проверочные символы рассчитываются по соотношениям (1).

$$\begin{aligned} X_{65} &= X_1 \oplus X_2 \oplus X_3 \oplus X_4 \oplus X_5 \oplus X_6 \oplus X_7 \oplus X_8 \oplus \\ &\quad \oplus X_9 \oplus X_{10} \oplus X_{11} \oplus X_{12} \oplus X_{13} \oplus X_{14} \oplus X_{15} \oplus X_{16}, \\ X_{66} &= X_{17} \oplus X_{18} \oplus X_{19} \oplus X_{20} \oplus X_{21} \oplus X_{22} \oplus X_{23} \oplus X_{24} \oplus \\ &\quad \oplus X_{25} \oplus X_{26} \oplus X_{27} \oplus X_{28} \oplus X_{29} \oplus X_{30} \oplus X_{31} \oplus X_{32}, \\ X_{69} &= X_1 \oplus X_{17}, \quad \dots \quad X_{70} = X_2 \oplus X_{18}, \\ X_{101} &= X_1 \oplus X_{49}, \quad \dots \quad X_{102} = X_{17} \oplus X_{33}, \\ X_{133} &= X_1 \oplus X_{33}, \quad \dots \quad X_{164} = X_{32} \oplus X_{64}. \end{aligned} \tag{1}$$

Проверочную матрицу ТЛИК4-16 можно записать в виде, показанном на рисунке 1.

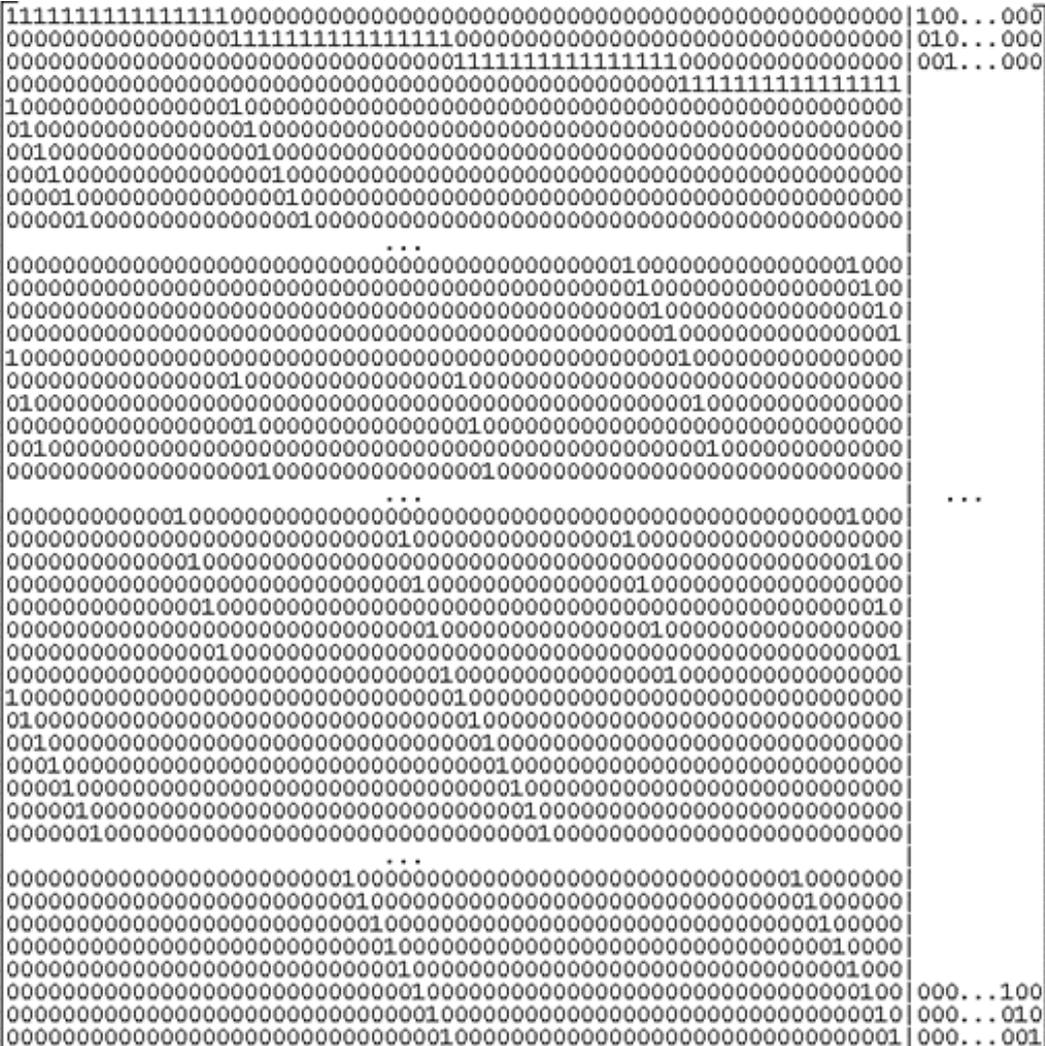
$$H = [A | I] =$$


Рисунок 1 – Проверочная матрица ТЛИК4-16

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. В [3] была показана эффективность использования многопорогового декодера для декодирования многомерных итеративных кодов. Для кода ТЛИК4-16 была выбрана модификация многопорогового декодера, реализующая декодирование в две стадии с пороговым значением 3 на 1-й и 2-й стадиях декодирования. Эффективность

