

Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники»

Объект авторского права  
УДК 621.391: 075.8

**ЖЭНЬ**  
**Сюньхуань**

**ДЕКОДИРОВАНИЕ ИТЕРАТИВНЫХ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КОДОВ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОБРАЗОВ ОШИБОК**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Минск 2024

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Конопелько Валерий Константинович**,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Азаров Илья Сергеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры электронных вычислительных средств учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

**Бысов Анатолий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Представительства ООО «Квалитет» (Российская Федерация) в Республике Беларусь

Оппонирующая организация учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»

Защита состоится «26» декабря 2024 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375-17-293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «20» ноября 2024 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент



Т. А. Пулко

## **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие систем радио- и волоконно-оптической связи выдвигает жесткие требования к быстродействию кодеров помехоустойчивых кодов. Эти требования противоречат требованиям к корректирующей способности: чем она выше, тем выше сложность помехоустойчивого кода и вычислительная сложность кодера, ниже его быстродействие. Решить данное противоречие позволяет распараллеливание обработки и использования простых помехоустойчивых кодов. Еще одна область применения простых помехоустойчивых кодов – сенсорные сети, в которых могут использоваться устройства только с низким энергопотреблением и низкой вычислительной сложностью. Простейшие помехоустойчивые коды – коды Хэмминга – не находят широкого самостоятельного применения из-за низкой корректирующей способности. Для ее повышения разработаны итеративные коды Хэмминга. Известные алгоритмы декодирования итеративных кодов Хэмминга имеют низкую вычислительную сложность, но не достигают теоретического предела корректирующей способности, установленного исходя из кодового расстояния. Это снижает эффективность их применения в сенсорных сетях и высокоскоростных радиосетях с высокой вероятностью ошибок передачи данных. В таком случае используются сложные итеративные коды, формируемые на основе одномерных кодов БЧХ, РС и др. Ускорение их декодирования достигается распараллеливанием обработки строк и столбцов кодовой матрицы. Дополнительное ускорение связано с выбором алгоритма декодирования в зависимости от распределения ошибок в кодовой матрице. Такое распределение может быть представлено образом ошибок, нулевые и единичные элементы которого соответствуют правильным и ошибочным символам. Известные алгоритмы формируют библиотеки базовых образов ошибок с высокой избыточностью, что приводит к высокой вычислительной сложности идентификации образов ошибок при декодировании сложных итеративных кодов. Исследованию возможностей повышения корректирующей способности декодеров итеративных кодов Хэмминга за счет выбора алгоритма декодирования в зависимости от класса образа ошибки, определяемого по распределению ошибочных бит в кодовой матрице, и уменьшения вычислительной сложности идентификации образов ошибок при декодировании сложных помехоустойчивых кодов за счет сокращения избыточности библиотеки базовых образов ошибок посвящена данная диссертационная работа.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2016–2020 годы, утвержденным Постановлением Совета Министров

Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190 (пункту 5 «Информатика и космические исследования»), приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156 (пункту 1 «Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства (средства связи и методы передачи данных)»).

Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках НИР ГБ 16-2033 «Исследование методов обработки и передачи видеоданных в инфокоммуникациях» (2016–2020 гг.) и НИР ГБ 21-2033 «Обработка, кодирование и передача информации в сетевых системах» (2021–2025 гг.).

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

Целью диссертационной работы является повышение эффективности декодеров итеративных помехоустойчивых кодов для беспроводных сенсорных сетей с низким энергопотреблением и высокоскоростных радио- и оптических сетей на основе анализа двумерных групповых ошибок различной кратности.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– исследованы модели каналов передачи данных, методы помехоустойчивого кодирования беспроводных сенсорных сетей, высокоскоростных радио- и оптических сетей, методы формирования образов ошибок, возникающих в радио- и оптических каналах передачи данных;

– разработаны декодеры итеративных кодов Хэмминга на основе многоклассовой классификации образов ошибок, обеспечивающие высокую корректирующую способность при низкой вычислительной сложности;

– разработан формирователь классов образов ошибок с низкой избыточностью, позволяющий уменьшить время идентификации образов ошибок для повышения быстродействия декодеров сложных итеративных помехоустойчивых кодов.

*Объектом исследования* являются помехоустойчивые декодеры каналов передачи данных.

*Предметом исследования* являются образы ошибок в каналах передачи данных.

### **Научная новизна**

1. Разработан трехклассовый синдромный декодер итеративного классического кода Хэмминга  $7 \times 7$  символов, отличающийся от известных двухэтапного и трехэтапного декодеров выбором последовательности операций исправления и стирания ошибок строк и столбцов декодируемой матрицы в зависимости от класса образов ошибок. Для аналогового канала

передачи с белым гауссовым шумом при отношении сигнал – шум порядка 1–3 дБ (при передаче закодированных данных в сенсорной сети *ZigBee* 868 МГц со скоростью 20 кбит/с с использованием *BPSK*-модулированных сигналов в полосе частот 600 кГц) трехклассовый декодер обеспечивает уменьшение вероятности битовых ошибок до 6,1 раза по сравнению с двухэтапным декодером и до 3,0 раза по сравнению с трехэтапным декодером. Выигрыши достигаются за счет увеличения вычислительной сложности декодирования, обусловленного анализом образов ошибок.

2. Разработан семиклассовый синдромный декодер итеративного расширенного кода Хэмминга  $8 \times 8$  символов, отличающийся от известных двухэтапного, четырехэтапного и двухрежимного двух- пятиэтапного декодеров выбором последовательности операций транспонирования, исправления и стирания ошибок строк и столбцов декодируемой матрицы в зависимости от класса образов ошибок. Для аналогового канала передачи с белым гауссовым шумом при отношении сигнал – шум порядка 1–3 дБ (при передаче закодированных данных в сенсорной сети *ZigBee* 915 МГц со скоростью 40 кбит/с с использованием *BPSK*-модулированных сигналов в полосе частот 1,2 МГц) семиклассовый декодер обеспечивает уменьшение вероятности битовых ошибок до 1,6 раза по сравнению с двухэтапным декодером, до 4,9 раза по сравнению с четырехэтапным декодером, до 1,1 раза по сравнению с двухрежимным двух- пятиэтапным декодером. Выигрыши достигаются за счет увеличения вычислительной сложности декодирования, обусловленного анализом образов ошибок.

3. Разработан итеративный формирователь классов образов ошибок, отличающийся от известных рангового и позиционного формирователей операциями расширения множества классов и проверки диагональной симметрии базовых образов, позволяющий повысить эффективность декодирования сложных итеративных кодов за счет компактности классов.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Синдромный декодер итеративного классического кода Хэмминга  $7 \times 7$  символов, основанный на трех классах образов ошибок и признаках однократных и многократных ошибок строк и столбцов декодируемой матрицы, позволяющий исправить ошибки кратностью до четырех и уменьшить вероятность ошибок с кратностью 6 в 7 и 2 раза по сравнению с двухэтапным и трехэтапным декодерами соответственно.

2. Синдромный декодер итеративного расширенного кода Хэмминга  $8 \times 8$  символов, основанный на семи классах образов ошибок и признаках однократных, двукратных и многократных ошибок строк и столбцов декодируемой матрицы, позволяющий исправить ошибки кратностью до семи и уменьшить вероятность ошибок с кратностью девять в 20, 4 и 36 раз по сравнению с двухэтапным, четырехэтапным и двухрежимным двух-пятиэтапным декодерами соответственно за счет увеличения кодовой избыточности и вычислительной сложности.

3. Итеративный формирователь классов образов ошибок, основанный на итеративном увеличении кратности и размеров базовых образов и исключении симметричных образов, позволяющий при декодировании сложных итеративных кодов уменьшить вычислительную сложность идентификации образов ошибок на 33–44 % в зависимости от кратности ошибок по сравнению с ранговым и позиционным формирователями.

