

На правах рукописи



Акмалходжаев Акмал Илхомович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ
ДЕКОДИРОВАНИЯ ТУРБОКОДОВ В СИСТЕМАХ МОБИЛЬНОЙ
СВЯЗИ**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена на кафедре №51 Безопасности информационных систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Крук Евгений Аврамович

Официальные оппоненты: **Зяблов Виктор Васильевич**
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией №3 «Информационных технологий передачи, анализа и защиты информации» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук» (ИППИ РАН)

Трифонов Петр Владимирович
кандидат технических наук, доцент кафедры «Распределенных вычислений и компьютерных сетей» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого»

Ведущая организация: **Закрытое акционерное общество «Проектно-конструкторское бюро «РИО»**

Защита состоится « 15 » марта 2016 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.233.05 в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67, ауд. 53-01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" и на сайте университета www.guap.ru

Автореферат разослан « 15 » января 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Овчинников Андрей Анатольевич
к. т.н., доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время наблюдается активное развитие таких областей передачи информации, как мобильные сети и беспроводные технологии. Имеющиеся системы уже не удовлетворяют растущим требованиям к скорости доступа в сеть, качеству передачи видео, аудио контента и голоса. Для обеспечения требуемой мобильности пользователей и достоверности передачи данных внедряют новые решения, такие как OFDM, MIMO и др. Однако помехоустойчивое кодирование остается одним из основных способов гарантировать высокую скорость передачи информации при проектировании высокоскоростных цифровых систем связи. Различные конструкции помехоустойчивых кодов, алгоритмы их кодирования и декодирования рассматривают в своих работах такие российские ученые как В.В. Зяблов, К.Ш. Зигангиров, Е.А. Крук, Б.Д. Кудряшов и др. Важной является задача выбора наиболее подходящей конструкции для той или иной системы.

Турбокоды с уверенностью можно назвать одними из наиболее востребованных в современных сетях. Они доказали свою эффективность в стандартах WiMax и DVB-RCS. Но наибольшее распространение эти коды получили в мобильных сетях третьего и четвертого поколения UMTS и 3GPP LTE. Их широкое практическое применение обусловлено эффективным итеративным (турбо-) декодером, возможностью использования одного и того же кодера для различных длин информационных слов и гибкой схемой регулирования скорости кода.

Улучшение параметров турбокодов в разрабатываемых системах возможно за счет выбора компонентных кодов и перемежителя с одной стороны, и использования другого алгоритма декодирования с другой. Однако, принимая во внимание то, что в существующих стандартах и установленном оборудовании нет возможности изменить передающую часть, важной является задача улучшения параметров декодирования. Современные технологии и рост производительности аппаратной базы сделали возможным использование более сложных и оригинальных декодеров для уменьшения вероятности ошибки в принимаемых данных. Учитывая тот факт, что все большую популярность получает параллельная обработка, актуальной является задача разработки распараллеливаемых алгоритмов декодирования.

В данной диссертационной работе предлагается два способа улучшения декодера турбокода: списочное декодирование и совместное декодирование турбокода и кода источника. Оба подхода учитывают специфику передачи в современных мобильных сетях, это использование CRC для обнаружения ошибок в декодированном слове и структуру информационного слова, которая включает в себя заголовки протоколов различных уровней. Поскольку передача голоса остается одним из важнейших видов трафика и важным пунктом дохода операторов связи, основное внимание при разработке алгоритма совместного декодирования кодов канала и источника уделено источнику, который представляет собой вокодер. В частности результаты моделирования приведены для турбокода стандарта 3GPP LTE и вокодеров AMR-NB и AMR-WB.

Целью работы является исследование и разработка эффективных алгоритмов декодирования турбокодов с использованием техник списочного декодирования и совместного декодирования кодов канала и источника. Применение предложенных алгоритмов в сети 3GPP LTE для улучшения качества передачи речи.

