

На правах рукописи

**ЖДАНОВА Мария Андреевна**

**Обратные задачи в математическом  
моделировании помеховой обстановки на основе  
скрытых полумарковских моделей**

**05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**

**Ростов-на-Дону**  
**2017**

Работа выполнена на кафедре алгебры и дискретной математики института математики, механики и компьютерных наук имени И.И.Воровича Южного федерального университета.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

кандидат физико-математических наук, доцент Деундяк Владимир Михайлович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор физико-математических наук, профессор –

кандидат технических наук, доцент

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 200\_\_ г. в \_\_\_\_ час. \_\_\_\_ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.208.25 Южного федерального университета по адресу: 347928, Ростовская область, г. Таганрог, ул. Чехова 2, ауд. \_\_.

Отзывы на автореферат просьба направлять по адресу: 347928, Ростовская область, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44, Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.208.25 Брюхомицкому Ю.А.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: 344007, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, 148.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.208.25,  
к.т.н.

Брюхомицкий Ю.А.

---

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

---

### **Актуальность темы исследования.**

Для обеспечения высококачественной передачи информации в последние десятилетия широко используются цифровые системы передачи данных. Цифровая передача данных предоставляет больше возможностей в обработке информации по сравнению с аналоговой, цифровые каналы менее подвержены искажению и интерференции, а применение процедур обнаружения и исправления ошибок делают возможной высокую точность сигнала. Для обнаружения и исправления ошибок эффективно используются средства алгебраического помехоустойчивого кодирования. За последние полвека было разработано большое количество алгебраических кодов, исправляющих ошибки, в частности, коды Хэмминга, Боуза-Чоудхури-Хоквингема, Рида-Соломона, Рида-Маллера, циклические, сверточные и др. В настоящее время продолжается разработка новых кодов и алгоритмов декодирования. Важные результаты в этой области получены М. Суданом, В.М. Сидельниковым, С.А. Осмоловским и ... (еще три строчки фамилий, может быть с конкретизацией областей или (и) стран, городов, институтов) другими учеными.

При применении помехоустойчивого кодирования следует учитывать, что различные коды и алгоритмы их декодирования неодинаково хорошо справляются с разными типами ошибок. Поэтому нужно уметь подбирать для каждого конкретного канала наиболее эффективные методы и средства обнаружения и исправления ошибок. Для решения этой задачи необходимо иметь достаточный объем сведений о возможных помехах в канале и о корректирующих свойствах кода по отношению к ошибкам различной структуры. Подбор помехоустойчивого кода к реальному каналу является сложной задачей оптимизации соотношения между затратами на кодирование и обеспечиваемым качеством передачи информации. Проведение реальных экспериментов, как правило, достаточно трудоемко, поэтому эффективным оказывается применение имитационного моделирования помехоустойчивых каналов связи. Основанные на имитационном моделировании системы оценки применимости схем алгебраического помехоустойчивого кодирования позволяют подбирать помехоустойчивые коды по потокам ошибок, порождаемым математическими моделями источников ошибок. Схема информационной системы оценки применимости схем алгебраического помехоустойчивого кодирования была построена в работах Н.С. Могилевской. Предложенная система позволяет решать такие задачи как согласование помехоустойчивого кода с каналом, изучение корректирующих свойств декодеров, исследование быстродействия работы кодера и декодера и многие другие.

Важную роль в работе предложенной информационной системы играют модели источников потоков ошибок, имитирующие внешние воздействия в канале связи. Моделированием источников потоков ошибок занимались такие ученые как Э.Н. Гильберт, Е.О. Эллиот, Б.М. Игельник, В.И. Петрович, Б.Д. Фричман, В.М. Охорзин, В.О. Колпаков, В.Я. Турин, О.В. Попов, Ю.С. Чье и другие. В настоящее время известно множество классических моделей источников ошибок, однако, как правило математическая модель источника ошибок описывает узкий класс каналов связи, поэтому для исследования корректирующей способности кода

по отношению к различным типам ошибок при проведении имитационных экспериментов необходимо использовать несколько моделей источников ошибок. Это затрудняет проведение имитационных экспериментов, поскольку в их процессе приходится тестировать корректирующую способность кодеков для разных моделей. Представляется более удобным построить общую модель источника ошибок канала, которая учитывала бы  $q$ -ичные алфавиты и позволила бы моделировать различные случаи помеховой обстановки путем изменения параметров.