### **Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с ограничением их от соавторов совместных исследований и публикаций**

Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо соискателем, либо с его непосредственным участием. Личный вклад соискателя заключается в научном обосновании и разработке декодеров итеративных помехоустойчивых кодов на основе анализа образов ошибок, позволяющих повысить корректирующую способность и снизить вычислительную сложность декодирования в беспроводных сенсорных и широкополосных радио- и оптических сетях; проведении экспериментов по исследованию характеристик, оценке эффективности разработанных декодеров; обработке и анализе полученных результатов; формулировке выводов. Вклад научного руководителя д.т.н. Конопелько В.К. и д.т.н. Цветкова В.Ю. связан с постановкой цели и задач исследования. Вклад других соавторов совместно опубликованных работ – Ма Ц. и Чэнь И. – связан с обсуждением возможностей внедрения результатов диссертации. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международном научно-техническом семинаре «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (Минск, 2019); Международной научно-практической конференции «Кодирование и цифровая обработка сигналов в инфокоммуникациях» (Минск, 2019, 2020); XIV Международной научно-практической конференции «Pattern Recognition and Information Processing» (Минск, 2021); VI Международной научно-практической конференции «Big Data and Advanced Analytics» (Минск, 2020); Международной научной конференции «Информационные технологии и системы» (Минск, 2019); 56-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 2020); VIII Белорусско-Китайском молодежном инновационном форуме (Минск, 2021); Международном научно-техническом семинаре «Технологии передачи и обработки информации» (Минск, 2022, 2023).

Использование результатов диссертационной работы отражено в

соответствующем акте внедрения, приведенном в приложении к диссертации.

### **Опубликованность результатов диссертации**

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 18 печатных работ, в том числе 5 статей в научных рецензируемых журналах общим объемом 2,5 авторского листа; 12 статей в сборниках и материалах конференций и один тезис доклада научных конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и шести приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 209 страниц, включая 102 рисунка на 42 страницах, 38 таблиц на 13 страницах, список использованных библиографических источников из 124 наименования на 11 страницах, список публикаций автора по теме диссертации из 18 наименований на 3 страницах, 6 приложений на 42 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены объект и предмет исследования, сформулирована научная гипотеза: декодирование итеративных кодов на основе анализа образов ошибок является более эффективным подходом по сравнению с непосредственным многоэтапным декодированием итеративных помехоустойчивых кодов любой сложности.

В **первой главе** проведен анализ методов декодирования помехоустойчивых кодов с низкой вычислительной сложностью и высокой скоростью декодирования.

В беспроводных сенсорных сетях с низким энергопотреблением для повышения эффективности защиты от ошибок передачи целесообразно использовать итеративные коды Хэмминга. Это обусловлено тем, что итеративные коды Хэмминга, обладая высокой избыточностью по сравнению с одномерными кодами Хэмминга, позволяют снизить вычислительную сложность и повысить корректирующую способность декодера за счет параллельной обработки строк и столбцов малой длины. Однако известные декодеры итеративных кодов Хэмминга (*HD2* – двухэтапный классического кода Хэмминга, *HD3* – трехэтапный классического кода Хэмминга, *HD2E* – двухэтапный расширенного кода Хэмминга, *HD4E* – четырехэтапный расширенного кода Хэмминга, *HD2/5E* – двухрежимный двух- пятиэтапный расширенного кода Хэмминга) не достигают теоретического предела по

корректирующей способности.

В высокоскоростных радио- и оптических сетях для повышения скорости декодирования необходимо распараллеливание. Высокой степени параллелизма можно достичь за счет применения итеративных кодов, обеспечивающих баланс между избыточностью и корректирующей способностью и позволяющих использовать библиотеку для быстрой идентификации образов ошибок и выбора алгоритма декодирования. Библиотека содержит ограниченное количество базовых образов, позволяющих сформировать любые произвольные образы с помощью перестановок строк и столбцов базовых образов. Однако известные ранговый и позиционный формирователи библиотеки имеют высокую вычислительную сложность, обусловленную особенностями получения базовых образов и их избыточностью.

Возможности устранения отмеченных недостатков заключаются в выборе алгоритма декодирования в зависимости от класса образа ошибки, определяемого по распределению ошибочных бит в кодовой матрице, и сокращении избыточности библиотеки базовых образов ошибок.

Во второй главе приведено описание разработанных трехклассового и семиклассового синдромных декодеров итеративных классического и расширенного кодов Хэмминга.

Трехклассовый синдромный декодер итеративного классического кода Хэмминга  $7 \times 7$  символов (*RCDOS – Rows, Columns processing and error Deletions Order Selection*) основан на трех классах образов ошибок и признаках однократных и многократных ошибок строк и столбцов декодируемой матрицы [1–А; 2–А; 7–А]. Сущность трехклассового синдромного декодирования состоит в выборе последовательности операций исправления и стирания ошибок строк и столбцов декодируемой матрицы  $\tilde{M}_{n \times n}$  в зависимости от класса образа с определенной кратностью и положением ошибок. Для классификации образов используется количество  $N_E^R$  строк и  $N_E^C$  столбцов, содержащих ошибки с кратностью один и более, определяемые с помощью синдромов. В зависимости от результатов классификации выбирается определенная последовательность операций (режим работы декодера) (рисунок 1): а) декодирование строк, столбцов, строк (режим *R-C-R*) при  $N_E^R > N_E^C$  или  $N_E^R = N_E^C > 2$  (класс 1); б) декодирование столбцов, строк, столбцов (*C-R-C*) при  $N_E^R < N_E^C$  (класс 2); в) стирание ошибок и декодирование строк (*CLR-R*) при  $N_E^R = N_E^C \leq 2$  (класс 3). Символы «*R*», «*C*» и «*CLR*» указывают соответственно на обработку строк, столбцов и стирание ошибок декодируемой матрицы.



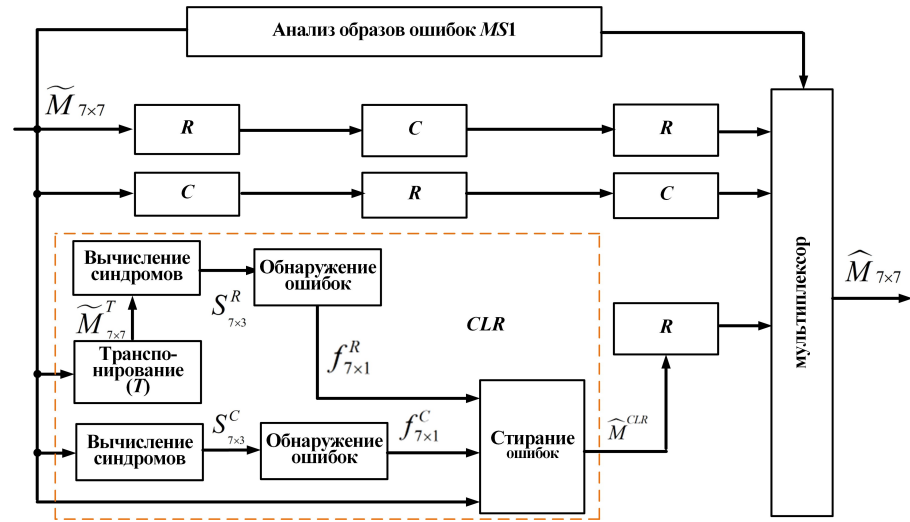


Рисунок 1 – Трехклассовый декодер итеративного классического кода Хэмминга

Формирование декодированной матрицы  $\widehat{M}_{n \times n}^{(3)}$  описывается с помощью выражения

$$\widehat{M}_{n \times n}^{(3)} = \begin{cases} F_R \left( F_C \left( F_R \left( \widetilde{M}_{n \times n} \right) \right) \right) \text{ при } (N_E^R > N_E^C) \vee ((N_E^R = N_E^C) \wedge (N_E^R > 2)), \\ F_C \left( F_R \left( F_C \left( \widetilde{M}_{n \times n} \right) \right) \right) \text{ при } N_E^R < N_E^C, \\ F_R \left( F_{CLR} \left( \widetilde{M}_{n \times n} \right) \right) \text{ при } (N_E^R = N_E^C) \wedge (N_E^R \leq 2), \end{cases} \quad (1)$$