Задачи диссертационного исследования:

1. Сравнительный анализ классических итеративных и списочных алгоритмов декодирования турбокодов.
2. Исследование методов повышения эффективности списочных декодеров турбокодов и разработка алгоритма, обеспечивающего уменьшение вероятности ошибки на пакет по сравнению с классическим турбо-декодером при задержке декодирования, приемлемой для практического использования.
3. Исследование и разработка алгоритма совместного декодирования турбокода и кода источника, который учитывает специфику передачи в современных сетях мобильной связи.
4. Исследование возможности списочного и совместного декодирования в системе сотовой связи стандарта 3GPP LTE для улучшения качества передачи речи.

Методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы методы теории информации, методы теории вероятностей и математической статистики, методы теории кодирования, а также методы имитационного моделирования.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан списочный алгоритм декодирования турбокода, который уменьшает вероятность ошибки на пакет по сравнению с классическим турбо-декодером при приемлемой для практического использования задержке декодирования, чего не позволяют существующие списочные подходы.
2. Предложена оконная модификация списочного декодера турбокода, позволяющая ускорить процесс генерации списка и уменьшить задержку декодирования за счет разбиения решетки сверточного кода на сегменты и независимого вычисления априорных последовательностей в каждом сегменте.
3. Разработан алгоритм совместного декодирования турбокода и кода источника, учитывающий наличие корреляционной зависимости лишь у части бит информационного слова, что значительно снижает эффективность известных алгоритмов.
4. Оценена избыточность на выходе вокодеров AMR-NB и AMR-WB и предложен алгоритм совместного декодирования турбокода и вокодеров AMR-NB и AMR-WB, обеспечивающий улучшение качества принимаемой речи в стандарте 3GPP LTE.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Ценность данной работы заключается в том, что внедрение и использование предложенных алгоритмов при декодировании на базовых станциях и

мобильных устройствах позволяет уменьшить вероятность ошибки на пакет и увеличить скорость передачи данных.

Степень достоверности результатов обеспечивается корректным использованием математического аппарата, обоснованностью используемых ограничений и допущений, использованием имитационного моделирования для оценки качества работы предложенных алгоритмов. Апробацией полученных результатов в виде докладов на научно-технических конференциях и публикациях в периодической печати.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: Научная сессия ГУАП (Санкт-Петербург, Россия, 2013); Всероссийской научной конференции по проблемам информатики «СПИСОК» (Санкт-Петербург, Россия, 2012, 2014); 14 международный симпозиум «Problems of Redundancy in Information and Control Systems» (Санкт-Петербург, Россия, 2014); Международная конференция «6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)» (Санкт-Петербург, Россия, 2014).

Внедрение результатов. Результаты работы были использованы в рамках проектов «On LTE turbo decoding performance improvement» и «VoLTE Quality Improvement and Non-intrusive Evaluation», осуществляемого ПАО «ИКТ». Кроме того, теоретические результаты работы используются в учебном процессе кафедры безопасности информационных систем ГУАП.

Личный вклад. Все результаты, представленные в тексте диссертационной работы, получены автором лично.

Публикации. Результаты, представленные в диссертационной работе, опубликованы в 9 печатных работах [1 – 9]. Из них 3 работы [1 – 3] опубликованы в изданиях, включенных в список ВАК, и 3 работы [7 – 9] опубликованы в изданиях, включенных в перечень «Scopus».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм списочного декодирования турбокода, уменьшающий вероятность ошибки на пакет по сравнению с классическим турбо-декодером.
2. Метод ускорения процесса генерации списка и уменьшения задержки декодирования списочного декодера турбокода.
3. Алгоритм совместного декодирования турбокода и кода источника, учитывающий наличие случайных бит в структуре информационного слова.
4. Алгоритм совместного декодирования турбокода и вокодеров AMR-NB и AMR-WB, обеспечивающий улучшение качества принимаемой речи в стандарте 3GPP LTE.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников (103 наименования). Диссертация содержит 126 страниц, включая 7 таблиц и 51 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлены задачи исследования, представлена научная новизна работы, апробация работы, описано внедрение, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведено краткое содержание диссертационной работы по разделам.

В первом разделе рассматривается структура турбокода и их итеративное декодирование. Так как основной частью схемы кодирования турбокода являются сверточный код и перемежитель, значительное внимание уделено описанию последних. Приведены результаты моделирования различных декодеров для турбокода стандарта 3GPP LTE.

