

На правах рукописи



Ал Тамими Таква Флайих Хасан

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПЕРЕСТАНОВЧНОГО ДЕКОДЕРА НЕДВОИЧНОГО ИЗБЫТОЧНОГО
КОДА НА БАЗЕ КОГНИТИВНОЙ МЕТАФОРЫ**

Специальности

05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем
управления»

05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы
программ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2018

Работа выполнена на кафедре «Телекоммуникации» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель **Гладких Анатолий Афанасьевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты **Овечкин Геннадий Владимирович,** доктор
технических наук, доцент, профессор кафедры
«Прикладной математики» Рязанского
государственного радиотехнического университета

Капитанчук Василий Вячеславович, кандидат
технических наук, доцент кафедры «Информатики»
Ульяновского института гражданской авиации им.
Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, г.
Ульяновск

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический
университет».

Защита диссертации состоится « 13 » марта 2019 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32 (ауд. 211, Главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного технического университета.

Автореферат разослан « 11 » января 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



В.И. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Помехоустойчивое кодирование является неотъемлемой частью современных цифровых систем управления. При этом главной тенденцией многих важных систем управления является сокращение временных интервалов обмена данными. В этой связи поиск оптимальных в смысле минимизации временных и вычислительных ресурсов кодеков является неотъемлемой потребностью перспективных управляющих комплексов. Эта задача приобретает особый смысл в условиях согласования повышенных скоростей обмена информацией в каналах управления и недостаточно прогрессирующих по темпам ее обработки в декодерах приемников данных, особенно в условиях использования недвоичных помехоустойчивых кодов.

Актуальность темы исследования

Применение тех или иных методов кодирования способно в значительной степени повысить достоверность принимаемой информации и обеспечить энергетический выигрыш кода (ЭВК) в канале связи до 10 дБ, приблизившись вплотную к порогу Шеннона, например, при использовании турбокодов или кодов с малой плотностью проверок на четность. Недостатками таких мощных кодов являются большая избыточность, вносимая в передаваемое сообщение, применение итеративных преобразований, что приводит к существенному увеличению цикла управления на этапе обработки данных, что совершенно недопустимо в условиях реализации современных систем управления для защиты команд управления от влияния деструктивных факторов.

Жесткость требований к надежности работы и достоверности получаемой и обрабатываемой информации в управляющих системах кратно возрастает для систем реального времени, от которых требуется еще и повышенная готовность к выполнению программ их действия, что особенно важно для различных категорий автономных транспортных средств. Именно в таких системах наиболее востребованы новые методы синтеза элементов технического зрения, систем связи и навигации, защиты цифровых данных от влияния мешающих факторов, гибкие методы обработки оперативной информации и внедрения передовых технологий, связанных с реализацией когнитивных искусственных систем и перспективным применением нейросетевых технологий обработки многочисленных данных.

Внедрение сетевых технологий в процессы управления мобильными объектами предъявляет повышенные требования к характеристикам используемых каналов радиосвязи. Процедура управления мобильными объектами реального времени требует не только достижения требуемого уровня энергетической эффективности таких каналов связи, но и повышения их спектральной эффективности. Это вызывает необходимость использования в таких системах управления сложных видов модуляции в сочетании с недвоичными помехоустойчивыми кодами, специфика обработки которых в системах управления может занимать значительные интервалы времени.

В связи с этим актуальность темы диссертационной работы обусловлена наличием следующих нерешенных задач:

- отсутствием разработанных и научно обоснованных подходов к организации алгоритмов систем управления на базе сокращенных циклов декодирования недвоичных помехоустойчивых кодов;
- отсутствием методов применения когнитивных принципов в искусственных технических системах и, в частности, в системах обмена данными на уровне обработки помехоустойчивых кодов;
- отсутствием моделей когнитивной адаптации в системе формирования мягких решений недвоичных символов;
- отсутствием схемных решений по управлению алгоритмами работы перестановочных декодеров в условиях реализации когнитивной метафоры.

Степень разработанности темы

Концептуальные принципы развития цифровых систем связи заложены в основополагающих работах В.А. Котельникова, К.Е. Шеннона, Р.М. Фано и П. Элайеса. Значительный вклад в разработку теории повышения спектральной и энергетической эффективности систем обмена данными внесли такие зарубежные авторы, как E.R. Berlekamp, R.C. Bose, R.W. Hamming, R.E. Blahut, J. Massey, I.S. Reed, G. Solomon, M. Sudan, G.D. Forney, R.G. Gallager, A.J. Viterbi, а также ряд отечественных ученых: В.И. Коржик, Э.Л. Блох, В.В. Зяблов, К.Ш. Зигангиров, В.В. Золотарев, Г.В. Овечкин, Л.Е. Варакин, в работах которых раскрываются теоретические основы построения различных классов избыточных кодов.

Определяющую роль в разработке теории перестановочного декодирования систематических групповых кодов внесли J.F. MacWilliams и W.W. Peterson, R. Morelos-Zaragoza, B. Sklar. Вместе с этим применение помехоустойчивых кодов в системах с когнитивной адаптацией в указанных работах даже не рассматривается.

Цели и задачи исследования

Целью работы явилось сокращение цикла управления перестановочным декодером путем применения процедуры быстрых матричных преобразований в системе когнитивной обработки данных при одновременном снижении объема памяти когнитивной карты декодера.

Для достижения указанной цели требуется решить следующие задачи:

1. Осуществить анализ известных методов построения декодеров избыточных кодов в системе информационно-управляющих комплексов (в том числе реального времени) и выявить их достоинства и недостатки.

2. Разработать систему выработки мягких решений недвоичных символов избыточных кодов и на основе испытаний имитационных моделей и применения численных методов получить вероятностные характеристики системы выработки таких решений.

3. Обосновать корректность системы рационального формирования когнитивной карты декодера подмножеством эталонных матриц эквивалентных

кодов и доказать возможность получения из него полного множества матриц таких кодов за счет быстрых матричных преобразований.

4. Оценить возможность снижения цикла работы декодеров недвоичных кодов с использованием процедуры когнитивной обработки данных в системе их перестановочного декодирования.

5. Разработать рекомендации по снижению объема памяти когнитивной карты декодера при использовании циклических свойств нумераторов перестановок символов кодовых векторов.

Объект исследования

Теоретический анализ, моделирование и синтез элементов систем управления и устройств вычислительной техники.

Предмет исследования

Алгоритмы управления мягкой обработкой недвоичных помехоустойчивых кодов с целью улучшения эксплуатационных характеристик декодера избыточного кода.

Соответствие рассматриваемой специальности

Содержание диссертационной работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»:

– п.п. 1 – разработка научных основ создания и исследования общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и устройств вычислительной техники и систем управления;

– п.п. 3 – разработка принципиально новых методов анализа и синтеза элементов и устройств вычислительной техники и систем управления с целью улучшения их технических характеристик;

а также пунктам паспорта специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:

– п.п. 3 – разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий;

– п.п. 8 – разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

Научная новизна

1. Впервые применен метод когнитивной обработки данных для управления процедурой перестановочного декодирования путем хранения в когнитивной карте декодера результатов поиска порождающих матриц эквивалентных кодов, полученных на предыдущих этапах его работы.

2. Доказана эффективность системы управления декодером на основе введенных быстрых матричных преобразований порождающих матриц эквивалентных кодов с использованием их эталонных аналогов, позволившая на два – четыре порядка и более (в зависимости от параметров кода) снизить объем требуемых матричных вычислений.

3. Предложена принципиально новая методика сокращения общего объема памяти когнитивной карты декодера (от 80% до 90%) за счет использования циклических свойств нумераторов перестановок.

4. Предложена новая структура декодера с элементами лексикографического поиска вектора ошибок, отличающаяся новизной технического решения (патент РФ № 2619533, опубликован 16 мая 2017 г.).

Практическая ценность работы

Предложенные алгоритмы когнитивного декодирования недвоичных кодов оптимальны в смысле минимизации арифметических действий, выполняемых в двоичных полях Галуа заданной степени расширения на кристалле ПЛИС, за счет замены матричных вычислений на тривиальные перестановки строк и столбцов заранее вычисленных эквивалентных матриц в процедуре их обращения в порождающие матрицы систематических блочных кодов, в частности, кодов Рида-Соломона.

Методы исследования

Для решения поставленных задач и достижения намеченной цели использованы методы системного анализа, математического моделирования, теории вероятностей, методы математической статистики, теории информационных систем, численные методы, а также методы программирования. Математическое моделирование производилось с использованием пакетов прикладных программ MATCAD, MATLAB и Simulink.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Модель перестановочного декодера избыточного кода, использующая результаты преобразований порождающих матриц эквивалентных кодов, хранимых в памяти когнитивной карты декодера и применяемых в случаях повтора перестановок нумераторов символов принятой кодовой комбинации.