Для проведения имитационных экспериментов, направленных на подбор кодека к конкретному каналу связи, важно, чтобы используемая модель канала связи соответствовала реальному каналу связи, для которого подбирается кодек. Поэтому необходимо научиться решать задачу адекватного представления зарегистрированной в реальном канале последовательности ошибок математической моделью источника ошибок, чтобы впоследствии использовать эту модель в качестве генератора потоков ошибок при проведении имитационных экспериментов с целью подбора кодека.

Таким образом, актуальным представляется построение общей математической модели источника ошибок в канале передачи данных и разработка алгоритма подбора адекватной модели источника ошибок для конкретного канала связи.

**Целью диссертационной работы** является построение общей математической модели источника ошибок в канале передачи данных, разработка алгоритмов, численных методов и программного комплекса, позволяющих осуществлять генерацию потоков ошибок в соответствие с построенной моделью и подбор адекватной математической модели источника ошибок для конкретного канала связи.

**Задачами диссертационной работы** являются:

1. Провести содержательный анализ и систематизацию сведений о существующих способах моделирования источников потоков ошибок и определить математический аппарат, позволяющий построить такую общую математическую модель источника ошибок, для которой возможно решение задачи подбора конкретной модели, соответствующей зарегистрированной в канале передачи данных последовательности ошибок.
2. Разработать общую модель источника ошибок на основе теории скрытых марковских и полумарковских моделей.
3. Разработать алгоритм и численные методы, позволяющие для реального канала передачи данных подбирать адекватную математическую модель источника ошибок.
4. Усовершенствовать информационную систему оценки применимости схем алгебраического помехоустойчивого кодирования, расширив ее функционал возможностью подбирать подходящую модель источника ошибок для исследуемого реального канала связи.
5. Разработать программный комплекс для исследования моделей источников ошибок, позволяющий как генерировать потоки ошибок с помощью разработанных ранее моделей, так и подбирать наилучшую модель по реальному потоку ошибок в канале.

**Методология и методы исследования.** При выполнении работы использовались методы алгебры, теории конечных автоматов, теории вероятностей, математической статистики, компьютерного эксперимента. Существенно применялась теория скрытых марковских и полумарковских моделей, в частности, методы решения задач оценивания. Для реализации вычислительного ядра программного комплекса использовался язык программирования C#, пользовательский интерфейс реализован посредством интерфейса программирования приложений Windows Forms. При разработке архитектуры программного комплекса и в ходе программной реализации соблюдались принципы объектно-ориентированного проектирования, исходный код программного комплекса покрыт модульными и интеграционными тестами.

**Достоверность научных результатов** подтверждается точностью постановок задач, совпадением частных случаев предлагаемых моделей с классическими моделями, обоснованностью принятых предположений и допущений, приведенным доказательством новых и корректным применением известных теоретических положений, корректным применением методов и алгоритмов, устойчивой работой разработанного программного комплекса и результатами численных экспериментов, проведенных на модельных примерах.

**Объектом исследования диссертационной работы** являются потоки ошибок в цифровых помехоустойчивых каналах связи.

**Предметом исследования** выступают методы моделирования и анализа потоков ошибок в цифровых каналах передачи данных.

**Тематика работы** соответствует п.1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.», п.3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий», п.4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента» и п.8 «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования» паспорта специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

**Научная новизна.** В диссертации получены следующие новые научные и практические результаты:

- *в области математического моделирования:*

- разработаны три новых модели источника ошибок в  $q$ -ичном цифровом канале передачи данных — скрытая марковская модель источника ошибок, скрытая полумарковская модель Фергюсона и скрытая полумарковская  $QP$ -модель, позволяющие имитировать различные случаи помеховой обстановки, совпадающие в частных случаях со многими широко применяющимися моделями источников ошибок и отличающиеся от существующих возможностью решения для них задачи подбора модели с такими параметрами, что она сможет адекватно имитировать конкретный реальный канал связи. Все предложенные модели позволяют моделировать потоки ошибок в  $q$ -ичном цифровом канале с несколькими физическими состояниями. Скрытая марковская модель источника

ошибок является обобщением классических моделей Гильберта и Фричмана и предполагает, что длительность пребывания в состоянии описывается геометрическим распределением. Отличие скрытой полумарковской модели Фергюсона заключается в явном задании длительности пребывания модели в состоянии, при этом распределение вероятностей ошибок внутри состояния является равномерным. Наиболее важной с точки зрения научной новизны является скрытая полумарковская  $QR$ -модель, позволяющая как и модель Фергюсона явно моделировать длительность пребывания в состоянии, а также задавать произвольное распределение вероятностей ошибок на протяжении состояния.