В оригинальной работе Берроу и др. основными элементами схемы кодирования турбокода являются два рекурсивных систематических сверточных кода (компонентные коды), связанных между собой перемежителем (рисунок 1). Турбокод имеет скорость $R = 1/3$, а его кодовое слово выглядит как $\mathbf{v} = (\mathbf{u}, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$, где \mathbf{u} это информационное слово, а \mathbf{p}_1 и \mathbf{p}_2 проверочные биты первого и второго сверточных кодов, соответственно. Прежде чем поступить на вход второго сверточного кода, информационные биты проходят через перемежитель.



Рисунок 1 – Схема кодера турбокода

Ядром декодера турбокода являются два декодера сверточных кодов с мягким выходом, которые итеративно обмениваются информацией об информационных битах. Информацию, которой они обмениваются, часто называют внешней или априорной надежностью бит. Результаты моделирования турбо-декодеров в канале с АБГШ на основе алгоритмов Log-MAP, SOVA, Scaled Max-Log-MAP и Max-Log-MAP для информационного слова длины $k=1024$ представлены на рисунке 2. Сравнение алгоритмов между собой показывает, что SOVA и Max-Log-MAP значительно проигрывают по производительности алгоритму Log-MAP. В свою очередь Scaled Max-Log-MAP лишь незначительно уступает алгоритму Log-MAP, при том, что обладает значительно меньшей сложностью. Анализ сходимости турбо-декодеров показал, что в среднем после 6-ой итерации декодера рост производительности резко замедляется, в то время как после 8-ой итерации практически не заметен. Результаты представлены на рисунке 3.

Не смотря на то, что материалы раздела носят, в основном, обзорный характер, они позволяют сделать вывод о том, что алгоритм Scaled Max-Log-

MAP с точки зрения соотношения сложности и производительности является лучшим выбором для реализации в практических системах. Также полученные результаты говорят о том, что после 8 итераций декодера рост производительности значительно замедляется.