2. Схема формирования мягких решений недвоичных символов в формате коэффициента правдоподобия.

3. Система порождающих матриц эквивалентных кодов в недвоичных полях Галуа, использующая перестановки элементов эталонных матриц без выполнения арифметических операций.

4. Метод снижения объема памяти когнитивной карты декодера, использующий циклические свойства нумераторов перестановок и позволяющий кратно сократить объем памяти когнитивной карты декодера.

5. Программно-аппаратная реализация элемента перестановочного декодера по вычислению порождающих матриц эквивалентных кодов с использованием быстрых матричных преобразований.

Обоснованность и достоверность результатов работы

Результаты исследований получены на основе строгих радиофизических и математических моделей. Использованные при этом методы решения поставленных задач корректны с формальной математической точки зрения. Контроль достоверности результатов осуществлялся анализом физического смысла решений, имитационным моделированием и натурным экспериментом.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на Всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ) «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем», – Ульяновск: УлГТУ, 2015 г.; на 71-й Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (REDS–2016)», посвящённая Дню радио, – Москва, 2016 г.; в сборнике научных трудов «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем», – Ульяновск: УлГТУ, 2016 г.; в докладе на 20-й Международной конференции РНТОРЭС имени А.С. Попова «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2018», – Москва, 2018 г.

Реализация результатов работы

Материалы диссертации использовались в ходе совершенствования учебного процесса при изучении учебной дисциплины «Теория кодирования и защиты информации» при подготовке студентов бакалавриата по направлению 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» на кафедре «Телекоммуникации» УлГТУ.

Публикации по работе

По материалам диссертации опубликовано 9 работ, из них 4 статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК, а также один патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора

Автору работы принадлежат разработка и программно-аппаратная реализация алгоритма поиска порождающих матриц недвоичных эквивалентных кодов в системе перестановочного декодирования путем линейных преобразований известных декодеру эталонных матриц. В совместных работах автор проводила рассуждения по обоснованию актуальности темы исследования и выработке концептуальных направлений совершенствования аппаратных решений в процедуре поиска эквивалентных кодов, выполняла вывод аналитических соотношений, проведение расчетов, составление математических моделей и проведение испытаний имитационных моделей, обобщение и интерпретацию результатов таких испытаний.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений, содержит 126 страниц машинописного текста, в том числе 33 иллюстраций и 11 таблиц. Список литературы включает в себя 117 наименований. В приложениях к диссертации представлены листинг имитационной модели предложенного декодера, листинги аппаратной реализации модулей, входящих в состав декодера, а также акт внедрения результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность исследований, связанных с перестановочным декодированием недвоичных избыточных кодов, подчеркивается необходимость применения такого метода обработки данных в современных системах управления для защиты команд управления от воздействия мешающих факторов и обеспечения высокой эффективности таких систем в отношении энергетической и спектральной составляющей используемых каналов связи.

В первой главе подчеркивается, что в связи с активным развитием современных роботизированных и интеллектуальных устройств (вплоть до развития систем искусственного интеллекта) возникает задача надежного функционирования элементов и устройств вычислительной техники, составляющих основу подобных систем. Цифровые устройства обработки различных видов информации применяются в сложных системах телеуправления, включая специфические системы связи и радиолокации, системах навигации и цифровой обработки и хранения данных.

Увеличение числа и объемов задач, выполняемых подобными системами, придание им свойств многофункциональности приводят к объективному их усложнению, уменьшению надежности функционирования и снижению достоверности получаемой информации. При этом усложнение методов обработки цифровых данных носит опережающий характер относительно процедуры разработки средств и методов повышения надежности. В этой связи задача реализации высокой надежности сложных систем является актуальной.

Особенно жесткие требования к надежности работы и достоверности обрабатываемых данных предъявляются к управляющим системам, работающим в реальном масштабе времени, от которых дополнительно требуется еще и повышенная готовность к выполнению задач управления. Обобщенная структурная схема системы управления (СУ) известна. Классический ее вариант содержит управляющую систему (УС), наделенную управляющей целевой функцией (УЦФ) $Q(\bullet)$, у которой символ $(\bullet)$ характеризует конечный набор аргументов УЦФ; управляемый элемент (УЭ), предназначенный для реализации конкретных значений из состава $(\bullet)$; каналы прямой и обратной связи для связи УС и УЭ для оценки степени выполнения УЭ требуемых значений $Q(\bullet)$ и выработки дополнительных сигналов коррекции в случае расхождения этих значений. Подчеркивается, что наличие в системе управления каналов прямой и обратной связи может быть использовано не только для передачи команд управления, но и для обмена оперативной информацией. Такое комплексное использование системы связи оправдано для различных автономных устройств, для которых важны не только массогабаритные размеры, но и рациональное использование потенциального ресурса энергетической установки.

Отсутствие каналов прямой и обратной связи образует моносистему, в которой все процессы, связанные с выполнением функции $Q(\bullet)$, организуются

в рамках одного устройства (микросхемы, платы, процессора), т.е. внутрисхемно. Наличие указанных каналов в телеметрических и дистанционных системах управления обязательно. С учетом этого системы проверки работоспособности и диагностики отказов систем управления можно классифицировать как внутрисхемные и разнесенные. Обычно работоспособность внутрисхемных устройств обеспечивается системой арифметических кодов. При использовании каналов управления в формате системы связи сохраняется целесообразность применения помехоустойчивых кодов, характеристики и свойства которых достаточно хорошо изучены применительно к телекоммуникационным технологиям. Применение подобных технологий для организации циклов управления контрпродуктивно.

Основным методом решения проблемы высокой надежности, достоверности и коэффициента готовности является использование структурной (аппаратной) и информационной (сигнальной) избыточности. В большинстве случаев работы по исследованию структурной избыточности относятся к математической оценке надежности различных моделей резервирования безотносительно к их структуре, а работы по информационной избыточности развивались главным образом применительно к теории кодов для каналов связи.

Структурно избыточные СУ подразумевают резервирование важных элементов и их схемное построение. В этом случае под системой понимается любое устройство, состоящее из частей (элементов), надежность которых задана. Структура СУ и характер ее работы должны быть известны настолько, чтобы для любого элемента было определено, вызывает ли отказ такого элемента отказ всей СУ. В простейшем случае предполагается, что элементы отказывают независимо друг от друга.

Учитывая перспективы развития систем мягкого декодирования помехоустойчивых кодов и особенности применения в СУ коротких избыточных кодов, дается классификация методов формирования мягких решений символов. Доказывается, что на длине кодовой комбинации целесообразно формировать максимальное число стертых позиций. Это положение соответствует идеологии перестановочного декодирования, поскольку семантической моделью такого декодирования предполагается сортировка наиболее надежных символов в группу, которая в последующем принимается за систему информационных разрядов эквивалентных кодов.

Замечательным свойством перестановочного декодирования является возможность предварительного вычисления всех возможных перестановок символов кодовых векторов и организации некоторого подобия кодовой книги, в которой связываются конкретные перестановки и соответствующие им эквивалентные коды. Это открывает возможности организации когнитивной процедуры обучения декодера выявлению таких связей и заполнения кодовой книги по мере появления тех или иных перестановок.

Рассматривается принцип формирования искусственных когнитивных систем (КС) (небиологических систем), к которым принято относить

технические структуры, предназначенные для выполнения одной или некоторого комплекса задач, отвечающих группе взаимоувязанных функций в виде целевого функционала, функций регулирования и адаптации, функций когнитивного моделирования. Делаются выводы по главе, ставятся задачи на исследование.

Во второй главе разрабатывается модель когнитивного функционирования технической системы, в основе которой лежит процедура обучения, предполагающая, что различные факторы внешней среды и сопутствующие им признаки развиваются в результате реакции сенсоров системы (сенсорной плоскости) на внешние условия. В общем случае происходит последовательная обработка сенсорной информации с последующим ее перекомпилированием и закреплением «удачных» гипотез и удалением «неудачных» вариантов таковых по частоте их успешного применения.

Анализ современных методов построения устройств помехоустойчивого кодирования показывает, что подавляющее большинство из них принципиально создаются под те или иные системы связи, в которых предварительно и достаточно полно изучена статистика потока ошибок как элемента внешнего обучения. Такие устройства не приспособлены к реализации функций обучения. Однако, при использовании весьма эффективных алгоритмов ПД такая возможность появляется, поскольку для кортежа данных можно указать конечное множество вариантов перестановок символов комбинаций, найти и сохранить для них готовые решения, которые можно хранить в памяти декодера и не вычислять их заново при повторях конкретных перестановок.