- построена модификация модели информационной системы оценки применимости схем помехоустойчивого алгебраического кодирования, в рамках которой предложено использование в качестве базовых моделей источника ошибок скрытых полумарковских моделей и добавлен новый модуль подбора адекватной реальному каналу модели источника ошибок из базы данных моделей источников ошибок информационной системы. Такая модификация позволяет поднять в рамках информационной системы оценки применимости схем помехоустойчивого алгебраического кодирования вопрос адекватности имитационной модели канала реальному каналу связи в рамках информационной системы.

- *в области численных методов:*

- предложен и теоретически обоснован алгоритм подбора по зарегистрированной в реальном канале передачи данных последовательности ошибок адекватной математической модели источника ошибок из заранее определенного набора моделей. Алгоритм подбора предложен для скрытой полумарковской модели Фергюсона и скрытой полумарковской  $QR$ -модели и основан на вычислении для каждой из исследуемых моделей вероятности, с которой она может сгенерировать рассматриваемую последовательность ошибок. Алгоритм вычисления этой вероятности, также предложенный и теоретически обоснованный в работе, представляет собой модификацию алгоритма прямого хода, описанного в работах Шенг Женг Ю для случая общей скрытой полумарковской модели.
- разработан алгоритм построения полиномиального представления скрытой полумарковской модели Фергюсона, позволяющий значительно ускорить процесс генерации последовательностей ошибок.

- *в области комплексов программ:*

- разработан программный комплекс, направленный на исследование моделей источников ошибок и позволяющий решать такие задачи как генерация последовательности ошибок моделью с заданными параметрами, вычисление вероятности генерации некоторой заданной последовательности исследуемой моделью, подбор по имеющейся последовательности ошибок наиболее адекватной модели из некоторого набора. Комплекс поддерживает скрытую марковскую модель, скрытую полумарковскую

модель Фергюсона и скрытую полумарковскую  $QP$ -модель, несколько типов генераторов случайных чисел, несколько критериев адекватности модели последовательности ошибок.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

- Скрытая полумарковская  $QP$ -модель источника ошибок в  $q$ -ичном цифровом канале передачи данных, обобщающая целый ряд классических моделей источников ошибок и которую в силу общности и/или структуры можно (удобно) в последствии включить в систему ИС ОПСАПК.
- Полиномиальное представление скрытой полумарковской модели фергюссоновского типа.
- Алгоритм численного решения задачи оценивания для общей скрытой полумарковской модели, его полное теоретическое обоснование и адаптация на случай скрытой полумарковской  $QP$ -модели и скрытой полумарковской модели фергюссоновского типа.
- Схема подбора модели источника ошибок из базы скрытых полумарковских  $QP$ -моделей по реальной канальной последовательности и модификация информационной системы оценки применимости схем помехоустойчивого кодирования (ИС ОПСАПК) на ее основе.
- Программный комплекс, позволяющий осуществлять генерацию потоков ошибок, а также подбирать наиболее адекватную модель по канальной последовательности ошибок.