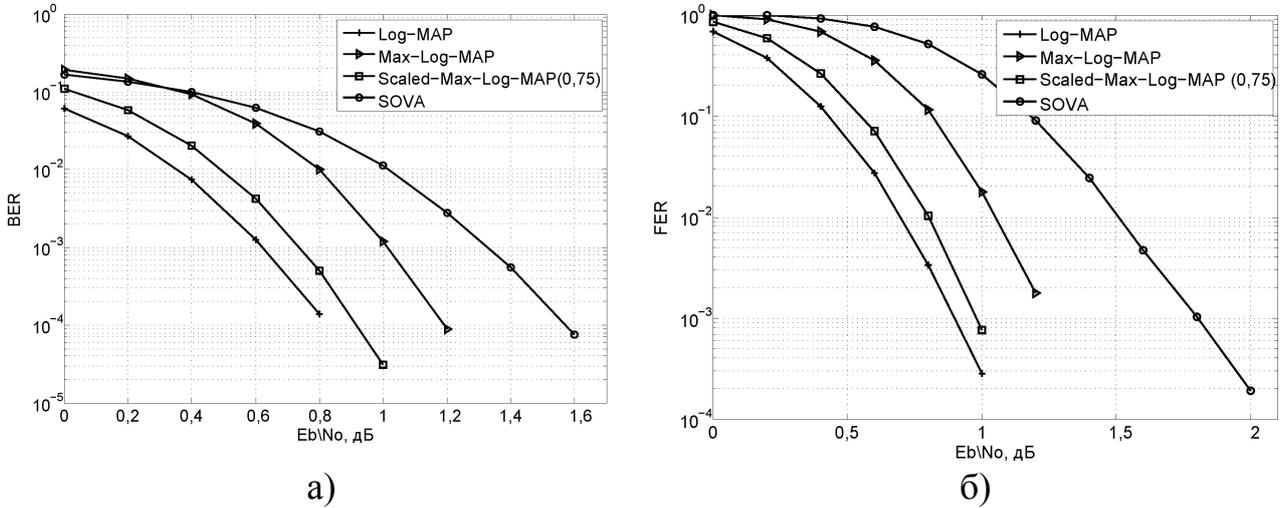


Рисунок 2 – Сравнение турбо-декодеров с различными компонентными декодерами

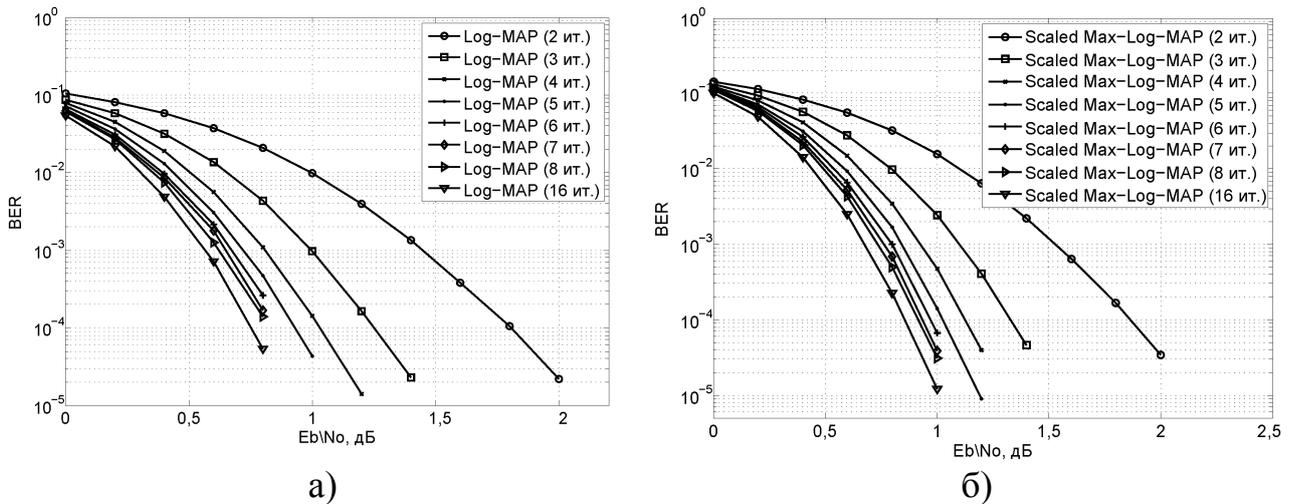


Рисунок 3 – Сравнение турбо-декодеров с различным числом итераций

Во втором разделе рассматривается задача независимого улучшения параметров декодирования турбокодов, для чего используется списочный подход. Приведен обзор списочных декодеров турбокода. Показано, что они обладают рядом ограничений, такие как высокая задержка декодирования и отсутствие выигрыша на длинах информационного слова более 40–60 бит, которые препятствуют их практическому применению. Предлагается новый списочный декодер турбокода, который позволяет уменьшить вероятность ошибки на пакет (FER) для больших длин информационного слова при задержке декодирования, сравнимой с классическим турбо-декодером.

Алгоритмы списочного декодирования турбокодов условно можно разделить на два типа: на основе списочного декодера сверточных кодов, в

качестве которого используется списочный алгоритм Витерби (List Viterbi Algorithm, LVA), или выполняющие декодирование по проверочной матрице турбокода. При декодировании по проверочной матрице турбокода используется алгоритм распространения доверия.

Анализ списочных декодеров на основе алгоритма LVA показал, что он позволяет уменьшить вероятность ошибки на пакет лишь в области ее насыщения, но не дает выигрыша в области ее спада, наиболее интересной с практической точки зрения. Также при помощи моделирования показано, что с ростом длины информационного слова выигрыш от использования списочного декодирования становится пренебрежимо малым, при этом увеличение размерности списка не дает улучшения.

Другая группа списочных декодеров для нахождения списка рассматривает алгоритм распространения доверия. Недостатком такого подхода является большая сложность декодера и необходимость хранения большого числа проверочных матриц для различных длин перемежителя. При этом моделирование показало, что, к примеру, для турбокода стандарта 3GPP LTE алгоритм дает выигрыш лишь на небольших длинах информационных слов (40-60 бит).