где  $F_R$  – функция декодирования строк кодовой матрицы;  $F_C$  – функция декодирования столбцов кодовой матрицы;  $F_{CLR}$  – функция стирания ошибок, определяющая значения элементов  $\widehat{m}^{CLR}(j, i)$  декодированной матрицы  $\widehat{M}_{n \times n}^{CLR}$  на основе значений элементов  $\widetilde{m}(j, i)$  декодируемой матрицы  $\widetilde{M}_{n \times n}$  и синдромов  $S_{n \times r}^R$  строк и  $S_{n \times r}^C$  столбцов с помощью выражения

$$\widehat{m}^{CLR}(j, i) = \begin{cases} \widetilde{m}(j, i) \text{ при } (f^R(j) = 0) \vee (f^C(i) = 0), \\ \overline{\widetilde{m}(j, i)} \text{ при } (f^R(j) = 1) \wedge (f^C(i) = 1) \end{cases}, \text{ при } j = \overline{1, n}, i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $f^R(j)$ ,  $f^C(i)$  – индикаторы ошибок в строках и столбцах декодируемой матрицы – элементы векторов-индикаторов ошибок  $F_{n \times 1}^R = [f^R(j)]_{(j=\overline{1, n})}$  и  $F_{n \times 1}^C = [f^C(i)]_{(i=\overline{1, n})}$ , определяемые с помощью выражений

$$f^R(j) = \begin{cases} 0 & \text{при } \sum_{p=1}^r s^R(j, p) = 0, \\ 1 & \text{при } \sum_{p=1}^r s^R(j, p) > 0, \end{cases}, \text{ при } j = \overline{1, n}, i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

$$f^C(i) = \begin{cases} 0 & \text{при } \sum_{p=1}^r s^C(i, p) = 0, \\ 1 & \text{при } \sum_{p=1}^r s^C(i, p) > 0 \end{cases}, \text{ при } j = \overline{1, n}, i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

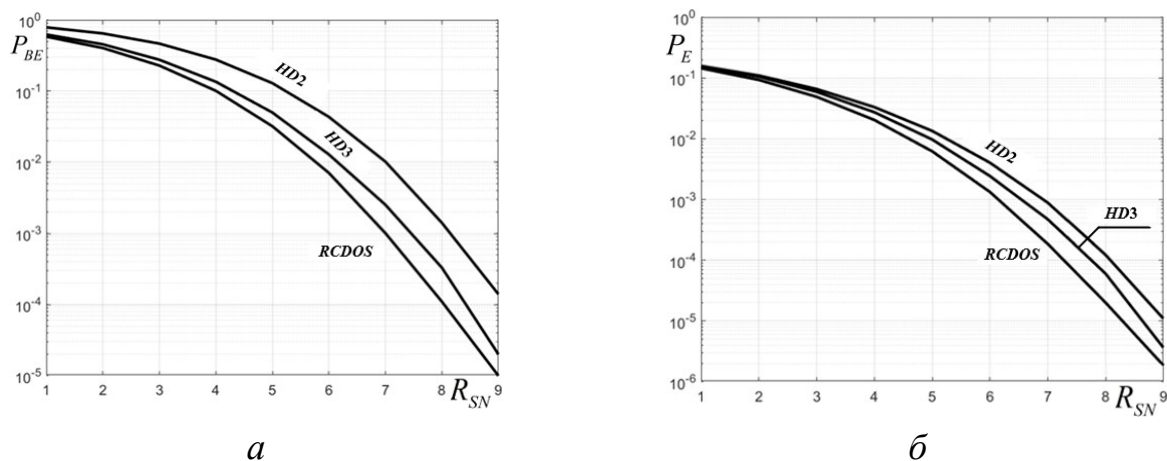
Значения  $N_E^R$  и  $N_E^C$  вычисляются с помощью выражений

$$N_E^R = \sum_{j=1}^n f^R(j), \text{ при } j = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$N_E^C = \sum_{i=1}^n f^C(i), \text{ при } i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

На рисунке 2 приведены зависимости вероятностей блочных и битовых ошибок на выходе декодера от отношения  $R_{SN}$  сигнал – шум в аналоговом канале с белым гауссовым шумом. Из приведенных зависимостей следует, что при изменении  $R_{SN}$  в диапазоне 1–3 дБ (при передаче закодированных данных в сенсорной сети *ZigBee* по стандарту *IEEE* 802.15.4 на частоте 868 МГц со скоростью 20 кбит/с с помощью *BPSK*-модулированных сигналов в полосе частот 600 кГц) декодер *RCDOS* обеспечивает существенное снижение вероятностей ошибок: блочных – в 2,4–16,7 раза по сравнению с *HD2* и в 1,2–5,5 раза по сравнению с *HD3*; битовых – в 1,5–6,1 раза по сравнению с *HD2* и в 1,3–3,0 раза по сравнению с *HD3*. Аналогичные зависимости получены для цифрового симметричного канала с контролируемым значением  $P_{TE}$  вероятности битовой ошибки передачи. Из них следует, что при изменении  $P_{TE}$  в диапазоне [0,01–0,03] декодер *RCDOS* обеспечивает существенное снижение вероятностей ошибок: блочных – в 2,9–8,0 раз по сравнению с *HD2* и в 1,2–2,0 раза по сравнению с *HD3*; битовых – в 1,7–3,3 раза по сравнению с *HD2* и в 1,4–2,0 раза по сравнению с *HD3*.

С помощью модели цифрового канала передачи с контролируемым значением  $N_{BTE}$  количества ошибочных бит в каждом передаваемом кодовом блоке установлено, что декодер *RCDOS* в отличие от декодеров *HD2* и *HD3* исправляет все ошибки кратностью четыре. При ошибках большей кратности *RCDOS* показывает лучшую исправляющую способность по сравнению с *HD2* и *HD3*.



*a* – для блочных ошибок; *б* – для битовых ошибок

Рисунок 2 – Зависимости вероятностей ошибок на выходе трехклассового декодера от  $R_{SN}$  для аналогового канала с белым гауссовым шумом

Установлено, что декодер *RCDOS* имеет более высокую временную сложность по сравнению с декодерами *HD2* и *HD3* в 2,4 и 1,6 раза в двухэтапном режиме и в 3,3 и 2,2 раза в трехэтапном режиме соответственно [1–А; 2–А; 6–А].

Семиклассовый синдромный декодер итеративного расширенного кода Хэмминга (*ERCDS* – *Extended code Rows, Columns processing and error Deletions Order Selection*) основан на семи классах образов ошибок и признаках однократных, двукратных и многократных ошибок строк и столбцов декодируемой матрицы [3–А; 7–А]. Сущность семиклассового синдромного декодирования состоит в выборе последовательности операций транспонирования, исправления и стирания ошибок строк и столбцов декодируемой матрицы  $\tilde{M}_{n \times n}$  в зависимости от класса образа с определенной кратностью и положением ошибок. Для классификации используется количество  $N_{YE}^{XR}$  строк и  $N_{YE}^{XC}$  столбцов, содержащих ошибки с нечетной кратностью один и более ( $Y = 1 +$ ), два ( $Y = 2$ ), любой кратностью один и более ( $Y = 1 + 2$ ), определяемые с помощью синдромов на различных этапах декодирования (предварительном ( $X = 0$ ) и последующих с первого по четвертый или пятый ( $X = 1, \dots, 5$ )). В зависимости от результатов классификации выбирается определенная последовательность операций (режим работы декодера) (рисунок 3): а) предварительное стирание ошибок (режим *CLRE-RE-CE-RE-CE*) при  $(N_{1+E}^{0R} = N_{1+E}^{0C}) \wedge (N_{1+2E}^{0R} = N_{1+2E}^{0C}) \wedge (N_{1+E}^{0R} N_{1+E}^{0C} < N_{1+2E}^{0R})$  (класс 1); б) декодирование в первую очередь строк (режимы *RE-CLRE-CE*, *RE-CE-RE-CE*, *RE-CE-CLRE-CE*) при  $N_{1+E}^{0R} > N_{1+E}^{0C}$  (классы 2, 3, 4); в) декодирование в первую очередь столбцов (режимы *T-RE-CLRE-CE-T*, *T-RE-CE-RE-CE-T*, *T-RE-CE-CLRE-CE-T*) при  $N_{1+E}^{0R} < N_{1+E}^{0C}$  (классы 5, 6, 7); г) промежуточное стирание ошибок на третьем (втором, если предобработка не выполняется) этапе (режимы *RE-CLRE-CE*, *T-RE-CLRE-CE-T*) при  $(N_{1+E}^{2C} = 2) \wedge (N_{2E}^{1R} = 3)$  (классы 2, 5); д) промежуточное стирание ошибок на