Важными составляющими ПД являются вычисление и отбор мягких решений символов (МРС), которые лежат в основе процедуры сортировки символов принятой комбинации и организации их последующих перестановок и поэтому должны адекватно соответствовать текущему состоянию используемого канала связи. Применение сложных видов модуляции ставит вопрос об использовании алгоритмов ПД недвоичных избыточных кодов.

Показано, что из известных источников не всегда ясно, каким образом применить когнитивные процедуры к поиску наиболее вероятных векторов переставленных недвоичных кодов, как, используя свойства переставленных матриц, сократить объем хранимых данных, полученных в результате обучения декодера. Структура алгоритмов ПД позволяет в полной мере реализовать введенную в код избыточность и эффективно применить когнитивную функцию обучения декодера по распознаванию образа той или иной перестановки с использованием таких данных для быстрого извлечения из памяти декодера соответствующей этому образу порождающей матрицы эквивалентного кода.

В ходе канальной обработки защищенных избыточным кодом данных в режиме реального времени используются мягкие методы их обработки, которые достаточно хорошо разработаны для двоичных кодов. Однако, обработка недвоичных символов и вычисление для них надежных значений

МРС остаются актуальными задачами. Особенностью ПД является необходимость преобразования порождающей матрицы G основного избыточного кода к переставленной матрице эквивалентного кода $G_{\text{пер}}$. Это преобразование выполняется в соответствии со структурой перестановочной матрицы P . Матрица P формируется на основе сортировки МРС по убыванию их абсолютных значений. Удобной формой представления МРС является их целочисленное выражение, которое по энергетической эффективности кода (ЭВК) незначительно (всего 0,2 дБ) уступает действительным оценкам ЭВК, но способствует повышению скорости вычислительного процесса. Аналитическое выражение для вычисления целочисленных МРС при использовании двоичных видов модуляции имеет вид

$$\lambda_i(z) = \left\lfloor \frac{\lambda_{\max}}{\rho M_z} \times z \right\rfloor, \quad (1)$$

где $\lambda_{\max}$ – максимальное значение МРС, принятое для данной системы, $M_z = \pm \sqrt{E_b}$ – математическое ожидание значений принимаемых сигналов, где E_b – энергия сигнала на бит, ρ – интервал стирания (обычно $0 \leq \rho < 1$), а z – значение принятого сигнала, учитывающее влияние мешающих факторов. Оценку надежности недвоичного символа в поле $GF(2^n)$ удобно осуществлять по совокупности λ_i , где $i = \overline{1, n}$, в формате коэффициента правдоподобия

$$K_{np} = \sum_{i=1}^n \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_{\max},$$

при этом $0 \leq K_{np} \leq 1$. Частота F появления различных оценок для параметра K_{np} при использовании различных степеней расширения двоичного поля n представлена на рисунках 1 – 4.

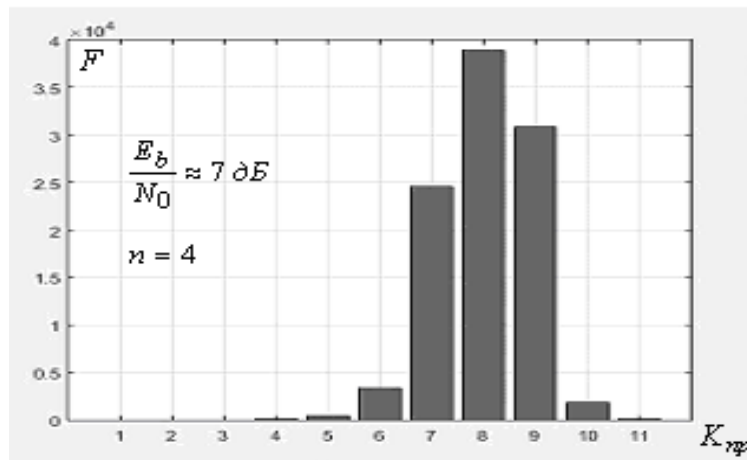


Рисунок 1 – Частота значений K_{np} по результатам имитационного моделирования в поле Галуа $GF(2^4)$ при высоком отношении сигнал-шум

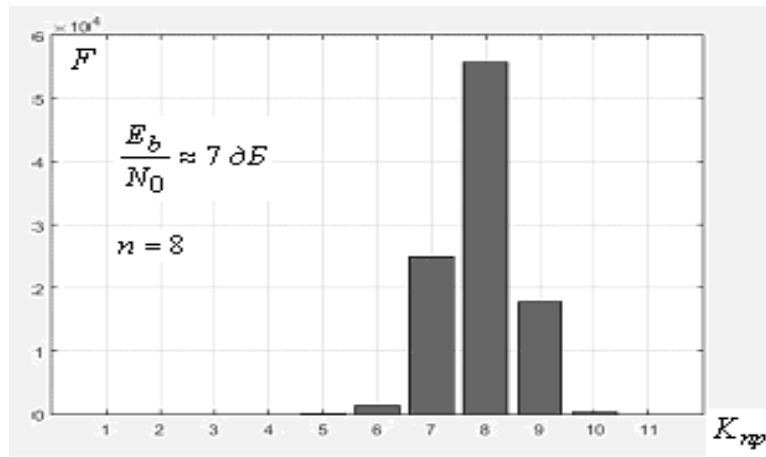


Рисунок 2 – Частота значений K_{np} по результатам имитационного моделирования в поле Галуа $GF(2^8)$ при высоком отношении сигнал-шум

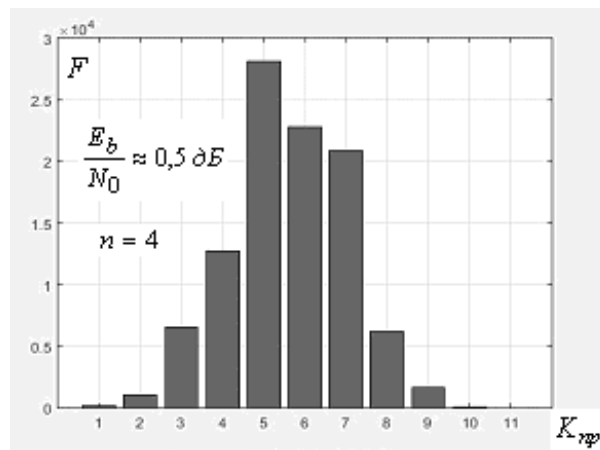


Рисунок 3 – Частота значений K_{np} при низком отношении сигнал-шум в поле Галуа $GF(2^4)$

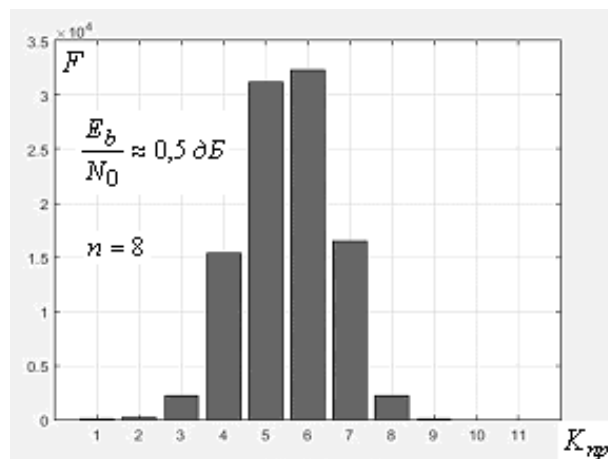


Рисунок 4 – Частота значений K_{np} при низком отношении сигнал-шум в поле Галуа $GF(2^8)$

Сравнение результатов имитационного моделирования для высоких показателей отношения сигнал-шум показывает, что значение максимальной

частоты значения K_{np} для различных длин символов двоичного кода остается постоянным, изменяется лишь в незначительных пределах дисперсия.

Анализ результатов имитационного моделирования канала с независимым потоком ошибок для различных отношений сигнал-шум в формате E_b/N_0 показал, что частота F значений параметра K_{np} для различных оценок во многом зависит от показателя E_b/N_0 и не является монотонной, что вызывает трудности при определении лучших оценок. Это приводит к целесообразности применения когнитивной процедуры определения коэффициента правдоподобия по известным декодеру гистограммам, характерным для различных значений отношений сигнал-шум.