В данном разделе предлагается другой способ списочного декодирования – параллельное списочное декодирование. При использовании обычного турбо-декодера априорные надежности на входе первого компонентного декодера равны 0 и все биты считаются равновероятными. Если же эти начальные значения можно вычислить и подать на вход турбо-декодера, то с большей вероятностью результат декодирования будет корректным. В случае, когда имеется несколько предположений о возможных значениях информационных бит, то можно рассмотреть список начальных априорных последовательностей, вычисленных в соответствии имеющимися предположениями. Тогда эти значения инициализируют список независимых турбо-декодеров, которые работают в параллель (рисунок 4). Так как различные априорные последовательности приводят к различному поведению турбо-декодеров, получается список декодированных слов. По аналогии с алгоритмом Д. Деклерка цель данного метода состоит в том, чтобы разные декодеры сошлись к разным информационным словам.

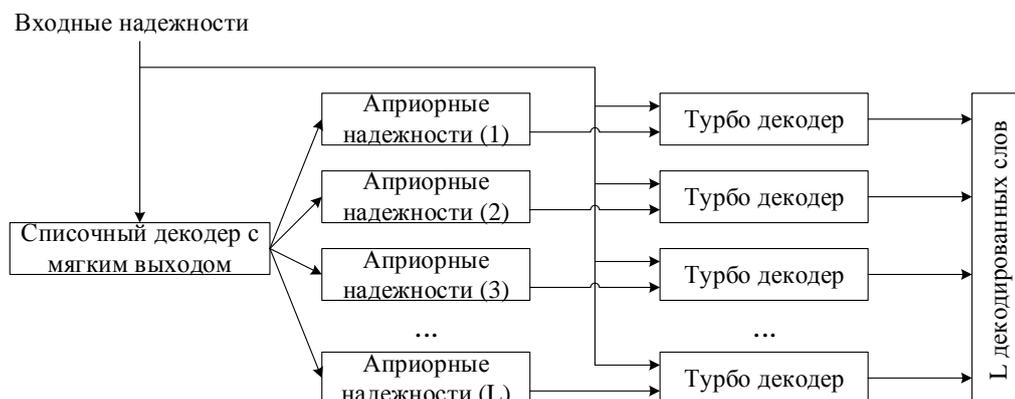


Рисунок 4 – Схема параллельного списочного декодера турбокода

Задержка декодирования при этом зависит от времени генерации списка априорных надежностей, а его результаты зависят от их значений. Если начальные значения заданы произвольно, то дальнейшее поведение декодера сложно предугадать. Поэтому для генерации списка мягких решений ниже предлагается использовать один из компонентных кодов и надежности, принятых из канала символов.

Предположим, что список генерируется на решетке первого компонентного кода, тогда для нахождения L элементов списка нужно выполнить следующие шаги:

1. Найти L самых вероятных путей в решетке сверточного кода с помощью списочного алгоритма Витерби.
2. Первый элемент списка равен внешним надежностям Log-MAP декодера.
3. Обозначим как B_i , где $i=(1, \dots, L)$, множество всех ребер в решетке, которые принадлежат пути i . Для нахождения j -го мягкого выхода:
 - a. Выколем из решетки все ребра, которые принадлежат множествам B_i для $i=(1, \dots, j-1)$, и вставим обратно ребра, которые принадлежат множеству B_j . Т.е. уберем из решетки все ребра из множества $\bigcup_{i=1}^{j-1} B_i - \bigcup_{i=1}^{j-1} (B_i \cap B_j)$.
 - b. Выполним Log-MAP алгоритм на решетке с выколотыми ребрами. Рассчитанные внешние надежности являются j -ым элементом списка.
 - c. Повторим шаги a–b для получения всех элементов списка в текущем окне.

Log-MAP алгоритм, выполненный на решетке с выколотыми ребрами, рассчитывает априорные надежности без вклада предположительно ошибочных переходов. Так как эти переходы принадлежат лучшим путям и имеют большой вес, то они сильно влияют на итоговые априорные значения. Таким образом, при расчете априорных вероятностей бит на редуцированной решетке делается попытка избавиться от этого влияния. В результате чего получаются другие априорные значения. По сути, алгоритм вычисляет мягкие решения для различных решеток, из которых удалены ложные переходы, т.е. мягкие выходы можно считать уточненными при переходе от одного элемента списка к другому. Удаляя из решетки такие ребра, которые будут рассмотрены в более ранних элементах списка, алгоритм пытается рассматривать менее вероятные альтернативные решения. Стоит отметить, что для расчета мягких решений может использоваться не только Log-MAP алгоритм, но и его подоптимальные варианты Max-Log-MAP и Scaled Max-Log-MAP.