червертом (третьем, если предобработка не выполняется) этапе (режим  $T-RE-CE-CLRE-CE-T$ ) при  $(N_{2E}^{3R} \leq 0) \wedge ((N_{1+E}^{2C} \neq 2) \vee (N_{2E}^{1R} \neq 3))$  (класс 7). Символы « $RE$ », « $CE$ », « $T$ » и « $CLRE$ » указывают соответственно на обработку строк, столбцов, транспонирование и стирание ошибок декодируемой матрицы.

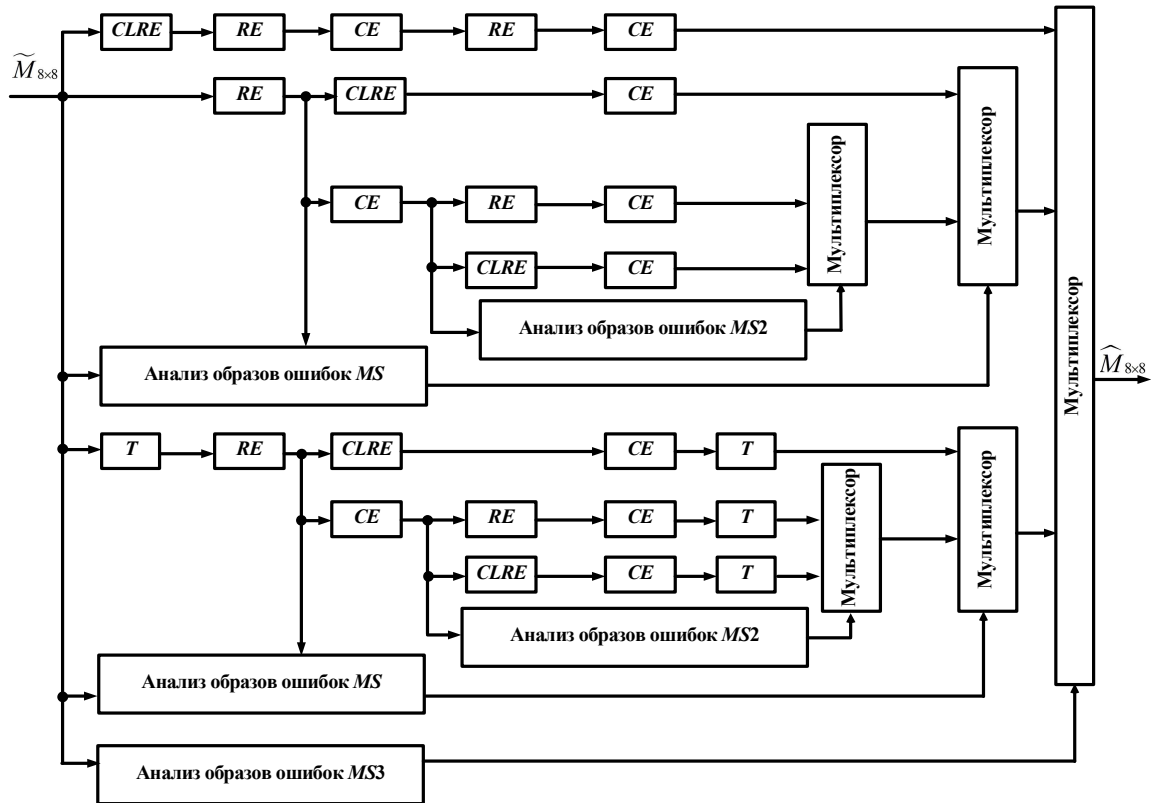
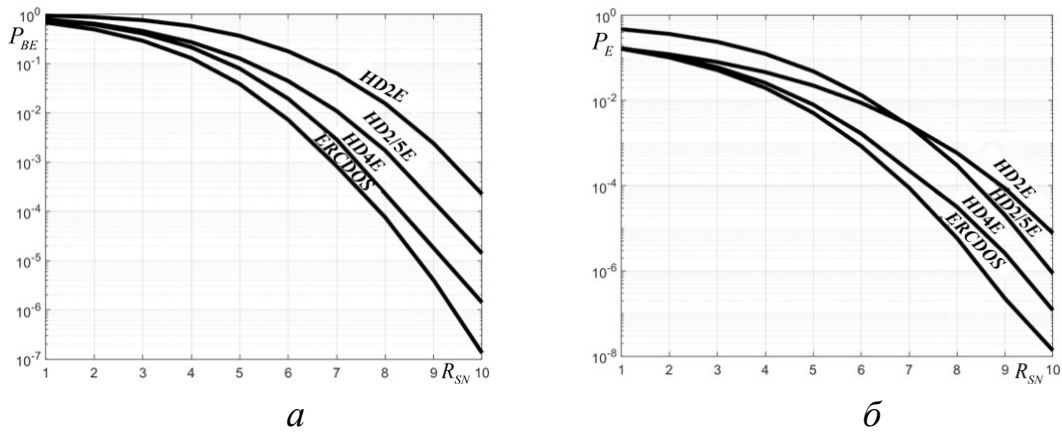


Рисунок 3 – Семиклассовый декодер итеративного расширенного кода Хэмминга

На рисунке 4 приведены зависимости вероятностей блочных и битовых ошибок на выходе декодера от отношения  $R_{SN}$  сигнал – шум в аналоговом канале с белым гауссовым шумом. Из приведенных зависимостей следует, что декодер  $ERCDOS$  обеспечивает существенное снижение вероятностей ошибок (при  $R_{SN} = 10$ ): блочных – до 10,7 раза по сравнению с  $HD4E$ , до 106,7 раза по сравнению с  $HD2/5E$ , до 1066,7 раз по сравнению с декодером  $HD2E$ ; битовых – до 9,4 раза по сравнению с декодером  $HD4E$ , до 50 раз по сравнению с декодером  $HD2/5E$  до 500 раз по сравнению с декодером  $HD2E$ . При изменении отношения сигнал – шум в диапазоне 1–3 дБ (при передаче закодированных данных в сенсорной сети *ZigBee* по стандарту *IEEE 802.15.4* на частоте 915 МГц со скоростью 40 кбит/с с помощью  $BPSK$ -модулированных сигналов в полосе частот 1,2 МГц) декодер  $ERCDOS$  позволяет снизить вероятности ошибок: блочных – в 1,6–3,4 раз по сравнению с декодером  $HD2E$ , в 1,4–2,0 раза по сравнению с декодером  $HD4E$ , в 1,3–1,8 раза по сравнению с декодером  $HD2/5E$ ; битовых – в 1,2–1,6 раза по сравнению с декодером  $HD2E$ , в 3,3–4,9 раза по сравнению с декодером  $HD4E$ , в 1,1 раза по сравнению с декодером  $HD2/5E$ .



