

Украинская государственная академия
железнодорожного транспорта

На правах рукописи

Волков Алексей Станиславович

УДК 621.391

**МЕТОДЫ КОДИРОВАНИЯ И ДЕКОДИРОВАНИЯ
АЛГЕБРАИЧЕСКИХ КАСКАДНЫХ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ С
ПРИМЕНЕНИЕМ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ**

Специальность 05. 12. 02 – Телекоммуникационные системы и сети

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Приходько Сергей Иванович
доктор технических наук, доцент

Харьков – 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. Анализ методов кодирования и декодирования каскадных кодов в телекоммуникационных системах и сетях	13
1.1. Анализ методов кодирования каскадных сверточных кодов.....	13
1.2. Анализ методов декодирования каскадных сверточных кодов.....	17
1.3. Анализ вычислительной сложности методов кодирования и декодирования каскадных сверточных кодов.....	22
1.4. Анализ методов вычисления свертки и быстрого преобразования Фурье в полях Галуа.....	26
1.5. Постановка задач на исследование.....	33
Выводы.....	35
РАЗДЕЛ 2. Разработка методов кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов	36
2.1. Разработка метода кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов.....	36
2.1.1. Разработка метода кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов со скоростью кода $R_0 = 1/m$ на внутренней ступени.....	36
2.1.2. Разработка и исследование метода кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов с произвольной скоростью кода на внутренней ступени.....	43
2.1.3. Разработка метода кодирования недвоичных алгебраических каскадных сверточных кодов.....	48
2.2. Разработка метода кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов на основе синтеза методов вычисления свертки.....	51
2.2.1. Разработка метода кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов на основе быстрых алгоритмов вычисления свертки.....	51
2.2.2. Разработка метода формирования информационной и кодовой последовательностей алгебраических каскадных сверточных кодов.....	58

2.3. Разработка алгоритмов кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов.....	62
Выводы.....	71
РАЗДЕЛ 3. Разработка методов декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов.....	72
3.1 Разработка метода декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов во временной области.....	72
3.2. Разработка метода кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области.....	81
3.3. Разработка метода декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области.....	89
3.4. Уменьшение вычислительной сложности разработанных методов кодирования и декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области.....	98
Выводы.....	110
РАЗДЕЛ 4. Оценка сложности разработанных алгоритмов кодирования и декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области.....	111
4.1 Оценка минимального кодового расстояния и исследование свойств алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области.....	111
4.2. Оценка сложности разработанных алгоритмов кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области.....	117
4.3. Оценка сложности разработанных алгоритмов декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области.....	129
Выводы.....	142
ВЫВОДЫ.....	143
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	146
Приложение А. Акты реализации результатов диссертационной работы.....	161

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в телекоммуникационных системах и сетях наблюдается увеличение объема и скорости передаваемой информации. При этом требования к достоверности достаточно велики и постоянно возрастают [1-4]. Эффективным способом повышения достоверности передаваемой информации по каналам связи является применение методов помехоустойчивого кодирования и декодирования [5-12].

Из известного множества классов помехоустойчивых кодов можно выделить две основные группы: блочные коды и непрерывные коды [1-6, 13-28]. Важным подклассом непрерывных кодов являются сверточные коды. По своим характеристикам сверточные коды являются более эффективными, чем блочные коды [29-36].

В то же время, высокой эффективностью обладают помехоустойчивые коды большой длины, что следует из теоремы Шеннона [37]. С этой точки зрения, целесообразно применение последовательных каскадных кодов с компонентными сверточными кодами на внешней и внутренней ступени кода (каскадные сверточные коды) [38-44]. Такой подход позволяет достичь высокой эффективности, при относительно невысокой сложности алгоритмов кодирования и декодирования [1-4, 38-42].

Недостатком существующих каскадных сверточных кодов является существенное возрастание вычислительной сложности алгоритмов кодирования и декодирования, которое наблюдается с ростом длины кодового ограничения компонентных сверточных кодов [2-4, 30-32, 42]. Следовательно, реализация кодирующих и декодирующих устройств последовательных каскадных сверточных кодов становится затруднительной.

Таким образом, возникает противоречивая ситуация, в которой с одной стороны телекоммуникационные системы и сети предъявляют высокие требования к достоверности передаваемой информации, а с другой

помехоустойчивые каскадные сверточные коды, обеспечивающие заданную достоверность должны обладать низкой сложностью алгоритмов кодирования и декодирования.

