

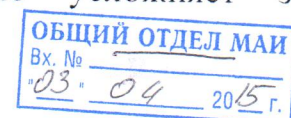
## ОТЗЫВ

официального оппонента Овечкина Геннадия Владимировича на диссертационную работу Кирьянова Ивана Андреевича на тему: «Декодирование кодов с малой плотностью проверок на четность», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук в диссертационный совет Д 212.125.02 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по специальности 05.12.13 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

### Актуальность темы

Основные тенденции развития современных информационных систем связаны со значительным увеличением объемов обрабатываемой информации и необходимостью обеспечения высокой надежности ее передачи. Ключевой технологией, позволяющей эффективно решить эти задачи, является помехоустойчивое кодирование. К настоящему времени теория помехоустойчивого кодирования достаточно хорошо разработана. Открыты и исследованы такие мощные помехоустойчивые коды как коды Рида-Соломона, турбокоды, коды с низкой плотностью проверок по четности и самоортогональные коды, декодируемые многопороговыми алгоритмами.

Одними из лучших по обеспечиваемой достоверности являются коды с низкой плотностью проверок на четность (Low-Density Parity-Check – LDPC). Показано, что теоретически с их помощью можно обеспечить работу при уровне шума, всего на несколько сотых дБ меньшем пропускной способности канала. Однако при практическом использовании таких кодов разработчики сталкиваются с необходимостью решения ряда задач, в основном связанных с наличием ограничений, накладываемых используемыми при реализации декодера аппаратными средствами. Следует отметить, что в настоящее время известно несколько семейств алгоритмов декодирования низкоплотностных кодов, отличающихся друг от друга обеспечиваемой достоверностью, требуемыми объемами памяти и вычислительной сложностью. Но информация об их основных характеристиках изложена в различных источниках и не всегда представлена в приемлемом для сравнения виде, что существенно усложняет задачу



разработчикам.

В этой связи тематика диссертационной работы Кирьянова И.А., в которой выполняется сравнительный анализ существующих алгоритмов декодирования низкоплотностных кодов, а также предлагаются алгоритмы для уменьшения затрат ресурсов для их реализации, является актуальной.

### **Структура диссертации, обоснованность и достоверность положений выводов и рекомендаций**

Диссертационная работа Кирьянова И.А. состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов по работе и списка литературы из 95 наименований.

Как следует из введения, целью диссертационного исследования является разработка и исследование алгоритмов декодирования LDPC кодов.

Для достижения этой цели в первой главе автором введены основные понятия, связанные с низкоплотностными кодами, определены коды, на примере которых будет проводиться дальнейшее исследование (LDPC коды спутниковой телекоммуникационной подсистемы передачи эфемеридной и служебной информации наземным потребителям с использованием сигнала L1C), выполнена классификация, описание и анализ известных алгоритмов их декодирования. Также в главе сформулирована предлагаемая методика по выбору наилучшего алгоритма декодирования для заданных условий.

Во второй главе выполнена оценка вычислительной сложности всех рассмотренных алгоритмов декодирования, а также предложены две модификации алгоритмов, позволяющие уменьшить вычислительные затраты декодера без ухудшения качества декодирования при незначительном увеличении требуемого объема памяти.

Третья глава посвящена исследованию эффективности алгоритмов декодирования низкоплотностных кодов с помощью имитационного моделирования. В главе описана созданная имитационная модель, выполнено планирование эксперимента, позволяющее получать оценки вероятности ошибки декодирования с относительной погрешностью порядка 10% при достоверности 0,997, предложена методика представления разреженной проверочной матрицы

низкоплотного кода, позволяющая в два раза снизить объем памяти для ее хранения. Также получены результаты исследования зависимости вероятности битовой ошибки на выходе декодера от уровня шума в гауссовском канале связи при двоичной фазовой модуляции для всех описанных алгоритмов декодирования низкоплотных кодов. При этом были оценены значения параметров алгоритмов, дающих наилучший результат для заданных условий моделирования.

Материал четвертой главы посвящен исследованию эффективности декодирования низкоплотных кодов при обработке реального сигнала L1С. В главе обсуждается предложенная методика выбора алгоритма декодирования низкоплотного кода, которая позволяет при заданных требованиях к обеспечиваемой вероятности ошибки и уровне шума выбрать декодер, обладающий наименьшей вычислительной сложностью, а также содержится решение частных задач, возникающих при декодировании сигнала L1С. В частности, выполнено исследование эффективности декодирования БЧХ кода, используемого для кодирования номера кадра L1С, представлен анализ структуры и результатов декодирования реального сигнала L1С, а также описана возникающая при обработке сигнала L1С при высоком уровне шума задача идентификации инверсии битового потока. Для данной задачи предложено и исследовано несколько способов решения, основанных на использовании внутренних ресурсов низкоплотных кодов.

В пятой главе подробно описаны конкурирующие с низкоплотными кодами турбо коды произведения, приведены алгоритмы их декодирования. Также выполнен сравнительный анализ эффективности и вычислительной сложности алгоритмов декодирования низкоплотных кодов и турбо кодов произведения.