*a* – для блочных ошибок; *б* – для битовых ошибок

Рисунок 4 – Зависимости вероятностей ошибок на выходе семиклассового декодера итеративного расширенного кода Хэмминга от  $R_{SV}$

Аналогичные зависимости получены для цифрового симметричного канала передачи с контролируемым значением  $P_{TE}$  вероятности битовой ошибки передачи. Из них следует, что декодер *ERCADOS* обеспечивает существенное снижение вероятностей ошибок (при  $P_{TE} = 0,05$ ): блочных – до 4,8 раза по сравнению с *HD4E*, до 20,0 раза по сравнению с *HD2/5E* и до 160,0 раза по сравнению с декодером *HD2E*; битовых – до 5,0 раза по сравнению с *HD4E*, до 60 раз по сравнению с *HD2/5E* и до 90 раз по сравнению с декодером *HD2E*.

С помощью модели цифрового канала передачи с контролируемым значением  $N_{BTE}$  количества ошибочных бит в каждом передаваемом кодовом блоке установлено, что декодер *ERCADOS* исправляет все образы с числом ошибок до семи включительно, в то время как декодеры *HD2E*, *HD2/5E* и *HD4E* не исправляют некоторые образы при количестве ошибок четыре и более.

Установлено, что декодер *ERCADOS* имеет более высокую временную сложность по сравнению с декодерами *HD2E*, *HD4E* и *HD2/5E* в 2,0, 1,1 и 2,0 раза в трехэтапном режиме (*HD2/5E* в двухэтапном режиме), в 2,7, 1,5 и 2,7 раза в четырехэтапном режиме (*HD2/5E* в двухэтапном режиме), в 3,0, 1,7 и 1,3 раза в пятиэтапном режиме (*HD2/5E* в пятиэтапном режиме), в 2,8, 1,5 и 1,2 раза в шестиэтапном режиме (*HD2/5E* в пятиэтапном режиме) соответственно.

Существенное повышение корректирующей способности при незначительном росте вычислительной сложности делает разработанные декодеры более эффективными по сравнению с известными для применения в беспроводных сенсорных сетях с высокой вероятностью ошибок и ограничениями на вычислительные ресурсы [3–А; 7–А].

В третьей главе описан разработанный итеративный формирователь классов образов ошибок, основанный на итеративном увеличении кратности и размеров базовых образов и исключении диагонально-симметричных образов. Сущность итеративного формирования библиотеки базовых образов

ошибок состоит в расширении множества классов образов ошибок путем увеличения на единицу размеров существующих базовых образов и исключении производных образов, которые могут быть получены в результате перестановки строк, столбцов и транспонирования базовых образов (рисунок 5).

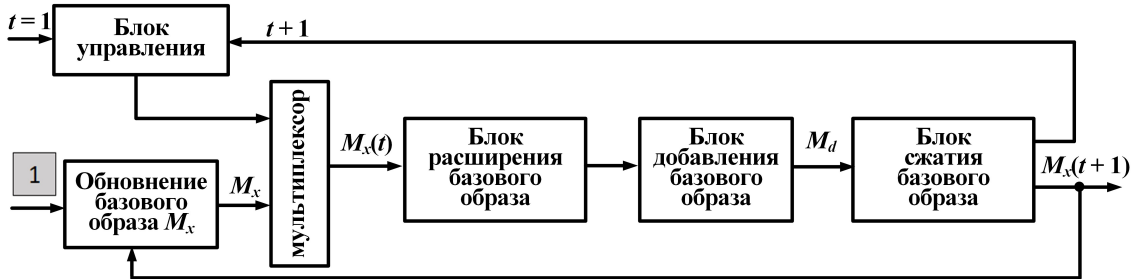


Рисунок 5 – Итеративное формирование библиотеки базовых образов ошибок

Формирование библиотеки  $\{M_R(n, t)\}_{n=1, \overline{N(t)}}$  базовых образов ошибок описывается с помощью выражений

$$\{M_R(n, t)\}_{n=1, \overline{N(t)}} = \{M_x(n_x, t)\}_{n_x=1, \overline{N_x(t)}} \cup \{M_x(n_x, t)^T\}_{n_x(t)=1, \overline{N_x(t)}}, \quad (7)$$

$$\text{где } \{M_x(n_x, t)\}_{n_x=1, \overline{N_x(t)}} = f_M \left( \{M_d(n_d, t), P_{Rank}(n_d, t), P_{RC}(n_d, t), P_{Ws}(n_d, t)\}_{n_d=1, \overline{N_d(t)}} \right),$$

$$\{M_d(n_d, t)\}_{n_d=1, \overline{N_d(t)}} = f_{add} \left( \{M_x(n_x, t-1)\}_{n_x=1, \overline{N_x(t-1)}} \right), N_d(t) = N_x(t-1) \cdot (t^2 - t + 1),$$

$$M_x(n_x, 1) = m_x(n_x, 1) = 1, \text{ при } N_x(1) = 1,$$

$$\neg \exists n_1 \neg \exists n_2 \left( M_R(n_1) = (M_R(n_2))^T \right) \text{ при } n_1 = \overline{1, N(t)}, n_2 = \overline{1, N(t)}, \quad (8)$$

где  $M_x(n_x, t)$  – базовый образ ошибок на  $t$ -й итерации,  $M_x(n_x, t) = \|m_x(n_x, t, i, j)\|_{(i=\overline{1, t}, j=\overline{1, t})}$ ;  $M_d(n_d, t)$  – расширенный образ ошибок;  $f_{add}$  – функция расширения образа ошибок и добавления одного единичного элемента;  $P_{RC}$  – вектор количества единичных элементов в строках и столбцах матрицы, вычисляемый с помощью выражения

$$P_{RC} = f_{sort}(p_{RE}, p_{CE}), \quad (9)$$

где  $f_{sort}(\ )$  – функция сортировки аргументов в порядке убывания.

Для оценки эффективности формирования библиотеки базовых образов ошибок проведено сравнение количества базовых ( $N_d(t)$  для итерационного,  $N(t)$  для рангового и позиционного формирователей) и исходных образов

(  $N_R(t)$  для рангового и  $N_o(t)$  для позиционного формирователей), необходимых для получения базовых образов (таблица 1). В итеративном формирователе исходными для получения базовых образов кратностью  $t$  являются все базовые образы  $N_B(1, \dots, t-1)$  и производные образы  $N_d(1, \dots, t-1)$ , полученные для кратности ошибок  $\overline{1, t-1}$ .

Таблица 1 – Количество образов ошибок при  $t = 2, \dots, 9$

Количество образов	Кратность ошибок $t$							
	2	3	4	5	6	7	8	9
$N_d(t)$	2	4	10	20	51	119	313	836
$N_B(1, \dots, t-1)$	3	14	52	210	620	2193	6783	22 849
$N_d(1, \dots, t-1)$	4	18	70	280	900	3093	9876	32 725
$N(t)$	3	6	16	34	90	215	558	1430
$N_R(t)$	6	84	1820	53 130	1 947 792	85 900 584	4 426 165 368	260 887 834 350
$N_o(t)$	3	28	455	10 626	324 632	12 271 512	553 270 671	28 987 537 150

Из таблицы 1 следует, что количество базовых образов для итеративного формирователя уменьшается на 33–44 % в зависимости от кратности ошибок по сравнению с ранговым и позиционным формирователями. Это приводит к соответствующему уменьшению вычислительной сложности идентификации образов ошибок при декодировании, что связано с уменьшением количества операций обращения к памяти и сравнения, и позволяет повысить эффективность декодирования сложных итеративных кодов, используемых при больших размерах кодовых матриц и высокой кратности ошибок в высокоскоростных радио и оптических системах передачи данных [4–А; 5–А; 8–А – 15–А; 18–А].

В четвертой главе приведены результаты оценки корректирующей способности декодеров итеративных кодов, использующих библиотеку базовых образов ошибок, и сложности реализации разработанных декодеров на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) [16–А; 17–А].