исправления ошибок ТЛИК4-16 совместно с предложенным двустадийным вариантом МПД представлены в таблице 1.

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
4	100	99.90	97.24
5	100	99.72	96.88
6	100	99.59	94.92
7	100	99.25	94.78
8	100	99.03	92.04
9	100	98.52	92.08
10	100	98.21	88.73
11	100	97.53	88.77
12	100	97.12	85.16
13	100	96.27	84.86
14	100	95.75	81.50
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
20	79.31	71.38	56.70

Анализ полученных результатов моделирования показал, 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 обычными трехмерными итеративными кодами, при этом появление независимых ошибок низкой кратности лишь незначительно снижает долю исправленных ошибок в кодовых сообщениях. График на рисунке 2 наглядно демонстрирует, что предлагаемые код и декодер повысили долю исправленных ошибок, например, по сравнению со стандартным ТЛИК5 и классическим многопороговым декодером.

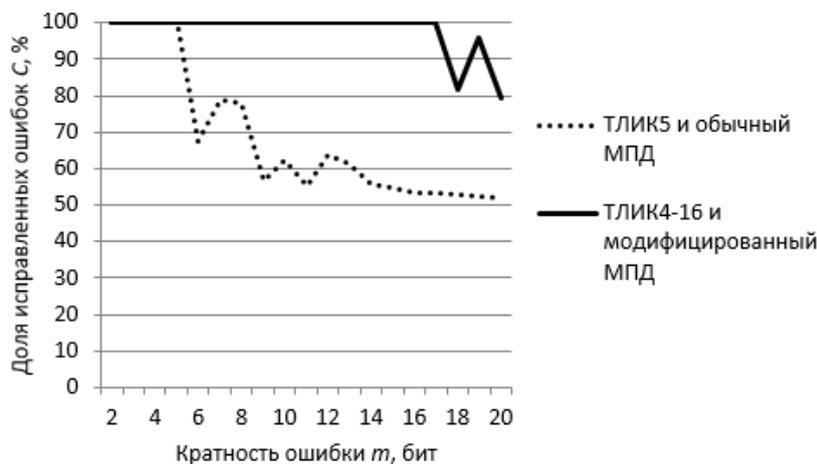


Рисунок 2 – Анализ эффективности исправления пакетных ошибок

Отметим, что появление в дополнение к пакету ошибок двойной независимой ошибки существенно снижает эффективность процесса декодирования. Улучшение результатов можно достигнуть путем использования избыточных кодов с высокой эффективностью исправления пакетов ошибок, например, циклических кодов Рида–Соломона и кодов Файра. Однако данные коды, несмотря на низкую избыточность, характеризуются высокой сложностью аппаратной и программной реализации. К достоинствам же предлагаемого метода следует отнести сравнительно простые алгоритмы кодирования и декодирования, а также минимальную сложность аппаратной и программной реализации. Кроме того, предлагаемые специализированные трехмерные итеративные коды, в отличие от циклических кодов, позволяют построить набор кодов с одинаковой архитектурой и разнообразных по скорости и числу проверок на четность, который позволяет разработать адаптивную систему кодирования/декодирования с возможностью динамического выбора кодов в зависимости от качества канала связи.

Список использованных источников:

1. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Б. – Изд. 2-е. – Москва: Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
2. Multithreshold majority decoding of LDPC-codes / P. Urbanovich, D. Romanenko, D. Shiman, M. Vitkova // *Informatyka Automatyka Pomiaru*. – Poland, Lublinie. – R. 84, № 4a/2012. – 2012. – P. 22–24.
3. Виткова, М.Ф. Адаптивное многопороговое декодирование многомерных итеративных кодов / М.В. Виткова, Д.М. Романенко // *Труды*

III Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов,
преподавателей «ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ ТОЧНЫХ НАУК»

III International Scientific Practical Conference of graduate and postgraduate students,
lecturers «APPLIED ISSUES OF EXACT SCIENCES»
01-02 November 2019, Armavir

БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. – Минск. – Вып. XX. – 2012. –
С. 134–138.

4. Горovenko, Л.А. Математические методы компьютерного
моделирования физических процессов / Л.А. Горovenko // Международный
журнал экспериментального образования. – 2017. № 2. С. 92-93.