Для ускорения процесса генерации списка также предложен оконный вариант алгоритма, который основан на оконном списочном LVA декодере и оконном Log-MAP алгоритме. Для нахождения списка длины L в каждом окне нужно выполнить следующие шаги:

1. Разбить решетку сверточного кода на Z окон, которые в дальнейшем считаются независимыми.

2. Для каждого окна, чтобы получить список мягких решений выполнить следующие действия:
 - a. Найти L самых вероятных путей в окне решетки сверточного кода с помощью оконного списочного алгоритма Витерби.
 - b. Первый элемент списка равен внешним надежностям оконного Log-MAP декодера.
 - c. Обозначим как B_i^z , где $i = (1, \dots, L)$, множество всех ребер в z -ом окне решетки, которые принадлежат пути с номером i . Для нахождения j -го мягкого выхода:
 - i. Выколем из решетки все ребра, которые принадлежат множествам B_i^z , для $i = (1, \dots, j-1)$, и вставим обратно ребра, которые принадлежат множествам B_j^z . Т.е. выколем из решетки все ребра из множества $\bigcup_{i=1}^{j-1} B_i^z - \bigcup_{i=1}^{j-1} (B_i^z \cap B_j^z)$.
 - ii. Выполним оконный Log-MAP алгоритм в окне решетки с выколотыми ребрами. Рассчитанные внешние надежности являются j -ым элементов списка.
 - iii. Повторим шаги i – ii для получения всех элементов списка в текущем окне.

Для того, чтобы найти мягкое решение для всего информационного слова, в каждом окне берется по одному элементу списка и их конкатенация является элементом итогового списка. Экспоненциальный рост длины общего списка не позволяет использовать полный перебор для нахождения последнего. В диссертационной работе предлагается алгоритм уменьшения размерности общего списка на основе расстояния Евклида.

Сложность предложенного алгоритма списочного декодирования турбокодов пропорциональна количеству турбо-процессов, которые были инициализированы. С учетом того, что наиболее популярным декодером турбокода является итеративный декодер на основе алгоритма Log-MAP и существуют эффективные методы его оптимизации применительно к конкретным кодам и системам, предложенный алгоритм может быть легко реализован и внедрен, с использованием существующих наработок, быстрых реализаций и оптимизаций на затрачиваемые ресурсы и память.

Для оценки работы предложенных алгоритмов был рассмотрен турбокод стандарта 3GPP LTE. Для генерации списка и турбо-декодирования использовался алгоритм Scaled Max-Log-MAP. Поскольку в стандарте 3GPP LTE на физическом уровне к информационному слову добавляется проверка CRC, она была использована для нахождения правильного элемента в списке.

Результаты моделирования приведены на рисунке 5. На графиках видно, что на малых длинах информационного слова выигрыш от использования списочного декодера варьируется от 0,1 до 0,4 дБ по вероятности ошибки на пакет для списка от 2 до 16 последовательностей. На больших длинах эффект от списочного декодирования уменьшается, однако достигает не менее 0,15 дБ, чего не могут обеспечить другие списочные декодеры турбокодов с

реализуемой сложностью. Результаты работы оконного алгоритма приведены на рисунке 6. Длина окна была фиксирована в интервале от 40 до 64 бит. При моделировании решетка была разбита на фрагменты одинаковой длины, итоговый размер списка обозначен как L_f . Для информационного слова длины $k = 112$ бита решетка была разбита на 2 окна, в то время как для $k = 320$ использовалось 8 окон.

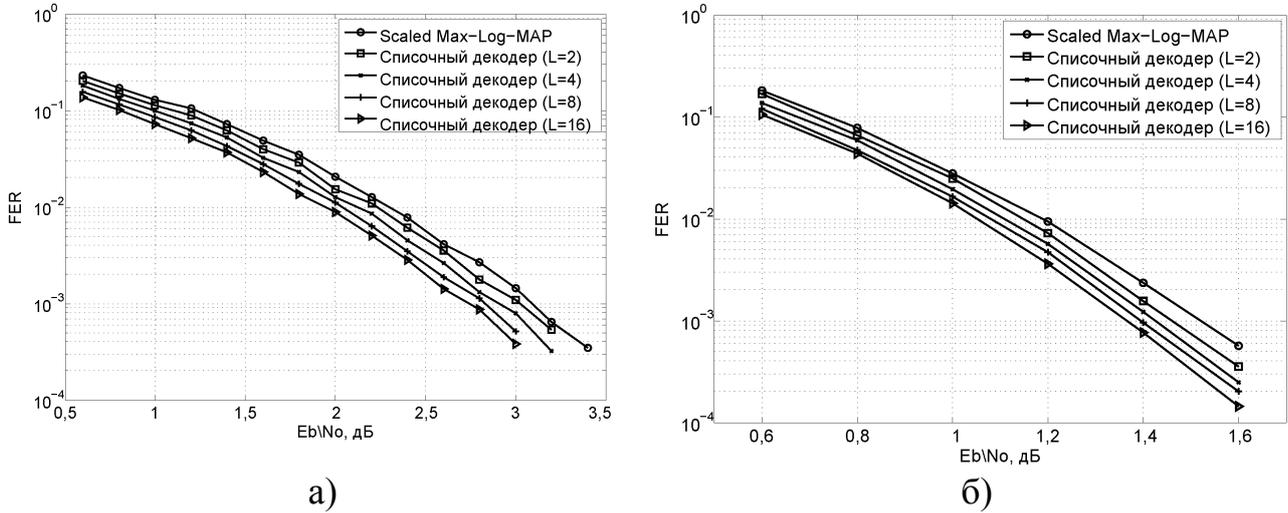


Рисунок 5 – Результат моделирования списочного турбо-декодера: а) $k = 40$, б) $k = 320$

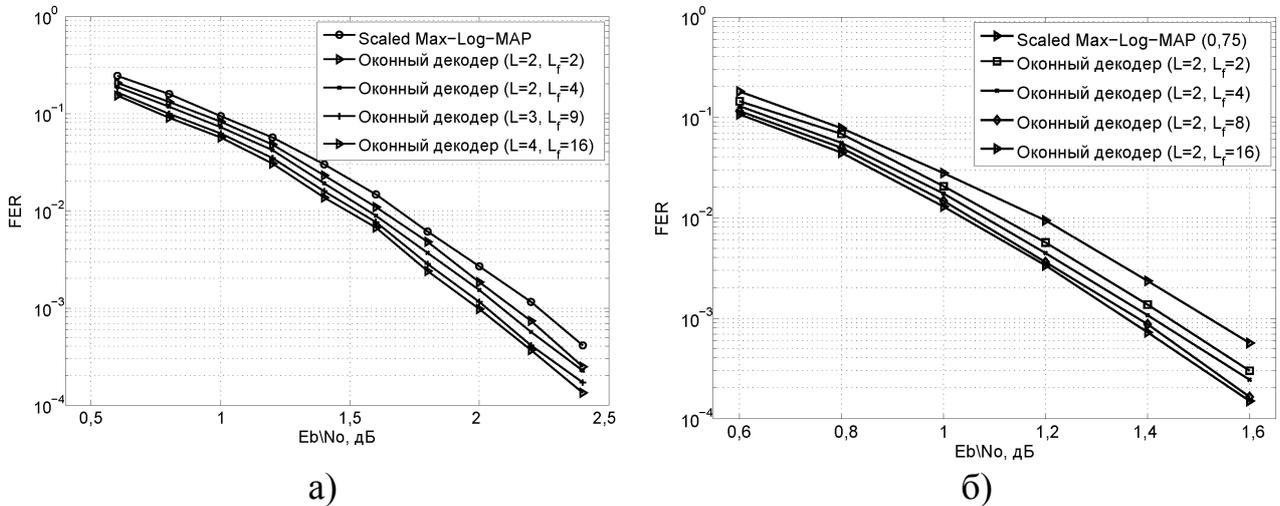


Рисунок 6 – Результат моделирования списочного турбо-декодера при оконном подходе к генерации списка: а) $k = 112$, б) $k = 320$

Третий раздел посвящен задаче совместного декодирования кодов канала и источника (СДКИ). С точки зрения теории информации задачу сжатия источника и передачи информации по каналу связи можно решать независимо. Однако на практике ввиду ряда ограничений более эффективной может оказаться совместная обработка.