Показано, что использование базовых образов ошибок из библиотеки по сравнению с полным перебором всех возможных вариантов образов ошибок позволяет существенно снизить временные затраты на проверку возможности исправления ошибок декодерами. Установлено, что декодер *RCDOS* может правильно корректировать примерно 45 % образов ошибок, число ошибочных бит в которых не превышает девяти, тогда как известные декодеры итеративного классического кода Хэмминга могут корректировать не более 40 % таких образов ошибок. Декодер *ERCDOS* может корректировать 91 % образов ошибок, число ошибочных бит в которых не превышает девяти, тогда как известные декодеры итеративного расширенного кода Хэмминга могут корректировать не более 80 % таких образов ошибок. При этом декодер *ERCDOS* может корректировать на 46 % больше образов ошибок, чем декодер *RCDOS*.



Разработанные декодеры *RCDOS* и *ERCDOС* итеративных классического и расширенного кодов Хэмминга реализованы на ПЛИС с помощью системы автоматизированного проектирования *FPGA Xilinx* и языка программирования *Verilog*. Оценка сложности реализации данных декодеров показала, что для декодера *ERCDOС* итеративного расширенного кода Хэмминга требуется примерно в 2 раза больше регистров и почти в 3 раза больше логических модулей по сравнению с декодером *RCDOS* итеративного классического кода Хэмминга. При этом реализации декодеров *RCDOS* и *ERCDOС* занимают соответственно 18 и 49 % ресурсов простейшей ПЛИС типа *XC3S50*.

В приложениях содержатся библиотека базовых образов ошибок с кратностью до семи включительно, структуры и примеры работы предложенных декодеров итеративных кодов Хэмминга, результаты оценки ресурсов ПЛИС для реализации разработанных декодеров, акт об использовании результатов диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработан трехклассовый синдромный декодер итеративного классического кода Хэмминга  $7 \times 7$  символов, основанный на классификации образов ошибок. Декодер отличается от известных двухэтапного и трехэтапного декодеров выбором последовательности операций исправления и стирания ошибок строк и столбцов декодируемой матрицы в зависимости от класса образов ошибок. Данные отличия позволили исправить все ошибки кратностью четыре и снизить вероятности битовых ошибок: для аналогового канала передачи с белым гауссовым шумом при изменении отношения сигнал – шум в диапазоне 1–3 дБ (при передаче закодированных данных в сенсорной сети *ZigBee* по стандарту *IEEE 802.15.4* на частоте 868 МГц со скоростью 20 кбит/с с помощью *BPSK*-модулированных сигналов в полосе частот 600 кГц) до 6,1 раза по сравнению с двухэтапным декодером и до 3,0 раза по сравнению с трехэтапным декодером; для цифрового симметричного канала при изменении вероятности битовой ошибки передачи в диапазоне 0,01–0,03 до 3,3 раза по сравнению с двухэтапным декодером и до 2,0 раза по сравнению с трехэтапным декодером. Предложенный декодер позволяет снизить вероятность ошибки на выходе по сравнению с двухэтапным и трехэтапным декодерами примерно в 7 и 2 раза при кратности ошибок шесть. Повышение корректирующей способности предложенного декодера достигается за счет более высокой временной сложности по сравнению с двухэтапным и трехэтапным декодерами в 2,4 и 1,6 раза в двухэтапном режиме и в 3,3 и 2,2 раза в трехэтапном режиме. Пространственная сложность предложенного декодера в двухэтапном режиме увеличивается в 1,5 раза по сравнению с двухэтапным декодером и уменьшается в 1,2 раза по сравнению с трехэтапным декодером; в трехэтапном режиме увеличивается по сравнению с двухэтапным и трехэтапным декодерами в 2,4 и 1,4 раза соответственно [1–А; 2–А; 6–А].



2. Разработан семиклассовый синдромный декодер итеративного расширенного кода Хэмминга  $8 \times 8$  символов, основанный на классификации образов ошибок. Декодер отличается от известных двухэтапного, четырехэтапного и двухрежимного двух- пятиэтапного декодеров выбором последовательности операций транспонирования, исправления и стирания ошибок строк и столбцов декодируемой матрицы в зависимости от класса образов ошибок. Данные отличия позволили исправить все ошибки кратностью семь и повысить корректирующую способность при ошибках большей кратности. Разработанный декодер позволяет снизить вероятности битовых ошибок: для аналогового канала передачи с белым гауссовым шумом при изменении отношения сигнал – шум в диапазоне 1–3 дБ (при передаче закодированных данных в сенсорной сети *ZigBee* по стандарту *IEEE* 802.15.4 на частоте 915 МГц со скоростью 40 кбит/с с помощью *BPSK*-модулированных сигналов в полосе частот 1,2 МГц) до 1,6 раза по сравнению с двухэтапным декодером, до 4,9 раза по сравнению с четырехэтапным декодером, до 1,1 раза по сравнению с двухрежимным двух- пятиэтапным декодером; для цифрового симметричного канала при изменении вероятности битовой ошибки передачи в диапазоне 0,01–0,05 до 90,0 раза по сравнению с двухэтапным декодером, до 5,0 раза по сравнению с четырехэтапным декодером, до 60,0 раз по сравнению с двухрежимным двух- пятиэтапным декодером. Разработанный декодер снижает вероятность ошибки на выходе по сравнению с двухэтапным, четырехэтапным и двухрежимным двух- пятиэтапным декодерами примерно в 20, 4 и 36 раз при кратности ошибок девять. Повышение корректирующей способности в разработанном декодере достигается за счет более высокой временной сложности по сравнению с двухэтапным, четырехэтапным и двухрежимным двух- пятиэтапным декодерами соответственно в 2,0, 1,1 и 2,0 раза в трехэтапном режиме; в 2,7, 1,5 и 2,7 раза в четырехэтапном режиме; в 3,0, 1,7 и 1,3 раза в пятиэтапном режиме; в 2,8, 1,5 и 1,2 раза в шестиэтапном режиме. Разработанный декодер имеет более высокую пространственную сложность по сравнению с двухэтапным, четырехэтапным и двухрежимным двух- пятиэтапным декодерами соответственно в 2,3, 1,3 и 2,3 раза в трехэтапном режиме; в 3,1, 1,8 и 3,1 раза в четырехэтапном режиме; в 3,3, 1,9 и 1,5 раза в пятиэтапном режиме; в 3,4, 2,0 и 1,5 раза в шестиэтапном режиме [3–А; 7–А].

3. Разработан итеративный формирователь классов образов ошибок, основанный на итеративном увеличении кратности и размеров базовых образов и исключении диагонально-симметричных образов. Формирователь отличается от известных рангового и позиционного формирователей расширением множества классов образов ошибок путем увеличения на единицу размеров существующих базовых образов и исключением производных образов, которые могут быть получены в результате перестановки строк, столбцов и транспонирования базовых образов. Это позволило повысить компактность классов образов ошибок, сократить количество базовых образов в библиотеке на 33–44 % в зависимости от кратности ошибок и пропорционально уменьшить вычислительную сложность идентификации образов ошибок при декодировании сложных итеративных

кодов. При кратности ошибки семь предложенный формирователь обеспечивает по сравнению с ранговым и позиционным формирователями уменьшение пространственной сложности формирования библиотеки базовых образов ошибок в 27 773 и 3968 раз. Временная сложность итеративного формирователя классов образов ошибок по сравнению с ранговым и позиционным формирователями соизмерима при кратности ошибок до четырех, уменьшается в 5 раз при кратности ошибок пять и прогрессивно уменьшается на порядки при ошибках большей кратности [4–А; 5–А; 8–А – 15–А; 18–А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Существенное повышение корректирующей способности при незначительном росте вычислительной сложности делает предложенные декодеры итеративных кодов Хэмминга более эффективными по сравнению с известными декодерами для применения в беспроводных сенсорных сетях с высокой вероятностью ошибок и ограничениями на вычислительные ресурсы, связанными с жесткими требованиями по снижению энергопотребления. В каналах передачи данных с зависимыми пакетными ошибками и высокой вероятностью ошибок рекомендуется использовать итеративный расширенный код Хэмминга и семиклассовый синдромный декодер. В каналах передачи данных с независимыми ошибками и низкой вероятностью ошибок рекомендуется использовать итеративный классический код Хэмминга и трехклассовый синдромный декодер. При реализации на ПЛИС разработанных декодеров необходимо учитывать, что для декодера итеративного расширенного кода Хэмминга требуется примерно в 2 раза больше регистров и почти в 3 раза больше логических модулей по сравнению с декодером итеративного классического кода Хэмминга [16–А; 17–А].