Для разрешения данного противоречия необходимо решить актуальную научную задачу, которая заключается в разработке методов кодирования и декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов с целью уменьшения сложности процедур кодирования и декодирования. Таким образом, тема диссертационных исследований является актуальной.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Исследования диссертационной работы выполнялись в соответствии со следующими нормативными актами:

1. Концепция Национальной программы информатизации, одобренная Законом Украины «Про Концепцію Національної програми інформатизації» от 4 февраля 1998 г. №75/98 – ВР.

2. Концепция создания Государственной интегрированной информационной системы обеспечения управления подвижными объектами, утвержденная постановлением Кабинета Министров Украины от 17 июля 2003 г. №410 – р.

3. Государственная научно-техническая программа «Створення перспективних телекомунікаційних систем і технологій».

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является уменьшение вычислительной сложности процедур каскадного сверточного кодирования и декодирования с обеспечением заданной достоверности.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие **частные задачи:**

1. Проанализировать методы кодирования и декодирования помехоустойчивых каскадных сверточных кодов, а также процедуры быстрого преобразования Фурье и быстрые алгоритмы вычисления свертки в полях Галуа.

2. Усовершенствовать метод кодирования алгебраических каскадных

сверточных кодов применением алгебраических сверточных кодов на внешней и внутренней ступени кодирования с согласованными параметрами.

3. На основе синтеза быстрых процедур Агарвала-Кули и Винограда вычисления свертки, а также методов перекрытия с суммированием и перекрытия с накоплением секций кодовых слов усовершенствовать метод кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов.

4. Усовершенствовать метод кодирования и разработать метод и алгоритм декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области с применением быстрого преобразования Фурье Кули-Тьюки и Гуда-Томаса.

5. Оценить вычислительную сложность алгоритмов, реализующих методы кодирования и декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов; провести сравнительный анализ вычислительной сложности разработанных алгоритмов кодирования и декодирования и существующих алгоритмов; разработать и обосновать рекомендации по их использованию.

Объектом исследования является процесс помехоустойчивого кодирования и декодирования на основе применения алгебраических каскадных сверточных кодов.

Предметом исследования являются методы алгебраического каскадного сверточного кодирования и декодирования.

Методы исследования. Разработка методов каскадного сверточного кодирования и декодирования проведена с применением методов алгебраической теории помехоустойчивого кодирования, теории чисел, теории конечных полей и теории цифровой обработки сигналов. Оценка вычислительной сложности разработанных методов проведена с использованием методов теории сложности вычислений. Разработка и обоснование рекомендаций по реализации кодеров алгебраических каскадных сверточных кодов проведена с применением методов теории цифровых автоматов.

Научная новизна полученных результатов. В ходе решения поставленных задач были получены следующие научные результаты.

1. Усовершенствован метод кодирования последовательных алгебраических каскадных сверточных кодов во временной области, при этом усовершенствованный метод отличается от известных применением процедур Агарвала-Кули и Винограда вычисления сверток и методов перекрытия с суммированием и перекрытия с накоплением секций кодовых слов, и уменьшает вычислительную сложность процедур кодирования.

2. Получил дальнейшее развитие метод кодирования каскадных сверточных кодов в частотной области, который отличается от известных использованием процедур обратного быстрого преобразования Фурье Кули-Тьюки и Гуда-Томаса, что позволяет уменьшить вычислительную сложность процедур кодирования.

3. Впервые разработан алгебраический метод декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области, отличающийся от известных применением процедур прямого быстрого преобразования Фурье Кули-Тьюки и Гуда-Томаса на основных этапах декодирования и извлечением информационной последовательности на каждой из ступеней непосредственно в частотной области, позволяющий уменьшить вычислительную сложность декодирования.

Практическое значение полученных результатов исследований заключается в следующем:

1. На основе предложенного метода кодирования каскадных сверточных кодов в частотной области разработаны алгоритмы, которые позволяют уменьшить вычислительную сложность в 3,4 раза по числу умножений и 4,3 по числу сложений по сравнению с известным алгоритмом кодирования во временной области, и в 2 раза по числу умножений и сложений по сравнению с известным частотным алгоритмом, при фиксированных параметрах каскадных сверточных кодов.

2. Разработаны алгоритмы, реализующие предложенные методы

алгебраического декодирования каскадных сверточных кодов в частотной области, вычислительная сложность которых в 1,67 – 2,23 раза меньше по числу умножений и в 1,69 – 2,23 раза по числу сложений по сравнению с известным алгоритмом декодирования во временной области, при фиксированных параметрах каскадных сверточных кодов.