#### **Теоретическая ценность**

#### **Практическая ценность**

#### **Реализация результатов работы.**

**Апробация диссертационной работы.** Основные результаты работы докладывались на XI Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (весенняя сессия, г. Кисловодск, 1 - 8 мая 2010 г.), на международной научно-практической конференции "Информационная безопасность 2010". (г. Таганрог, 22-25 июня 2010г.), XVIII Всероссийской Школе-Коллоквиуме по стохастическим методам (весенняя сессия, Казань, 1 - 8 мая 2011 г.), на международной научно-практической конференции "Современные проблемы и достижения в отраслях радиотехники, телекоммуникаций и информационных технологий". (Украина, г. Запорожье, 19 - 21 сентября 2012 г), на V международной конференции "Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения"(г. Ростов-на-Дону, 26 апреля-1 мая 2015 г.), на 4-й Российско-Китайской конференции Numerical Algebra with Applications (г. Ростов-на-Дону, 26-29 июня 2015 г.), на Международной конференции молодых ученых стран БРИКС (г. Ростов-на-Дону, 24-26 сентября 2015 г.), на VI Международной конференции "Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения"(г. Ростов-на-Дону, 24 апреля-29 апреля 2016 г.).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 16 печатных изданиях [1], [2], [3], [5], [4], [6], [8], [10], [9], 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК для публикации научных работ, отражающих основное содержание диссертации [6], [8], [ДеМоЖда], 4 — в журналах и сборниках научных работ, 9 — в тезисах международных и всероссийских научных конференций. В работах [...] научному руководителю В.М. Деундяку принадлежат обсуждения формулировки результатов и методов их получения, в работах [1], [2] автору диссертации принадлежит разработка математической и компьютерной модели источника ошибок; в работах [10], [9], [ДеМоЖда] автору диссертации принадлежит разработка метода подбора адекватной модели потока ошибок к реальному каналу связи и модификация ИС ОПСАПК на основе автоматизированного выбора модели источника ошибок.

**Структура работы и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка.

В первой главе...

## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1] Бибов А.Ю. , Жданова М. А. Экспериментальное исследование аналога списочного декодера Сидельникова с использованием обобщенной марковской модели источника ошибок. // Информационное противодействие угрозам терроризма – 2009. – № 13. – С. 151-153.
- [2] Бибов А.Ю. , Жданова М. А. Экспериментальное исследование аналога списочного декодера Сидельникова с использованием обобщенной марковской модели источника ошибок. // Материалы XI Международной научно-практической конференции «Информационная безопасность», часть 1, Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010, с. 221-225.
- [3] Деундяк В.М., Жданова М.А. Обобщенная марковская модель источника ошибок q-ичного цифрового канала нескольких физических состояний. // Математика и ее приложения: ЖИМО. – Иваново: ИвГУ. – 2010. – Выпуск 1 (7). – С.34-40.
- [4] Деундяк В.М., Жданова М.А. О некотором обобщении марковской математической модели источника ошибок. // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2010, т.17, №5, с.713-714.
- [5] Деундяк В.М., Жданова М.А. О применении скрытых марковских моделей в моделировании источников ошибок. // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2011. –Выпуск 3. –С. 488.
- [6] Деундяк В.М., Жданова М.А. Полиномиальное представление скрытой полумарковской модели фергюсоновского типа. // Вестник ВГУ, Серия: Системный анализ и информационные технологии – 2013, №2, с.71-78.
- [7] Деундяк В.М., Жданова М.А. О решении задачи оценивания скрытых полумарковских моделей фергюсоновского типа. // Известия вузов. Сев.-Кавк. Регион. Естественные науки. 2015. N 3, с. 19-24.



- [8] *Деундяк В.М., Жданова М.А.* Решение задачи оценивания скрытых полумарковских QR-моделей. // Вестник ДГТУ, Т.14, № 4(79), 2014, с.5-16.
- [9] *Деундяк В.М., Жданова М.А., Могилевская Н.С.* Об автоматизированном выборе модели потока ошибок в информационной системе оценки применимости помехоустойчивого кодирования // Труды научной школы И.Б.Симоненко. Выпуск 2. Ростов-на-Дону: издательство ЮФУ, 2015. с. 111-120.
- [10] *Деундяк В.М., Жданова М.А., Могилевская Н.С.* Автоматизированный выбор модели потока ошибок в информационной системе оценки применимости помехоустойчивого кодирования // Международная научная конференция «Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения VI». Ростов-на-Дону, 24 – 29 апреля 2016г. Материалы конференции. Изд. Центр ДГТУ, Ростов-на-Дону, 2016, с.157-158

---

Подписано к печати \_\_. \_\_.2009

Заказ

Формат 60 × 90/16

Печ. л. 1.0

Уч.-изд. л. 1.0

Тираж 120

Бесплатно

---

Отпечатано в \_\_