Разработанная библиотека базовых образов ошибок может эффективно использоваться для оценки корректирующей способности декодеров итеративных кодов, используемых при больших размерах кодовых матриц и высокой кратности ошибок в высокоскоростных радио и оптических системах передачи данных. Использование базовых образов ошибок из библиотеки по сравнению с полным перебором всех возможных вариантов распределений ошибок позволяет существенно снизить временные затраты на проверку возможности исправления ошибок в кодовых словах. При количестве ошибок до четырех включительно число тестовых кодовых слов, используемых для проверки корректирующей способности, уменьшается в 13 619 раз для итеративного классического кода Хэмминга и в 41 440 835 раз для итеративного расширенного кода Хэмминга. Выигрыш растет с увеличением количества ошибок, что позволяет проводить оценку корректирующей способности декодеров при относительно большем количестве ошибок.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Жэнь, С. Х. Адаптивное декодирование двумерного кода Хэмминга на основе анализа распределения ошибок в декодируемой матрице / С. Х. Жэнь, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // Проблемы инфокоммуникаций. – 2022, № 2 (16). – С. 5–12.

2–А. Ren, X. H. A New Hard-decision Iterative Decoding Method for Hamming Product Codes / X. H. Ren, J. Ma, V. Yu. Tsviatkou, V. K. Kanapelka // Engineering Letters. – 2022. – Vol. 30, iss. 3. – P. 948–954.

3–А. Ren, X. H. Improved Hard-Decision Iterative Decoding Method for 2D SEC-DED Codes / X. H. Ren, J. Ma, V. Yu. Tsviatkou, V. K. Kanapelka // Engineering Letters. – 2023. – Vol. 31, iss. 1. – P. 364–372.

4–А. Ren, X. H. An Iterative Formation Method of Error Patterns Library Used in Product Codes Decoding Based on Syndrome-Normal / X. H. Ren, V. Yu. Tsviatkou, V. K. Kanapelka // Intern. J. of Advanced Res. in Computer and Communication Engineering (IJARCCE). – 2021. – Vol. 10, iss. 8. – P. 171–176.

5–А. Жэнь, С. Х. Итерационное формирование образов ошибок для синдромно-норменного декодирования итеративных кодов / С. Х. Жэнь, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // Докл. БГУИР. – 2022. – № 1 (20). – С. 5–13.

### Статьи в сборниках материалов научных конференций

6–А. Ren, X. H. An improved decoding method of hamming product codes / X. H. Ren // New Horizons – 2021 = Новые горизонты – 2021 : proc. of the VIII Belarus.-Chin. youth innovation forum, Minsk, Nov.11–12, 2021 / Belarus. Nat. Techn. Univ. – Minsk, 2021. – Vol. 1. – P. 156–158.

7–А. Ren, X. H. A hard decision iterative decoding method for 2D SEC-DED codes / X. H. Ren, V. K. Kanapelka, Y. M. Chen // Technologies of Information Transmission and Processing = Технологии передачи и обработки информации : proc. of the Intern. sci.-techn. seminar, Minsk, March – Apr. 2023 / Belarus. State Univ. of Informatics and Radioelectronics ; ed.: V. Yu. Tsviatkou [et al.]. – Minsk, 2023. – P. 15–21.

8–А. Ren, X. H. Interleaving based on linear block code / X. H. Ren, V. K. Kanapelka // Signal Coding and Digital Processing in Infocommunications = Кодирование и цифровая обработка сигналов в инфокоммуникациях : proc. of the Intern. conf., Minsk, Apr. 4, 2019 / Belarus. State Univ. of Informatics and Radioelectronics ; ed.: V. K. Kanapelka [et al.]. – Minsk, 2019. – P. 5–9.

9–А. Ren, X. H. An improved forming algorithm of error-patterns for two-dimensional codes / X. H. Ren, V. K. Kanapelka // Information Technologies and Systems 2019 (ITS-2019) = Информационные технологии и системы 2019

(ИТС 2019) : proc. of the Intern. conf., Minsk, Oct. 30, 2019 / Belarus. State Univ. of Informatics and Radioelectronics ; ed.: L. Yu. Shilin [et al.]. – Minsk, 2019. – P. 288–289.

10–А. Ren, X. H. Classification of point forms and establish a library for coding the skeleton of the binary images / X. H. Ren, V. K. Kanapelka // Telecommunications: Networks and Technologies, Algebraic Coding and Data Security = Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных : proc. of the Intern. sci.-techn. seminar, Minsk, Nov. – Dec., 2019 / Belarus. State Univ. of Informatics and Radioelectronics ; ed.: M. N. Bobov [et al.]. – Minsk, 2019. – P. 11–17.

11–А. Ren, X. H. A fast feature error pattern generating two-dimensional error patterns / X. H. Ren, V. K. Kanapelka // Signal Coding and Digital Processing in Infocommunications = Кодирование и цифровая обработка сигналов в инфокоммуникациях : proc. of the Intern. conf., Minsk, Apr. 24, 2020 / Belarus. State Univ. of Informatics and Radioelectronics ; ed.: V. K. Kanapelka [et al.]. – Minsk, 2020. – P. 12–14.

12–А. Жэнь, С. Х. Анализ и коррекция многократных ошибок при одномерном и двумерном помехоустойчивом кодировании информации / С. Х. Жэнь, В. К. Конопелько // BIG DATA и анализ высокого уровня : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 2 / редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 114–121.

13–А. Ren, X. H. An Iterative Error Patterns Library Formation Method for the Decoding of Product Codes / X. H. Ren, V. K. Kanapelka // Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2021) = Распознавание образов и обработка информации (2021) : proc. of the 15<sup>th</sup> Intern. conf., Sept. 21–24, 2021, Minsk, Belarus. United Inst. of Informatics Problems of the Nat. Acad. of Sciences of Belarus. – Minsk, 2021. – P. 202–205.

14–А. Ren, X. H. Method for generating two-dimensional dependent errors / X. H. Ren, V. K. Kanapelka, V. Yu. Tsviatkou // Signal Coding and Digital Processing in Infocommunications = Кодирование и цифровая обработка сигналов в инфокоммуникациях : proc. of the Intern. conf., Minsk, Apr. 19, 2021 / Belarus. State Univ. of Informatics and Radioelectronics ; ed.: V. K. Kanapelka [et al.]. – Minsk, 2021. – P. 44–46.

15–А. Формирование образов ошибок для декодирования итеративных кодов / С. Х. Жэнь [и др.] // Технологии передачи и обработки информации : материалы Междунар. науч.-техн. семинара, Минск, март – апр. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники / редкол.: В. Ю. Цветков [и др.]. – Минск, 2022. – С. 31–34.

16–А. Chen, Y. M. Different applications and implements of the Hamming product codes / Y. M. Chen, X. H. Ren // Technologies of Information Transmission and Processing = Технологии передачи и обработки информации : proc. of the Intern. sci.-techn. seminar, Minsk, March – Apr., 2022 / Belarus. State Univ. of Informatics and Radioelectronics / ed.: V. Yu. Tsviatkou [et al.]. – Minsk, 2022. – P. 82–84.