Основные результаты диссертационной работы достаточно обоснованы, подтверждены корректным использованием методов теории помехоустойчивого кодирования и математической статистики.

Достоверность выводов и рекомендаций в работе подтверждается результатами сравнительного анализа полученных результатов имитационного моделирования и результатов, представленных в литературных источниках.

Название диссертации верно отражает ее содержание, а ее материалы достаточно полно отражены в научных публикациях автора. Автореферат соответствует основным положениям диссертационной работы.

Язык изложения диссертации и автореферата отличается четкостью, а используемая терминология вполне корректно отражает предметную область.

Тематическая ориентация работы, ее содержание и основные результаты соответствуют требованиям паспорта специальности 05.12.13 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

### **Новизна исследований и результатов диссертационной работы**

В работе получены следующие результаты, имеющие научную новизну:

1. Получены унифицированные соотношения для расчета сложности итерации различных алгоритмов декодирования регулярных и нерегулярных низкоплотностных кодов, позволяющие выполнять их сравнение.

2. Выполнено исследование статистических характеристик различных алгоритмов декодирования низкоплотностных кодов сигнала L1C.

3. Обоснована методика выбора алгоритма декодирования низкоплотностного кода, обеспечивающего требуемую вероятность ошибки при заданном уровне шума и наименьшей сложности декодирования.

4. Предложена методика компактного представления разреженной проверочной матрицы низкоплотностного кода, позволяющая уменьшить объем памяти для ее хранения.

5. Предложены модификации алгоритмов, позволяющие повысить вычислительную эффективность декодирования без потери исправляющей способности при незначительном увеличении требований к памяти для хранения внутренних переменных декодера.

6. Обоснован новый способ идентификации инверсии битового потока за счет внутренних ресурсов LDPC декодера и исследована его работа на реальном сигнале.

### **Практическая ценность результатов работы**

Научные результаты, полученные Кирьяновым И.А., могут использоваться разработчиками систем передачи данных при выборе и реализации алгоритмов

декодирования низкоплотностных кодов, обеспечивающих заданные показатели качества при ограничениях на вычислительную сложность алгоритма и используемые объемы памяти. О практической значимости диссертации свидетельствуют результаты внедрения основных научных результатов и выводов диссертационной работы в ООО «Топкон Позизионинг Системс» (г. Москва).

### **Критические замечания**

1. Из текста диссертации не понятно, каким образом было получено заявленное на стр. 65 увеличение в скорости декодирования в три раза.
2. В расчетах объема эксперимента, требующегося для обеспечения заданных точности и достоверности результатов, не учитывается, что ошибки на выходе декодера низкоплотностных кодов могут группироваться в пакеты. Также не оценена точность результатов, полученных на реальном сигнале.
3. В тексте диссертации не обосновано, почему для сравнения с низкоплотностными кодами с кодовой скоростью  $1/2$  автор выбрал турбо коды произведения с кодовой скоростью  $2/3$ .
4. Некоторые выводы в диссертации содержат очевидные утверждения. Например, «Переход от использования «жестких» решений к «мягким» при декодировании рассматриваемого кода БЧХ позволяет повысить его корректирующую способность» (стр. 110), «Моделирование работы турбо кодека ... выявило зависимость вероятности ошибки на выходе декодера от числа генерируемых алгоритмом Чейза гипотез» (стр. 120).
5. В тексте диссертации предложен ряд вариантов аппроксимации функций гиперболического тангенса (стр. 85) и арктангенса (стр. 87). Однако, исходя из каких соображений были получены эти аппроксимации, в диссертации не рассматривается.
6. В приведенном примере использования методики выбора алгоритма декодирования все операции учитываются с одинаковым весом. Так как сложность операции зависит от элементной базы, следовало выполнить подобный расчет для некоторой конкретной элементной базы.

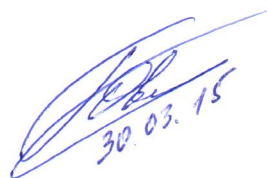
7. При получении некоторых выражений для оценки вычислительной сложности алгоритмов декодирования низкоплотных кодов операция изменения знака числа учитывается как умножение.

Отмеченные замечания не снижают уровня достигнутых научных и практических результатов и качества проведенных исследований.

### **Заключение**

Диссертация Кирьянова И.А. «Декодирование кодов с малой плотностью проверок на четность» является завершенной квалификационной работой, которая посвящена решению важной научно-технической задачи в области разработки методов повышения достоверности передачи цифровых данных, соответствует требованиям ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а И.А. Кирьянов достоин присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Официальный оппонент  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры вычислительной  
и прикладной математики ФГБОУ  
ВПО «Рязанский государственный  
радиотехнический университет,  
г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1,  
тел. +7(4912)46-03-64 e-mail:  
ovechkin.g.v@rsreu.ru



Геннадий Владимирович Овечкин

Подпись Овечкина Г.В. удостоверяю  
Ученый Секретарь Ученого Совета РГРТУ,  
к.т.н., доцент



В.Н. Пржегорлинский