3. Разработаны практические рекомендации при реализации разработанных алгоритмов, реализующих методы алгебраического декодирования каскадных сверточных кодов в частотной области. Предлагаемые алгоритмы алгебраического декодирования компонентных сверточных кодов при фиксированной вычислительной сложности и длине кодового слова позволяют повысить минимальное кодовое расстояние в 1,46 – 1,75 раза.

4. Полученные результаты использованы на производстве при разработке математического и программного обеспечения устройств SI3000 MSAN широкополосного доступа в ТОВ СП «МОНИС» (акт реализации от 17.03.2011 г.) и в учебном процессе Украинской государственной академии железнодорожного транспорта (акт реализации от 09.02.2011 г.).

Личный вклад автора. Все результаты, изложенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. Основные результаты диссертационной работы изложены в семи научных статьях, опубликованных в научных изданиях, которые входят в перечень ВАК Украины. В научных статьях, которые опубликованы в соавторстве, личный вклад автора заключается в следующем:

- в [111] предложен способ алгебраического представления самоортогональных сверточных кодов в частотной области;
- в [112] предложен алгебраический метод формирования входной и выходной последовательностей кодирующих устройств сверточных кодов;
- в [113] усовершенствован метод построения алгебраических каскадных сверточных кодов во временной области;
- в [114] усовершенствован метод кодирования алгебраическим

каскадным сверточным кодом на базе синтеза процедур вычисления сверток;

– в [115] предложен метод построения и кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области на основе применения преобразования Фурье;

– в [116] предложен метод декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области с применением быстрого преобразования Фурье;

– в [117] выполнена оценка вычислительной сложности методов кодирования и декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов во временной и частотной области.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы докладывались и были одобрены на следующих научно-технических конференциях:

– вторая международная научная конференция “Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития” (Харьков, 2009);

– научно-практическая конференция “Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку” (Харьков, 2010).

– двадцать третья международная научно-практическая конференция “Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины” (Алушта, 2010);

– первая международная научно-техническая конференция “Інформаційні технології в навігації і управлінні: стан та перспективи розвитку” (Киев, 2010);

– первая научно-техническая конференция “Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління” (Харьков, 2010);

– научно-практическая конференция “Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку” (Харьков, 2011).

Публикации. Результаты диссертационной работы изложены в 7 научных статьях [111-117], опубликованных в научных изданиях, которые входят в перечень ВАК Украины, 1 патенте [118] и 6 тезисах докладов на научно-технических конференциях [119-124].

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, выводов и приложений. **В первом разделе** проведен анализ методов построения, кодирования и декодирования последовательных каскадных сверточных кодов; рассмотрены основные параметры компонентных сверточных кодов в составе каскадного кода; выполнен анализ вычислительной сложности существующих методов кодирования и декодирования каскадных сверточных кодов; рассмотрено преобразование Фурье в конечных полях и его основные свойства; произведен анализ БПФ-алгоритмов и быстрых алгоритмов вычисления линейной и циклической свертки в полях Галуа; поставлены задачи на исследование. **Во втором разделе** предложен метод и алгоритм построения алгебраических каскадных сверточных кодов основанный на использовании компонентных сверточных кодов найденных алгебраическим способом. Разработан метод и алгоритм кодирования алгебраических каскадных сверточных кодов на базе синтеза методов перекрытия с суммированием и перекрытия с накоплением, а так же быстрых алгоритмов Агарвала-Кули и Винограда вычисления свертки. **В третьем разделе** предложены методы и алгоритмы построения, кодирования и декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области. Научно обоснована возможность применения БПФ-алгоритмов Кули-Тьюки и Гуда-Томаса для уменьшения вычислительной сложности на основных этапах кодирования и декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области. **В четвертом разделе** произведена оценка минимального кодового расстояния и исследование свойств алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области. Выполнена оценка вычислительной сложности разработанных алгоритмов, реализующих методы кодирования и

декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области. Проведено сравнение вычислительной сложности предлагаемых и существующих алгоритмов кодирования и декодирования. **В выводах по работе** сообщаются основные результаты проведенных исследований.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю доктору технических наук доценту С.И. Приходько за оказанную помощь и поддержку при проведении исследований. Автор благодарен коллективу кафедры “Транспортная связь” Украинской государственной академии железнодорожного транспорта за ряд полезных советов и пожеланий, которые были высказаны при обсуждении результатов диссертационной работы и оказанную помощь в ее оформлении.