17–А. Chen, Y. M. System design overview of hamming product codes implementation on FPGA / Y. M. Chen, X. H. Ren // Technologies of Information Transmission and Processing = Технологии передачи и обработки информации : proc. of the Intern. sci.-techn. seminar, Minsk, March – Apr., 2023 / Belarus. State Univ. of Informatics and Radioelectronics / ed.: V. Yu. Tsviatkou [et al.]. – Minsk, 2023. – P. 84–88.

#### **Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций**

18–А. Жэнь, С. Х. Метод формирования следующих образов ошибок из предыдущего при двумерном кодирования информация / С. Х. Жэнь, Ц. Ма // Инфокоммуникации : тез. докл. 56-й Науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18–20 мая 2020 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2020. – С. 76–77.

任询寰

## РЭЗІЮМЭ

Жэнь Сюньхуань

### Дэкадаванне ітэратыўных перашкодаўстойлівых кодаў на аснове аналізу вобразаў памылак

**Ключавыя словы:** перашкодаўстойлівае кадаванне, ітэратыўныя коды, коды Хэммінга, дэкадаванне ітэратыўных кодаў, шматрэжымнае дэкадаванне, вобразы памылак, аналіз вобразаў памылак, класіфікацыя вобразаў памылак, бібліятэка базавых вобразаў памылак, ідэнтыфікацыя вобразаў памылак.

**Мэта працы:** павышэнне эфектыўнасці дэкадэраў ітэратыўных памехастойкіх кодаў для бесправадных сэнсарных сетак з нізкім энэргаспажываннем і высокай хуткасцю радыё- і аптычных сетак на аснове аналізу двумерных групавых памылак рознай кратнасці.

**Метады даследавання:** тэорыя кадавання.

**Выкарыстаная апаратура:** пакет *Matlab*, сістэма аўтаматызаванага праектавання *FPGA Xilinx*, мова праграмавання *Verilog*, адладкавы камплект *FPGA Xilinx XC3S50*.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** трохкласавы і сямікласавы сіндромныя дэкодэры ітэратыўных класічнага і пашыранага кодаў Хэммінга, заснаваныя на класіфікацыі вобразаў памылак, якія адрозніваюцца выбарам паслядоўнасці аперацый апрацоўкі радкоў і слупкоў дэкадуемай матрыцы (рэжыма дэкадавання) у залежнасці ад класа вобраза памылак, вызначанага на аснове сіндромаў, што забяспечыла гарантаванае выпраўленне памылак з кратнасцю да тэрэтычна ўсталяванай мяжы, зыходзячы з кодавай адлегласці, і дазволіла павысіць якая карэктне здольнасць пры памылках большай кратнасці; ітэратыўны фарміраватэль класаў вобразаў памылак, заснаваны на ітэратыўным павелічэнні кратнасці і памераў базавых вобразаў і выключэнні сіметрычных вобразаў, які адрозніваецца ад вядомых рангавога і пазіцыйнага фарміраватэлей аперацыямі пашырэння мноства класаў і праверкі дыяганальнай сіметрыі базавых вобразаў, што дазволіла павысіць эфектыўнасць дэкадавання складаных ітэратыўных кодаў за кошт кампактнасці класаў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** вынікі дысертацыі рэалізаваны ў выглядзе онлайн рэсурса на сайце ўстановы адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» і выкарыстаны ў лабараторным курсе па дысцыпліне «Асновы тэорыі кадавання» спецыяльнасці «Сістэмы і сеткі інфакамунікацый».

**Вобласць ужывання:** дэкодэры перашкодаўстойлівых кодаў для сістэм радыё-, валаконна-аптычнай сувязі і сэнсарных сетак.

## РЕЗЮМЕ

Жэнь Сюньхуань

### Декодирование итеративных помехоустойчивых кодов на основе анализа образов ошибок

**Ключевые слова:** помехоустойчивое кодирование, итеративные коды, коды Хэмминга, декодирование итеративных кодов, многорежимное декодирование, образы ошибок, анализ образов ошибок, классификация образов ошибок, библиотека базовых образов ошибок, идентификация образов ошибок.

**Цель работы:** повышение эффективности декодеров итеративных помехоустойчивых кодов для беспроводных сенсорных сетей с низким энергопотреблением и высокоскоростных радио- и оптических сетей на основе анализа двумерных групповых ошибок различной кратности.

**Методы исследования:** теория кодирования.

**Использованная аппаратура:** пакет *Matlab*, система автоматизированного проектирования *FPGA Xilinx*, язык программирования *Verilog*, отладочный комплект *FPGA Xilinx XC3S50*.

**Полученные результаты и их новизна:** трехклассовый и семиклассовый синдромные декодеры итеративных классического и расширенного кодов Хэмминга, основанные на классификации образов ошибок, отличающиеся выбором последовательности операций обработки строк и столбцов декодируемой матрицы (режима декодирования) в зависимости от класса образа ошибок, определяемого на основе синдромов, что обеспечило гарантированное исправление всех ошибок с кратностью до теоретически установленного предела, исходя из кодового расстояния, и позволило повысить корректирующую способность при ошибках большей кратности; итеративный формирователь классов образов ошибок, основанный на итеративном увеличении кратности и размеров базовых образов и исключении симметричных образов, отличающийся от известных рангового и позиционного формирователей операциями расширения множества классов и проверки диагональной симметрии базовых образов, что позволило повысить эффективность декодирования сложных итеративных кодов за счет компактности классов.

**Рекомендации по использованию:** результаты диссертации реализованы в виде онлайн-ресурса на сайте учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» и использованы в лабораторном курсе по дисциплине «Основы теории кодирования» специальности «Системы и сети инфокоммуникаций».

**Область применения:** декодеры помехоустойчивых кодов для систем радио-, волоконно-оптической связи и сенсорных сетей.

## SUMMARY

Ren Xunhuan

### **Decoding of Iterative Error-Correcting Codes Based on Error Pattern Analysis**

**Keywords:** Error-correcting coding, iterative codes, Hamming codes, iterative code decoding, multimode decoding, error patterns, error pattern analysis, error pattern classification, basic error pattern library, error pattern identification.

**Purpose of the work:** increasing the efficiency of decoders of iterative noise-resistant codes for wireless sensor networks with low power consumption and high-speed radio and optical networks based on the analysis of two-dimensional group errors of various multiplicities.

**Research methods:** Coding theory.

**Used equipment:** Matlab package, Xilinx FPGA design automation system, Verilog programming language, Xilinx XC3S50 FPGA development kit.

**The results obtained and their novelty:** three-class and seven-class syndrome decoders of iterative classical and extended Hamming codes, based on the classification of error patterns, distinguished by the choice of the sequence of operations for processing rows and columns of the decoded matrix (decoding mode) depending on the class of the error patterns, determined on the basis of syndromes, which ensured guaranteed correction of all errors with multiplicity up to a theoretically established limit, based on the code distance, and made it possible to increase the correcting ability for errors of higher multiplicity; an iterative generator of classes of error patterns, based on iteratively increasing the multiplicity and size of the base patterns and eliminating symmetrical patterns, differing from the known rank and positional generators by the operations of expanding the set of classes and checking the diagonal symmetry of the base patterns, which made it possible to increase the efficiency of decoding complex iterative codes due to compactness classes.

**Recommendations for use:** The results of the dissertation have been implemented as an online resource on the website of the educational institution «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» and have been used in the laboratory course for the discipline «Fundamentals of Coding Theory» for the specialty «Infocommunication Systems and Networks».

**Scope:** Error-correcting code decoders for radio, fiber-optic communication systems, and sensor networks.



*Научное издание*

**Жэнь  
Сюньхуань**

**ДЕКОДИРОВАНИЕ ИТЕРАТИВНЫХ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ  
КОДОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОБРАЗОВ ОШИБОК**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства  
телекоммуникаций**

Подписано в печать 14.11.2024. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Опечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч. -изд. л. 1,5. Тираж 60 экз. Заказ 184.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск.