

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САРАТОВСКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра теоретических основ  
компьютерной безопасности и  
криптографии

**Турбо-коды**

АВТОРЕФЕРАТ

дипломной работы

студентки 6 курса 631 группы

специальности 10.05.01 Компьютерная безопасность

факультета компьютерных наук и информационных технологий

Волковой Татьяны Вадимовны

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

А.Н. Гамова

31.12.2016 г.

Заведующий кафедрой

профессор, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

В.Н. Салий

31.12.2016 г.

Саратов 2017

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с интенсивным развитием цифровых систем передачи и обработки информации актуальной задачей является обеспечение высокой ее достоверности. Эффективным способом решения этой задачи является применение помехоустойчивого кодирования информации. Следовательно, выбор помехоустойчивого кода, метода кодирования и алгоритма декодирования информации является актуальной задачей теории и практики помехоустойчивого кодирования.

Наиболее заметным достижением в теории помехоустойчивого кодирования за последнее десятилетие безусловно является изобретение турбо-кодов. Турбо-код – мощная техника исправления ошибок, которая выигрывает у всех известных предыдущих схем кодирования. Он может использоваться в любой системе связи, где существенна экономия энергии и отношение сигнал/шум низко. Например, космические коммуникации, микроволновые системы связи, цифровое спутниковое телевидение.

Турбо-коды с уверенностью можно назвать одними из наиболее востребованных в современных сетях. Такие коды обеспечивают лучшие показатели энергетической эффективности звена передачи данных. Только при переходе к итеративным процедурам обработки информации декодер турбо-кода по своим характеристикам максимально приближается к известному из общей теории связи пределу.

Разработка турбо-кодов (ТК) развивается по двум направлениям:

- сверточные турбо-коды (СТК), которые формируются путем параллельного соединения двух или большего числа сверточных кодеров;
- блочные турбо-коды (БТК), или турбо-коды произведения (Turbo Product Code, ТРС), которые формируются путем последовательного соединения двух или большего числа блочных кодеров.

Целью дипломной работы является рассмотрение особенностей турбо-

кодов, изучение и сравнение методов кодирования и декодирования турбо-кодов, на основании чего требуется выбрать наиболее оптимальный алгоритм декодирования и реализовать программы турбо-кодер и турбо-декодер.

Дипломная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников и 3 приложений. Общий объем работы – 59 страниц, из них 40 страниц – основное содержание, включая 25 рисунков, список использованных источников из 20 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

### *1 Кодирование*

В этом разделе рассматриваются методы кодирования сверточных и блочных турбо-кодов.

В подразделе 1.1 “Кодер сверточного турбо-кода” проиллюстрированы схемы сверточных двухразмерных и  $n$ -пространственных турбо-кодеров, а также описан принцип работы данных схем. Главный принцип турбо-кодирования – использование двух параллельно работающих элементарных кодеров. При этом информационный блок кодируется дважды, причем второй раз – после предварительного случайного перемежения.

В подразделе 1.2 “Кодер сверточного кода” рассматриваются параметры сверточных кодов, оказывающие важное влияние на свойства формируемого составного сверточного турбо-кодера. Сверточные коды – это коды, исправляющие ошибки, которые используют непрерывную, или последовательную обработку информации короткими фрагментами. В реальных системах передачи информации широкое применение получили турбо-декодеры, реализуемые на основе *рекурсивных сверточных кодов*. *Рекурсивный сверточный код* – это разновидность сверточного кода, в котором входные информационные символы передаются непосредственно на выход кодера, а проверочные (избыточные) символы формируются (генерируются) логической цепью, содержащей регистр сдвига с обратной связью. Выходные значения нерекурсивного кода зависят лишь от информационных бит, которые хранятся в ячейках памяти, в то время как в рекурсивном коде учитываются выходные биты.

Поскольку при использовании сверточных кодов в реальных системах связи входная последовательность делится на блоки определенной длины, встает задача корректного окончания кодирования. В подразделе 1.3 “Процесс рандомизации (завершения) процедуры кодирования данных сверточными кодами” рассматриваются методы корректного окончания кодирования.

В подразделе 1.4 “Блочные турбо-коды” проиллюстрирована схема блочного турбо-кодера, а также описан принцип работы данной схемы.

Перемежитель оказывает влияние на минимальное расстояние и количество кодовых слов низкого веса, определяющих эффективность турбо-кода. Длина перемежителя в значительной степени влияет на производительность кода и чем она больше, тем лучше код. Типы перемежителей и их сравнение описаны в подразделе 1.5 “Перемежители”.

## 2 Декодирование

В этом разделе рассматривается общий принцип турбо-декодирования, а также изучаются и сравниваются алгоритмы сверточного турбо-декодирования.

Существует два типа помехоустойчивых кодов, основанных на принятой последовательности действительных чисел:

- 1) Декодирование с жестким решением (hard decision decoding) (HDD): при формировании жестких решений относительно принятых из канала величин происходят ошибки. Цель HDD состоит в исправлении двоичных ошибок, возникших в процессе выбора жестких решений.
- 2) Декодирование с мягким решением (soft-decision decoding) (SDD); принятые из канала величины вводят непосредственно в декодер для формирования оценок кодовой последовательности. Особым случаем SDD является декодирование по максимуму правдоподобия (maximum-likelihood decoding) (MLD или МПД), при котором в качестве решения декодера выбирается ближайшая (в некоторой метрике) кодовая последовательность. Здесь важно помнить, что для SDD необходимо знать статистику шума в канале связи.

В подразделе 2.1 “Декодирование с мягким решением” сравниваются два типа декодирования: с жестким и мягким решениями и обосновывается целесообразность применения декодирования с мягким решением для турбо-кодов.

Общий принцип декодирования турбо-кодов описан в подразделе 2.2 “Турбо-декодирование”.

Для декодирования сверточных турбо-кодов разработаны несколько итеративных алгоритмов с вероятностными решениями:

- итеративный алгоритм максимума апостериорной вероятности (MAP);
- итеративный алгоритм логарифмического MAP (Log-MAP);
- итеративный алгоритм максимума Log-MAP (Max-Log-MAP);
- итеративный алгоритм Витерби с вероятностным решением (SOVA).

Сравнение этих алгоритмов происходит в подразделе 2.3 “Алгоритмы сверточного турбо-декодирования”. Алгоритмы Витерби, SOVA, MAP, Log-MAP, Max-Log-MAP описаны в подразделах 2.3.1 “Алгоритм Витерби”, 2.3.2 “Алгоритм SOVA”, 2.3.3 “Алгоритм MAP”, 2.3.4 “Алгоритм Log-MAP”, 2.3.5 “Алгоритм Max-Log-MAP” соответственно.

### *3 Преимущества и недостатки турбо-кодов. Их применение*

В подразделе 3.1 “Преимущества и недостатки турбо-кодов” описаны основные преимущества и недостатки турбо-кодов. Турбо-коды приняты к применению в системах мобильной связи третьего поколения и в системах коммуникаций в глубоком космосе (CCSDS). В подразделе 3.2 “Применение турбо-кодов” более подробно описано их применение.

### *4 Программная реализация турбо-кодера и турбо-декодера*

В ходе данной работы были реализованы программы на языке C#: турбо-кодер, канал с АБГШ, турбо-декодер. Программы турбо-кодер и турбо-декодер можно использовать для обнаружения и исправления ошибок в сообщении, при передаче его по зашумленному каналу. Описание этих программ представлено в данном разделе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены сверточные и блочные турбо-коды, изучены их особенности и различия. В качестве кодера для программной реализации был выбран сверточный турбо-кодер.

В ходе работы был описан принцип итеративного декодирования турбо-кодов на основе мягких декодеров сверточных кодов. Итеративный декодер является подоптимальным декодером, однако декодирование по максимуму правдоподобия турбо-кода сложно и не реализуемо, поэтому итеративный способ остается единственным и лучшим методом декодирования на данный момент.

В работе рассмотрены алгоритмы мягкого декодирования MAP, Log-MAP, Max-Log-MAP и SOVA. А также реализован турбо-декодер, у которого в качестве компонентного кода был выбран алгоритм Log-MAP.

Программы турбо-кодер и турбо-декодер можно использовать для обнаружения и исправления ошибок в сообщении, при передаче его по зашумленному каналу.

Таким образом, все поставленные задачи были полностью решены.

Развитие турбо-кодеров для АБГШ и каналов с замиранием показали большой потенциал этой техники кодирования для очень низких отношений сигнал/шум. Из-за их превосходной работы, ожидается, что турбо-кодеры станут стандартом, кодирующим технику этого столетия.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Королев, А. И. Турбокоды и итеративное декодирование : учеб.-метод. пособие / А. И. Королев, В. К. Конопелько. Минск : БГУИР, 2015. 74 с.
- 2 Васильев, В. И. Турбокод – основные характеристики, особенности применения и моделирования / В. И. Васильев, Т. Х. Хоанг // Вестник ВГУ. 2004. Сер. Физика, математика. № 2. С. 8-11.
- 3 Гладких, А. А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи / А. А. Гладких. Ульяновск : УлГТУ, 2010. 379 с.
- 4 Волкова, Т. В. Характеристика турбо-кодов / Т. В. Волкова, А. Н. Гамова // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования : сб. науч. статей межд. конференции. Барнаул : Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2015. С. 1067-1072.
- 5 Ташатов, Н. Н. Устройство кодера и декодера турбокода / Н. Н. Ташатов, Д. А. Ефимов // Астана : Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, С. 1.
- 6 Морелос-Сарагоса, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / Р. Морелос-Сарагоса. М. : Техносфера, 2005. 320 с.
- 7 Волкова, Т. В. Помехоустойчивое кодирование как метод обеспечения высокого уровня надежности передачи дискретной информации / Т. В. Волкова, А. Н. Гамова // Материалы девятнадцатой Всероссийской конференции по математике. Барнаул : Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2016. С. 93–94.
- 8 Никитин, Г. И. Сверточные коды : учеб. пособие / Г. И. Никитин. СПб. : СПбГУАП, 2001. 80 с.
- 9 StudFiles. Все для учебы. Некоторые сведения о сверточных кодах [Электронный ресурс] : [сайт]. URL: <http://www.studfiles.ru/dir/cat32/subj296/file2588/view3691.html> (дата обращения: 27.04.2015). Загл. с экрана. Яз. рус.

- 10 Волков, Л. Н. Системы цифровой радиосвязи. Базовые методы и характеристики : учеб. пособие / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. М. : Эхо Трендз, 2005. 392 с.
- 11 Сейтахметова, Р. Б. Помехоустойчивый турбо-код в системах связи / Р. Б. Сейтахметова, Н. Н. Ташатов // Материалы научно-практической конференции “Применение математического моделирования и информационных технологий в исследованиях социально-экономических проблем”. Астана, 2011. С. 187.
- 12 Варгаузин, В. А. Турбо-коды и итеративное декодирование: принципы, свойства, применение / В. А. Варгаузин, Л. Н. Протопопов // Телемультимедиа, 2000, № 4. С. 33-35.
- 13 Воробьев, К. А. Сравнение и анализ характеристик блочных и сверточных турбокодов / К. А. Воробьев, С. С. Аджемов // Технологии информационного общества, 2012. С. 3.
- 14 Золотарев, В. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы : справочник / В. В. Золотарев, Г. В. Овечкин ; под. ред. чл.-кор. РАН Ю. Б. Зубарева. М. : Горячая линия – телеком, 2004. 126 с.
- 15 Небаев, И. А. Итеративное декодирование сверточных турбокодов : учеб. пособие для курсовой работы / И. А. Небаев. СПб. : СПбГУТ, 2013. 38 с.
- 16 Буданов, А. В. Декодирование блочных турбокодов : учеб. пособие / А. В. Буданов, И. А. Небаев. СПб. : СПбГУТ, 2013. 26 с.
- 17 Кондаков, А. В. Исследование помехоустойчивости турбо-кодов / А. В. Кондаков // Молодежный научно-технический вестник : ФГБОУ ВПО “МГТУ им. Н.Э. Баумана”. С. 1.
- 18 Вишневский, В. М. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G / В. М. Вишневский, С. Л. Портной, И. В. Шахнович. М. : Техносфера, 2009. 472 с.
- 19 Топалов, В.В. Модификация двунаправленного итеративного алгоритма Витерби с вероятностным решением для декодирования турбо-кодов / В.В. Топалов // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. 2007. № 2. С. 1.
- 20 Маркина, К. Методы канального кодирования: турбо-коды, 2011.

[Электронный ресурс] : [сайт]. URL: <http://omoled.ru/publications/view/7> (дата обращения: 18.12.2016). Загл. с экрана. Яз. рус.