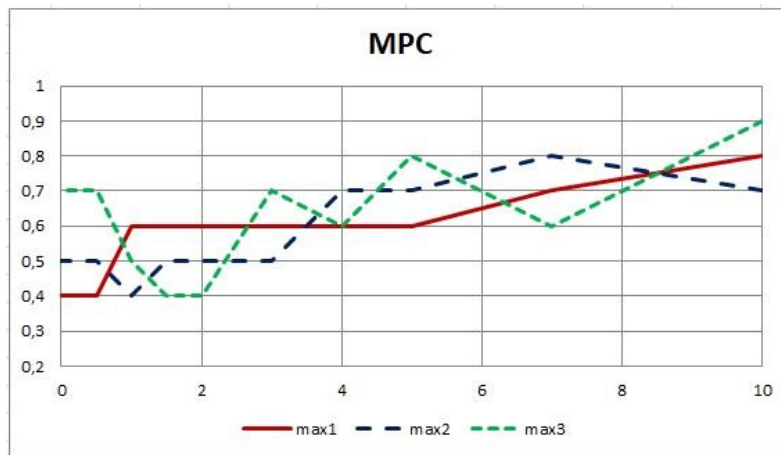


Рисунок 5 – Частота значений K_{np} при различных отношениях сигнал-шум ($M=4$)

Задачами когнитивного уровня первого этапа обработки данных являются сбор и пополнение статистики изменения параметра K_{np} для конкретных каналов связи в целях гибкого формирования наилучших оценок системы ПД.

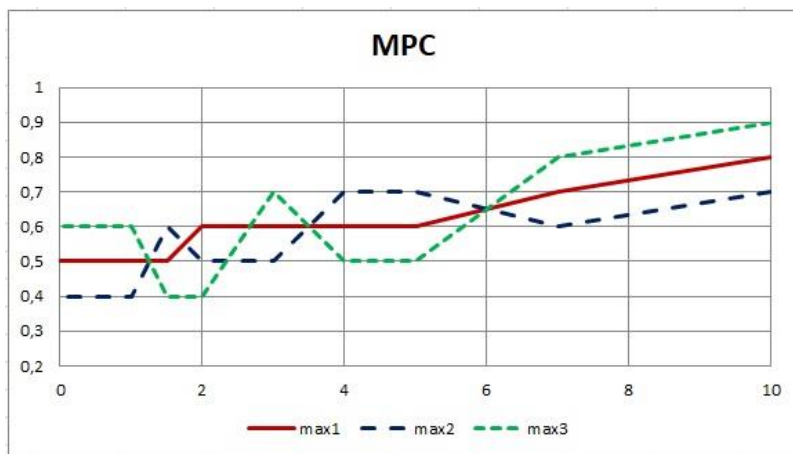


Рисунок 6 – Частота значений K_{np} при различных отношениях сигнал-шум ($M=8$)

На рисунках 5 и 6 приведен разброс оценок второго и третьего плана относительно оценок K_{np} , имеющих максимальное значение. При этом с изменением отношения сигнал-шум оценки второго и третьего плана часто меняются местами по частоте проявления и не могут служить ориентиром для когнитивного моделирования системы управления. Целесообразно использовать только максимальные значения параметра K_{np} . Для объективной оценки полученных результатов для параметра K_{np} рассматриваются имитационные модели модуляции построения систем, учитывающих наиболее вероятные комбинации взаимодействия передатчиков и приемников в условиях деструктивных факторов, характерных для каналов управления. Показано, что кроме двоичных видов модуляции использование сложных видов преобразования сигналов ограничивается в основном системами с QPSK. На основе этого предложены модели стирающего канала связи, позволяющие не только повысить эффективность кодовых методов защиты данных, но и выработать λ_i ($i=\overline{0,7}$) на длине вектора n_1 двоичного кода без знания статистических характеристик непрерывного канала связи. На этой основе разрабатываются имитационные модели выработки МРС в системах с двоичными видами модуляции, которые используются в численных процедурах формирования оценок надежности недвоичных кодов (НДК), используемых в составе каскадных конструкций (КК). В работе были изучены три различных подхода к формированию подобных оценок.

Во-первых, оценивалась эффективность процедуры с целевой функцией вида

$$Q\{F; M(\lambda); \sigma^2(\lambda)\} \Rightarrow \text{sign}(F) \max \min, F \rightarrow (pc) |M(\lambda)| \sigma^2(\lambda), \quad (2)$$

где F – выполнение четности для символов внутреннего кода КК; параметр $|M(\lambda)|$ – среднее значение кортежа мягких решений для символов внутреннего кода; $\sigma^2(\lambda)$ – показатель разброса МРС внутреннего кода, вычисляемого по правилу для оценки выборочной дисперсии. Итоги испытаний модели приведены на рисунке 7.

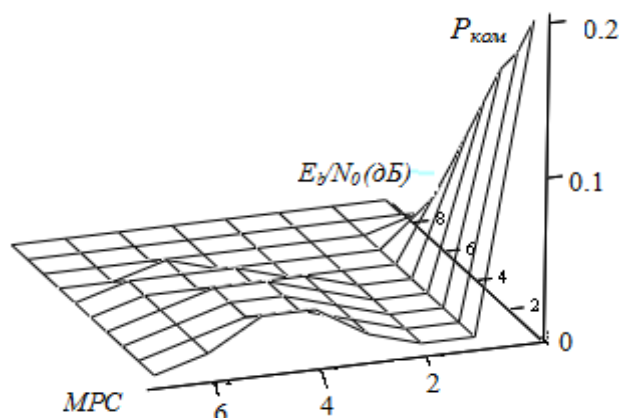


Рисунок 7 – Оценка ошибочной регистрации недвоичных символов

Испытания имитационной модели каналов управления с КК на основе кода РС над полем $GF(2^4)$ проводились для отношений сигнал-шум, определяемых как E_b/N_0 , в диапазоне значений от 0 дБ до 10 дБ. Выборка в 10^6 недвоичных символов при испытании всех моделей обеспечивала требуемую статистическую погрешность полученных результатов. Установлено, что значения некоторых МРС при низких отношениях сигнал-шум хорошо коррелируют с ошибочными решениями. В явной форме это проявляется для параметров λ_4 и λ_5 . Поэтому подобные оценки (например, в процедуре Ченя) без дополнительных проверок следует применять с осторожностью. В работе исследовались два метода, которые применяются в процедуре распознавания образов.

Во-вторых, исследованию подвергался метод пересечения, который обеспечивает сортировку символов НДК по убыванию. За эталонную комбинацию $n_{1\text{этaл}}$ принималась комбинация, в которой все $\lambda_i = 7$. Выражение для процедуры оценки принятого вектора $n_{1\text{прин}}$ имеет вид

$$d_{\text{intersection}}(n_{1\text{этaл}}, n_{1\text{прин}}) = \sum_{j=1}^{n_1} \min(n_{1\text{этaл}}(j), n_{1\text{прин}}(j)) \quad (3)$$

В-третьих, исследовались особенности метрики Бхаттачария, широко используемой в системе формирования полярных кодов. Незначительным недостатком метода является соответствие ненадежных символов максимальной оценке и надежных символов минимальной оценке (сортировка по возрастанию). Аналитическое выражение процедуры имеет вид

$$d_{\text{Bhat}}(n_{1\text{эм}}, n_{1\text{нр}}) = \sqrt{1 - \frac{\sum_j \sqrt{n_{1\text{эм}}(j) \times n_{1\text{нр}}(j)}}{\sqrt{\sum_j n_{1\text{эм}}(j) \times \sum_j n_{1\text{нр}}(j)}}} \quad (4)$$

Результаты испытаний имитационных моделей для отношения сигнал-шум, равного 3 дБ, представлены на рисунках 8 и 9.

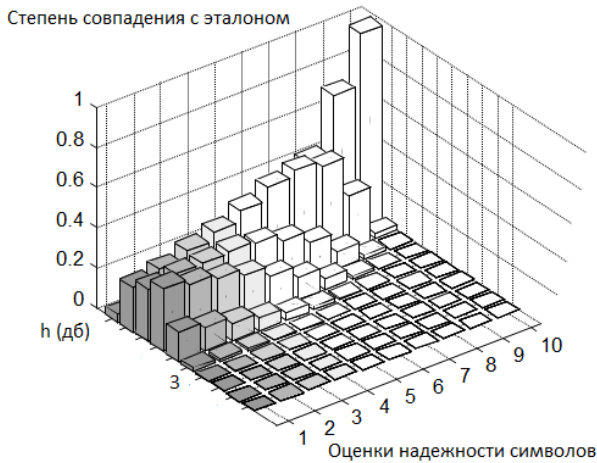


Рисунок 8 – Метод пересечения



Рисунок 9 – Метод Бхаттачария

Для практически значимых параметров отношения сигнал-шум заметна достаточно высокая контрастность оценок при использовании метрики Бхаттачария относительно метода пересечения. При снижении отношения сигнал-шум происходит перераспределение показателей количественных оценок, которое представлено на рисунках 10 и 11 (отношение сигнал-шум 0 дБ).

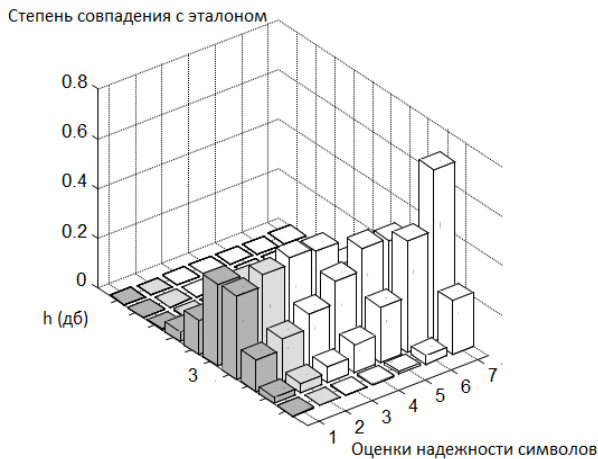


Рисунок 10 – Метод пересечения

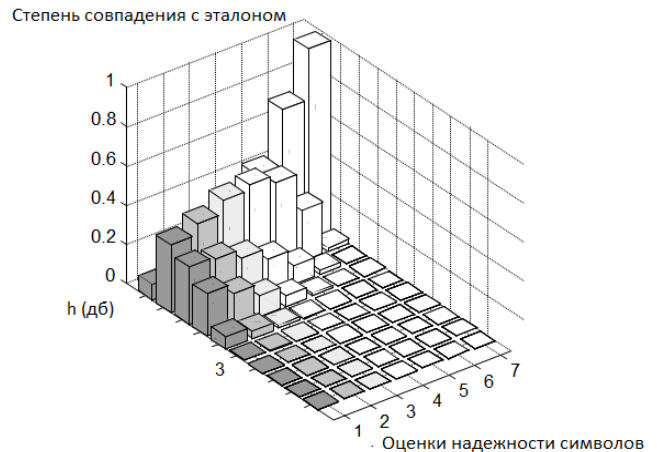


Рисунок 11 – Метод Бхаттачария

Преимущество метода Бхаттачария по контрастности оценок сохраняется, но численная оценка указанного параметра, как следует из выражения (4), требует значительных вычислительных затрат, что неприемлемо для многих систем управления.

В работе предпочтение отдается методу оценки параметра K_{np} .

В третьей главе дается теоретическое обоснование использования в системах управления аппарата эквивалентных кодов над двоичными полями, что обеспечивает результативное использование корректирующей способности избыточного кода за счет повышения кратности исправляемых кодом стираний. Это приводит к повышению энергетической эффективности системы связи, что важно для многих практических приложений, в том числе и для сенсорных сетей. Применение подобных сетевых технологий становится возможным только на пути снижения вычислительных затрат в процедуре формирования эквивалентных кодов. Вычислительная нагрузка может быть снижена только за счет отказа от системы матричных вычислений при переходе от основного кода к эквивалентному. Во-первых, необходимо исключить в таком процессе поиск определителя матрицы $Q_{k \times k}$, которая формируется случайным образом в зависимости от показателей мягких решений двоичных символов принятого вектора V_{np} по первым k столбцам переставленной матрицы G' . Во-вторых, минимизировать вычисления при переходе от матрицы G' к ее аналогу в систематической форме G'_s .

Первая задача решается за счет введения в память декодера всевозможных сочетаний номеров столбцов порождающей матрицы G исходного кода, для которых определители адекватных матриц $Q_{k \times k}$ либо не равны нулю, либо равны нулю. Таким образом, $\{Q_{k \times k}\} \equiv \{Q_{\Delta \neq 0}\} + \{Q_{\Delta = 0}\}$. Полное множество $\{Q_{k \times k}\}$ содержит $\binom{n}{k}$ вариантов. Показано, что подмножество $\{Q_{\Delta \neq 0}\}$ для различных групповых кодов составляет до 80% решений от полного множества $\{Q_{k \times k}\}$. Это говорит о целесообразности использования алгоритмов перестановочного декодирования для таких кодов в реальных системах связи.

Для решения второй задачи в работе доказывается ряд положений, сформулированных в виде теорем. Использование этих положений на практике обеспечивает получение системы быстрых матричных преобразований, позволяющей осуществить быстрый переход от матриц вида G' к матрицам вида G'_s .

Утверждение 1. Любая циклическая перестановка столбцов порождающей матрицы исходного кода G при оценке полученной матрицы $Q_{k \times k}$ приводит к $\Delta \neq 0$ и тождеству $G'_s \equiv G$.

Доказательство. Поскольку столбцы матрицы G линейно независимы, то любой их циклический сдвиг обеспечивает невырожденность матрицы $Q_{k \times k}$ и приведение переставленной матрицы G' в несистематической форме к матрице $G'_s \equiv G$.

Утверждение 2. Для невырожденной матрицы $Q_{k \times k}$ ее обратная матрица $Q_{k \times k}^{-1}$ указывает на систему линейных преобразований строк переставленной матрицы G' для получения ее аналога G'_s в систематической форме.

Доказательство. Поскольку $Q_{k \times k} \times Q_{k \times k}^{-1} = E$, то построчная структура матрицы $Q_{k \times k}^{-1}$ прямо указывает на действия со строками матрицы G' для получения G'_s . Действительно, матрица $Q_{k \times k}$ для матрицы G'_s – есть единичная матрица E .

Для обоснования процедуры быстрых матричных преобразований целесообразно ввести понятие представления матрицы G'_s в упорядоченной (канонической) форме. Для такого представления k номеров столбцов матрицы $Q_{k \times k}$, которые отвечают наиболее надежным символам вектора V_{np} , записываются в порядке возрастания. Например, $q_1 < q_2 < \dots < q_k$. Оставшиеся $(n - k)$ номеров также записываются в канонической форме по возрастанию так, что $h_{k+1} < h_{k+2} < \dots < h_n$. В матрице G'_s значениями q_i нумеруются строки, а значениями h_j нумеруются столбцы проверочной части этой матрицы. Номера q_i могут быть переставлены $k!$ различными способами. Аналогично номера h_j имеют $(n - k)!$ перестановок.

Утверждение 3. При любых перестановках номеров q_i и h_j матрица G'_s может быть получена путем перестановок занумерованных строк (столбцов) матрицы G'_s , представленной в канонической форме.

Доказательство. Для любой невырожденной матрицы G' с неупорядоченными номерами строк и столбцов q_i и h_j всегда можно указать матрицу $Q_{k \times k}^{-1}$, приводящую матрицу G' к виду G'_s , что эквивалентно перестановке строк и столбцов проверочной части матрицы G' .

Приведенные теоремы справедливы для недвоичных кодов, которые рассматриваются над двоичными полями некоторой степени расширения. В этом случае нет необходимости выполнять проверку вырожденности матрицы $Q_{k \times k}$, поскольку такие коды являются максимально декодируемыми.

Подобная процедура перестановки столбцов матрицы G на основе выбранных K_{np} не вызывает сложностей вычислительного характера, но последующий шаг перевода матрицы G_{nep} в систематическую форму более сложен, поскольку требует вычисления обратной матрицы, матрицы миноров и нахождения на этой основе обратной матрицы с последующим преобразованием вида $G_{nep} \Rightarrow G_{cuc}$. Проведение подобных вычислений для каждой принятой комбинации делает перестановочное декодирование совершенно непроизводительным при решении задач повышения достоверности данных в системах управления реального времени. Для кратного снижения сложности вычислительного процесса вида $G_{nep} \Rightarrow G_{cuc}$ предлагается создать систему эталонных матриц $G_{iэ}$, каждая из которых будет соответствовать i -му набору перестановок номеров надежных символов принятых кодовых векторов. Преобразование образца матрицы $G_{iэ}$ для любой другой перестановки из соответствующего набора номеров $G_{iэ}$ необходимо осуществлять методом быстрых матричных преобразований (БМП), общая суть которых раскрывается ниже.

Указанные преобразования носят линейный характер, но для двоичных блоковых кодов не все перестановки символов кодовых комбинаций приводят к эквивалентному коду. Такие коды не являются максимально декодируемыми, и поэтому часть перестановок не обеспечивает свойство невырожденности матриц G_{nep} . Это замечание не относится к системе недвоичных кодов. В любом случае при выделении из принятого вектора k надежных символов номера этих символов могут быть распределены как $k!$ перестановок. Оставшиеся $(n - k)$ номеров аналогично могут быть распределены как $(n - k)!$ перестановок. Всевозможные сочетания перестановок из $k!$ и перестановок из $(n - k)!$ представляют набор эквивалентных кодов для выделенной группы символов.

Общее количество таких групп в используемом коде будет составлять $\binom{n}{k}$,

следовательно, применение аппарата эталонных матриц в комплексе с БМП снижает объем памяти декодера в $k \times (n - k)!$ раз.

Пусть в системе обмена данными используется недвоичный код Рида-Соломона (РС) с параметрами (7,3,5). Матрица G этого кода в систематической форме имеет вид, и столбцы матрицы нумеруются обычным образом слева направо

$$G = \begin{bmatrix} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^4 & \alpha^0 & \alpha^4 & \alpha^5 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^2 & \alpha^0 & \alpha^6 & \alpha^6 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^3 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

здесь и далее α – примитивный элемент поля $GF(2^3)$.

Пусть надежными символами в некотором принятом кодовом векторе кода РС будут символы с номерами (2 4 5), а менее надежные символы в порядке убывания значений K_{np} располагаются в последовательности вида (6 7 1 3). Тогда из выражения (5) следует

$$G_{nep} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha^4 & \alpha^0 & \alpha^4 & \alpha^5 & \alpha^0 & 0 \\ \alpha^0 & \alpha^2 & \alpha^0 & \alpha^6 & \alpha^6 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha^3 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^3 & 0 & \alpha^0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для реализации преобразования вида $G_{nep} \Rightarrow G_{nep}^{cuc}$ в выражении (6) выделяют образ ключевой матрицы Q размерности $k \times k$, которая включает в себя первые k столбцов. Тогда обратная матрица для Q является собственно ключевой и однозначно указывает на действия, которые необходимо произвести над строками матрицы G_{nep} для перевода ее в систематическую

форму, поскольку $Q \times Q^{-1} = E$. Для рассматриваемого примера $Q_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha^4 & \alpha^0 \\ \alpha^0 & \alpha^2 & \alpha^0 \\ 0 & \alpha^3 & \alpha^0 \end{bmatrix}$, а

определитель этой матрицы $\det Q = \alpha^6$, и обратная матрица принимает вид

$$Q_{3 \times 3}^{-1} = \begin{bmatrix} \alpha^6 & \alpha^0 & \alpha^2 \\ \alpha^1 & 0 & \alpha^1 \\ \alpha^4 & 0 & \alpha^5 \end{bmatrix}. \text{ Проверка вида } Q \times Q^{-1} = E \text{ подтверждает получение единичной}$$

матрицы, следовательно, структура матрицы $Q_{3 \times 3}^{-1}$ является ключом для преобразования $G_{nep} \Rightarrow G_{nep}^{cuc}$.

Для получения первой строки матрицы в процедуре $G_{nep} \Rightarrow G_{nep}^{cuc}$ следует последовательно умножить первую строку матрицы G_{nep} на α^6 (элемент x_{11} в матрице $Q_{3 \times 3}^{-1}$), умножить вторую строку матрицы G_{nep} на α^0 (элемент x_{12} в матрице $Q_{3 \times 3}^{-1}$), затем умножить третью строку G_{nep} на элемент α^2 и сложить

полученные результаты по правилу сложения степеней примитивного элемента α в поле $GF(2^3)$. Поступая аналогично с другими элементами второй и третьей строк матрицы $Q_{3 \times 3}^{-1}$, получают переставленную матрицу кода в систематической форме

$$G_{nep} \Rightarrow G_{nep}^{cuc} = \begin{bmatrix} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^1 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

В ходе оперативной обработки данных сочетание надежных символов кодовой комбинации вида (2 4 5) с высокой долей вероятности может повторяться. Для экономии в будущем вычислительного ресурса декодера целесообразно сохранить этот результат в памяти и использовать его при возможных перестановках с номерами (2 4 5). Матрица, представленная на рисунке 12, со строго возрастающей последовательностью номеров строк называется канонической, и сама матрица является эталонной.

$$\begin{array}{cccccc} \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 & 2 \\ \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^1 & 4 \\ \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & 5 \\ 6 & 7 & 1 & 3 \end{array}$$

Рисунок 12 – Структура эталонной матрицы в каноническом виде по системе надежных символов

Следуя принципам когнитивной обработки данных, декодер, получив, например, кортеж значений K_{np} в виде (5 2 4) для первых k надежных символов принятой комбинации и оставшихся $(n-k)$ менее надежных символов в виде (3 7 1 6), формирует матрицу G_{nep} исходя из структуры эталонной матрицы, как показано ниже

$$G_{nep} \Rightarrow G_{nep}^{cuc} = \begin{bmatrix} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^6 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^3 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

В ходе исследований установлено, что при сохранении номеров позиций в перестановках k надежных и $(n-k)$ ненадежных символов следует на первом шаге переставлять строки матрицы (7), а на втором шаге – столбцы этой новой матрицы. Гистограммы когнитивной карты декодера на этапе формирования мягких решений должны учитывать статистику появления ошибок. Например, на рисунке 13 показаны гистограммы при условии проверки символов кода РС на четность, где первый ряд показывает частоту

появления четных ошибок, а второй ряд указывает на появление нечетных ошибок. Третий ряд соответствует безошибочной фиксации символов кода РС.

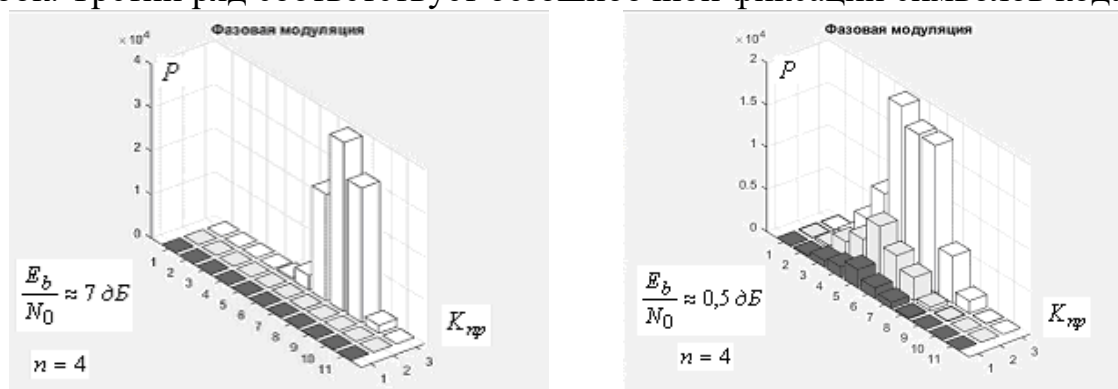


Рисунок 13 – Гистограммы оценки ошибочных решений приема
недвоичного символа

Перестановочное декодирование таких кодов приводит к снижению вычислительной сложности декодера за счет образования константных структур в вычислительном процессе декодирования, характерных для всего цикла работы устройства. Применение когнитивных процедур дает дополнительный выигрыш в процедуре минимизации вычислительной сложности. Проведенными исследованиями установлено, что свойство цикличности кодовых комбинаций позволяет в n раз уменьшить требования к объему памяти декодера. Например, для кода РС (7,3,5) вместо 35 эталонных матриц необходимо будет использовать только 5. Ключевые данные таких сочетаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сочетания номеров надежных символов комбинаций кода РС (7,3,5) с однотипными порождающими матрицами

$G_{cuc}^1 = G$	G_{cuc}^2	G_{cuc}^3	G_{cuc}^4	G_{cuc}^5
123 – 4567	124 – 3567	125 – 6734	126 – 7345	135 – 6724
234 – 5671	235 – 4671	236 – 7145	237 – 1456	246 – 7135
345 – 6712	346 – 5712	347 – 1256	341 – 2567	357 – 1246
456 – 7123	457 – 6123	451 – 2367	452 – 3671	461 – 2357
567 – 1234	561 – 2347	562 – 3471	563 – 4712	572 – 3461
671 – 2345	672 – 3451	673 – 4512	674 – 5123	613 – 4572
712 – 3456	713 – 4562	714 – 5623	715 – 6234	724 – 5613

В таблице 1 закрашены позиции, в которых первые три нумератора не являются каноническими. Иначе говоря, такие позиции лексикографически не упорядочены. Прежде чем проводить подобную трансформацию данных, необходимо убедиться в том, что все операторы БМП, принадлежащие одному столбцу таблицы 1, имеют одинаковую структуру. Порождающие матрицы для эквивалентных кодов, использующие циклические свойства, показаны ниже

$$G_{cuc}^2 = \begin{array}{ccccc} \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^0 & 1 \\ \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha^0 & 2; \\ \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & \alpha^0 & 4; \\ 3 & 5 & 6 & 7 & \end{array};$$

$$G_{cuc}^3 = \begin{array}{ccccc} \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^0 & \alpha^6 & 1 \\ \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^0 & \alpha^5 & 2; \\ \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^0 & \alpha^3 & 5; \\ 6 & 7 & 3 & 4 & \end{array};$$

$$G_{cuc}^4 = \begin{array}{ccccc} \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & 1 \\ \alpha^5 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & 2; \\ \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & 6; \\ 7 & 3 & 4 & 5 & \end{array};$$

$$G_{cuc}^5 = \begin{array}{ccccc} \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^0 & \alpha^1 & 1 \\ \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^0 & \alpha^5 & 3 \\ \alpha^6 & \alpha^6 & \alpha^0 & \alpha^2 & 5 \\ 6 & 7 & 2 & 4 & \end{array}.$$

Анализ данных показывает, что исходная порождающая матрица кода G соответствует циклическим сдвигам подряд идущих символов, например, 1 2 3. Это правило справедливо и для значений номеров других циклов с образующими номерами 1 2 4, 1 2 5, 1 2 6 и 1 3 5 из таблицы 1.

В работе сформулировано правило 1. Для любых эталонных матриц циклический переход позиции 7 в позицию 1 соответствует циклическому сдвигу строк эталонной матрицы снизу-вверх на один шаг. Например, матрица из выражения (7), вычисленная для сочетания надежных символов с номерами (2 4 5), будет в точности равна матрице вида G_{cuc}^4 для сочетаний номеров символов вида (3 5 6) или (4 6 7). При циклическом переходе через позицию 7 из номера (4 6 7) в номер (1 5 7) выражение (7) принимает вид

$$G_{cuc} = \left\| \begin{array}{ccccccc} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^1 \end{array} \right\|. \quad (9)$$

Сформулировано правило 2. Разница между наибольшим значением оценки справа и оценки, находящейся слева от нее, определяет число сдвигов столбцов в эталонной матрице по выбранному направлению цикла. Например, при переходе от набора (3 4 7) к набору оценок (1 4 5), который имеет две единицы разницы между оценками 7 и 5, необходимо столбцы исходной матрицы G_{cuc}^3 сдвинуть по циклу на два шага вправо и выполнить правило 1, как показано ниже. Матрица для набора оценок (3 4 7) в наборе (1 4 5) принимает вид

$$\left\| \begin{matrix} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha^0 & \alpha^6 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^0 & \alpha^5 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^0 & \alpha^3 \end{matrix} \right\| \Rightarrow \left\| \begin{matrix} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^3 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^2 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^0 & \alpha^5 & \alpha^5 & \alpha^4 \end{matrix} \right\|.$$

Приведенные правила являются нормой управления данными когнитивной карты декодера в условиях ограничений на объем ее памяти, однако, они совершенно не пригодны для быстрого поиска в системе когнитивной карты требуемой информации. Выполняя правила 1 и 2, декодер потребует много времени для систематизации полученных произвольных данных. Это резко снижает темп обработки данных когнитивной карты и не обеспечивает требуемой эффективности использования доказанных математических зависимостей в системе образования порождающих матриц эквивалентных кодов.

Для решения подобной задачи в работе предлагается использовать лексикографически упорядоченную когнитивную карту, в которой циклические сдвиги номеров надежных символов лексикографически упорядочены, и к ним привязываются образцы проверочных матриц, которые описывались выше. Предлагаемая структура новой когнитивной карты представлена таблицей 2.

Таблица 2 – Лексикографическая структура когнитивной карты декодера

G_{sys}^1	G_{sys}^2	G_{sys}^3	G_{sys}^4	G_{sys}^5
123 – 4567 – 1 123 – 4567	124 – 3567 – 2 124 – 5673	125 – 3467 – 3 125 – 6734	126 – 3457 – 4 126 – 7345	127 – 3456 – 1 712 – 3456
134 – 2567 – 1 341 – 2567	135 – 2467 – 5 135 – 6724	136 – 2457 – 5 613 – 4572	137 – 2456 – 2 713 – 4562	145 – 2367 – 3 451 – 2367
146 – 2357 – 5 461 – 2357	147 – 2356 – 3 714 – 5623	156 – 2347 – 2 561 – 2347	157 – 2346 – 4 715 – 6234	167 – 2345 – 1 671 – 2345
234 – 1567 – 1 234 – 5671	235 – 1467 – 2 235 – 6714	236 – 1457 – 3 236 – 7145	237 – 1456 – 4 237 – 1456	245 – 1367 – 4 452 – 3671
246 – 1357 – 5 246 – 7135	247 – 1356 – 5 724 – 5613	256 – 1347 – 3 562 – 3471	257 – 1346 – 5 572 – 3461	267 – 1345 – 2 672 – 3451
345 – 1267 – 1 345 – 6712	346 – 1257 – 2 346 – 7125	347 – 1256 – 3 347 – 1256	356 – 1247 – 4 563 – 4712	357 – 1246 – 5 357 – 1246
367 – 1245 – 3 673 – 4512	456 – 1237 – 1 456 – 7123	457 – 1236 – 2 457 – 1236	467 – 1235 – 4 674 – 5123	567 – 1234 – 1 567 – 1234

Пусть сортировка надежных символов привела к последовательности (6 2 7) и некоторой последовательности ненадежных символов вида (3 5 1 4). Канонический вид первой последовательности дает (2 6 7). Из таблицы 2 становится ясно, что следует обрабатывать эталонную матрицу 2 с нумерацией строк (6 7 2) и нумерацией столбцов (1 3 4 5) с последующей их перестановкой.

$$G_{сис}^2 = \begin{matrix} \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^0 & 6 \\ \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha^0 & 7 \\ \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & \alpha^0 & 2 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^0 & 6 \\ \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & \alpha^0 & 2 \\ \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha^0 & 7 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} \alpha^3 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^1 & 6 \\ \alpha^4 & \alpha^0 & \alpha^4 & \alpha^5 & 2 \\ \alpha^2 & \alpha^0 & \alpha^6 & \alpha^2 & 7 \end{matrix}.$$

1 3 4 5 1 3 4 5 3 5 5 1

Таблица 3 – Число арифметических операций в процедуре классического вычисления матрицы эквивалентного кода

Классический подход			
$PC(7,3,5)$	$PC(15,5,11)$	$PC(15,9,7)$	$PC(15,13,3)$
336	2410	2912994	68584334026
$6720 \cdot 10^{-9} \text{ с}$	$48200 \cdot 10^{-9} \text{ с}$	$58259880 \cdot 10^{-9} \text{ с}$	$1371686680520 \cdot 10^{-9} \text{ с}$
Число операций при реализации предлагаемого метода			
(3+4) 7	(5+10) 15	(9+6) 15	(13+2) 15
$140 \cdot 10^{-9} \text{ с}$	$300 \cdot 10^{-9} \text{ с}$	$300 \cdot 10^{-9} \text{ с}$	$300 \cdot 10^{-9} \text{ с}$
Выигрыш в 48 раз	Выигрыш в $1,6 \cdot 10^2$ раза	Выигрыш в $1,9 \cdot 10^6$ раза	Выигрыш в $4,6 \cdot 10^9$ раза

Применение принципов когнитивной двухэтапной обработки данных в декодере недвоичного кода позволяет: во-первых, создать в памяти декодера объективный образ канала связи; во-вторых, применение сокращенной когнитивной карты декодера обеспечивает снижение сложности реализации процедуры декодирования за счет использования системы БМП. Установлены закономерности подобных преобразований.

Архитектура устройства управления, реализующего алгоритм быстрых матричных преобразований на ПЛИС, показана на рисунках 14 и 15. При этом данные из когнитивной карты (для рассматриваемого в примерах кода) в соответствии с таблицей 2 извлекаются в первую часть регистра, осуществляется перестановка строк и затем выполняется перестановка столбцов.

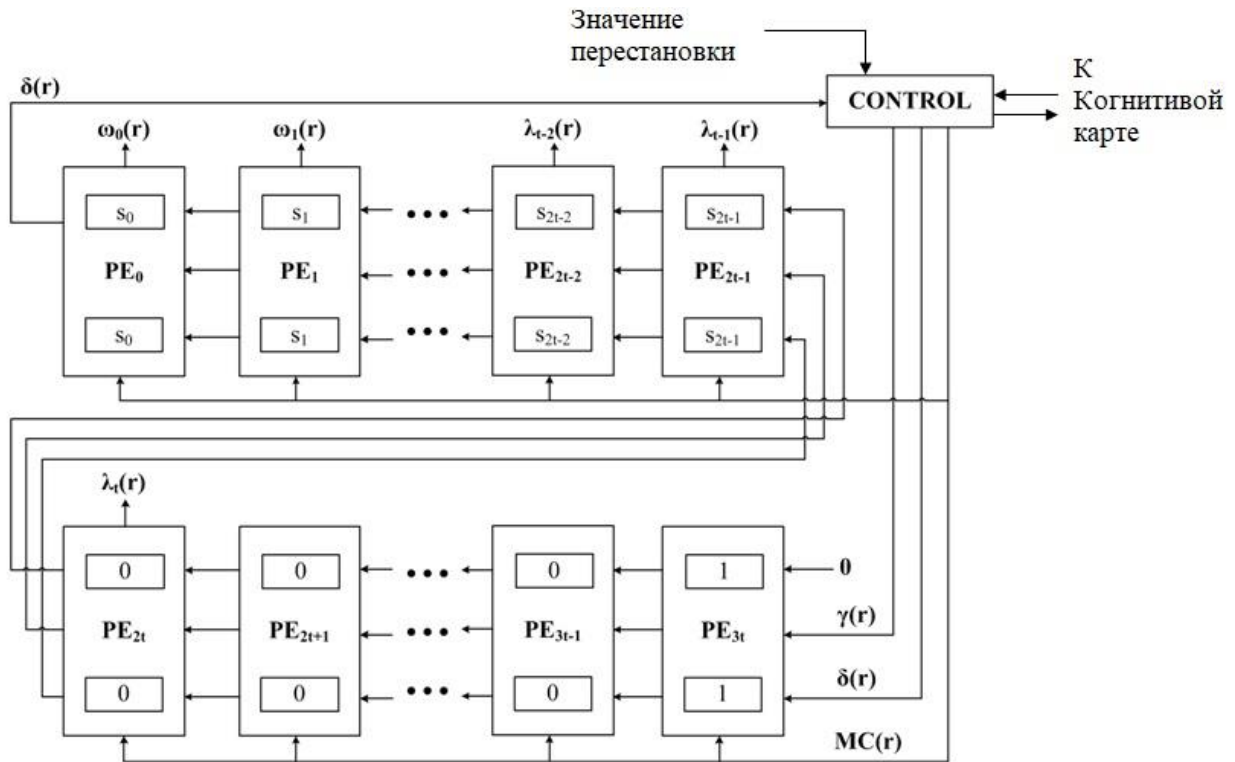


Рисунок 14 – Схема устройства, работающего по алгоритму быстрого преобразования матриц

Подобная структура устройства управления позволяет динамически перестраивать его в зависимости от параметров кода. Блок CONTROL управляет динамической перестройкой устройства за счет переключения связей внутри сдвигового регистра. При этом все основные параметры устройства такие, как критический путь, аппаратные затраты, скорость работы, будут соответствовать параметрам наиболее избыточного кода.

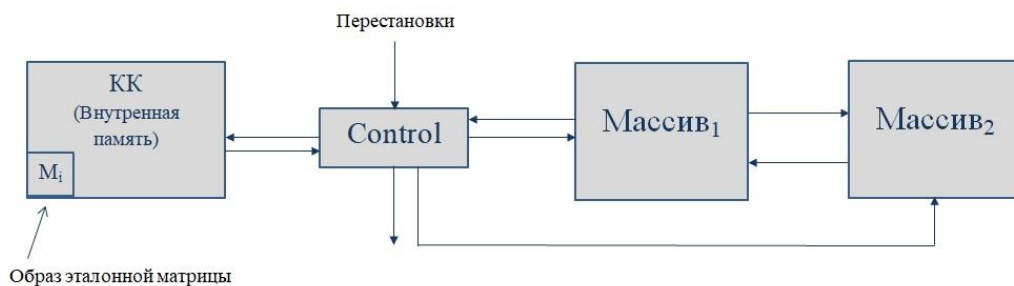


Рисунок 15 – Принцип реализации на ПЛИС

Оценка вариантов реализации когнитивной карты декодера на ПЛИС "Альтера" показана в таблице 4 для различных видов организации карты.

Таблица 4 – Возможность реализации когнитивной карты декодера относительно внутренней памяти ПЛИС "Альтера"

Коды	1 система (общ) полное множества матриц	2 система (БМП) система эталонных матриц	3 система (ЦС) циклические свойства эталонных матриц
PC (7,3,5) полигон	$V_{kk} \ll 1\%$ $(9 * 10^{-4})$ Мбайт	$V_{kk} \ll 1\%$ $(1,5 * 10^{-4})$ Мбайт	$V_{kk} \ll 1\%$ $(2,1 * 10^{-5})$ Мбайт
PC (15,11,5)	5715950%	1,5%	0,1%
PC (15,7,9)	43300%	8,6%	0,5%
PC (255,251,5) PC (40,36,5)	Очень большой объем	625%	15%

В приложении приводится вариант технического решения, связанного с реализацией метода лексикографического декодирования недвоичных избыточных кодов в системах управления.

В заключении приведены основные выводы по проделанной работе:

1. Впервые разработана модель декодера избыточного кода, использующая методы когнитивной обработки при реализации процедуры перестановочного декодирования для защиты команд дистанционного управления от влияния деструктивных факторов управляющих и управляемых объектов.

2. Математически обоснован сокращенный алгоритм декодирования избыточных кодов по упорядоченным статистикам с использованием когнитивной карты декодера, в котором реализуется процедура когнитивного формирования мягких решений символов с системой выявления достоверных оценок на длине кодового вектора.

3. Разработан метод снижения объема памяти когнитивной карты декодера от 2 до 3 порядков в зависимости от параметров кода за счет использования подмножества эталонных матриц эквивалентных кодов, которые на базе предложенных быстрых матричных преобразований позволяют выбрать любой вариант матриц основного множества.

4. Доказаны циклические свойства нумераторов эталонных матриц, которые за счет некоторого увеличения вычислительной нагрузки на процессор декодера позволяют дополнительно снизить объем когнитивной карты до 3 порядков для наиболее востребованных кодов.

5. Представлены структурная схема перестановочного декодера и система быстрых преобразований матриц на базе линейных перестановок строк и

столбцов эталонных матриц без выполнения арифметических операций, позволяющие снизить число операций процессора от 1 до 3 порядков в зависимости от параметров избыточного кода.

6. Приведены схемные решения для реализации исследованного метода перестановочного декодирования недвоичных избыточных кодов на ПЛИС.

Перспективы дальнейших исследований

1. Исследовать возможности применения когнитивной метафоры для быстрого декодирования помехоустойчивых кодов методом перестановок в высокоскоростных когерентных сетях.

2. Выявить эффективность применения в системе оценки мягких решений символов возможностей аппарата нечеткой логики.

3. Оценить возможности поиска оптимального решения для реализации перестановочного декодера на базе жадных алгоритмов, актуальных в рассматриваемой системе для отдельных отношений сигнал-шум.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Гладких, А.А. Математическая модель телекоммуникационных систем, используемых в интегрированных информационно-управляющих комплексах / А.А. Гладких, Ал Тамими Таква Флайиих Хасан // Автоматизация процессов управления. – 2016. – №3(45). – С. 38–43.

2. Гладких, А.А. Система быстрых матричных преобразований в процедуре формирования эквивалентных избыточных кодов / А.А. Гладких, Ал Тамими Таква Флайиих Хасан // Радиотехника. – 2017. – №6. – С. 41–44.

3. Гладких, А.А. Обеспечение достоверности данных в измерительных системах на базе сенсорных сетей / А.А. Гладких, Н.Ю. Чилихин, Ал Тамими Таква Флайиих Хасан // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – №12. – т. 15. – С. 4–9.

4. Гладких, А.А. Концепция когнитивной обработки данных в системе перестановочного декодирования недвоичного избыточного кода / А.А. Гладких, Ал Тамими Таква Флайиих Хасан // Электросвязь. – 2018. – № 9. – С. 69–74.

Список патентов

5. Гладких А.А., Шагарова А.А., Ал Тамими Т.Ф.Х. Лексикографический декодер каскадного кода. Патент РФ. № 2619533, опубликован 16 мая 2017.

Публикации в других изданиях

6. Ал Тамими, Т.Ф.Х. Эффективное декодирование недвоичных кодов / Ал Тамими Т.Ф.Х. // Сборник научных трудов девятой Всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ) «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем». – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – С. 146–147.

7. Ал Тамими, Т.Ф.Х. Списочное декодирование недвоичных кодов / Ал Тамими Т.Ф.Х. // Доклады 71-й Международной конференции

«Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (REDS–2016)», посвящённая Дню радио. – Москва, 2016. – С. 370–374.

8. Ал Тамими, Т.Ф.Х. Методы выработки мягких решений в системе с недвоичными кодами / Ал Тамими Т.Ф.Х. // «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем»: сборник научных трудов. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – С. 188–192.

9. Ал Тамими, Т.Ф.Х. Система быстрых матричных преобразований в процедуре перестановочного декодирования недвоичных избыточных кодов / Ал Тамими Т.Ф.Х. // Доклады 20-й Международной конференции РНТОРЭС имени А.С. Попова «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2018». – Москва, 2018. – С. 164–169.

Ал Тамими Таква Флайних Хасан

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕСТАНОВОЧНОГО ДЕКОДЕРА НЕДВОИЧНОГО
ИЗБЫТОЧНОГО КОДА НА БАЗЕ КОГНИТИВНОЙ МЕТАФОРЫ**

Подписано в печать 9.01.2019. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ.

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32