Рассмотрим кодер источника, выход которого представляет собой последовательность символов одинаковой длины, которые группируются в пакеты (фреймы) на входе кодера канала. Обозначим такой пакет как $\mathbf{I} = (I_1, I_2,$

..., I_m), где I_i это i -ый символ пакета, длина которого равна q битам. Каждый символ такого кодера может принимать $Q = 2^q$ значений. В этом случае избыточность кодера источника можно описать как:

1. различная вероятность появления символов на выходе кодера источника;
2. межсимвольная зависимость или корреляция в рамках одного пакета данных;
3. межсимвольная зависимость или корреляция между пакетами данных.

Первый тип избыточности определяется вероятностями $P(I_i)$ и если вероятность того, что некоторый i -ый символ примет одно из Q значений не равна $1/Q$, то данная информация может быть использована на канальном декодере, как некоторое априорное знание об информационных битах. Следовательно, встает задача использования второго и третьего типа избыточности. Поскольку их природа одинакова, в разделе в целях простоты обозначения и описания все выкладки приведены для межсимвольной зависимости в рамках одного пакета.

Корреляция между символами определяется вероятностями $P(I_i|I_{i-1}, \dots, I_1)$. Чаще всего эту связь рассматривают как Марковский процесс первого порядка, который характеризуется зависимостями между соседними символами

$$P(I_i|I_{i-1}, \dots, I_1) = P(I_i|I_{i-1}). \quad (1)$$

Для многих приложений такое предположение справедливо, в частности для речевых кодеков.

Для кода источника, избыточность которого описывается Марковским процессом первого порядка, может быть выписана полносвязная решетка с Q состояниями и m секциями. Для оценки значений символов кода источника в такой системе можно использовать алгоритм BCJR, который позволяет рассчитать апостериорные вероятности $P(I_i|\mathbf{r})$. В случае совместного декодирования кода источника и турбокода декодер источника может быть внедрен непосредственно в итеративный декодер турбокода, как показано на рисунке 7.

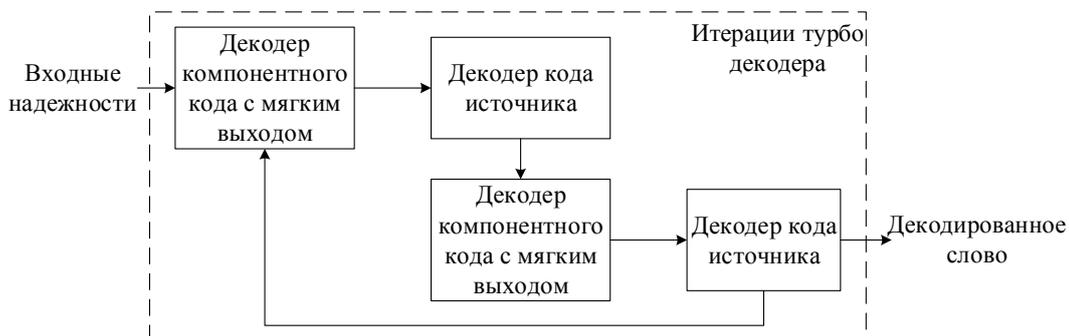


Рисунок 7 – Итеративная схема декодирования избыточности источника и турбокода

Часто на практике лишь часть данных на выходе кодера источника обладает избыточностью, к тому же информационное слово содержит протокольные заголовки, которые также считаются случайными. Пример информационного слова в системе 3GPP LTE проиллюстрирован на рисунке 8.

Тогда при совместном декодировании декодер источника будет использовать известную избыточность лишь части пакета и при итерировании передавать априорные вероятности для соответствующих бит. В этом случае применение совместного декодера даст незначительный выигрыш.

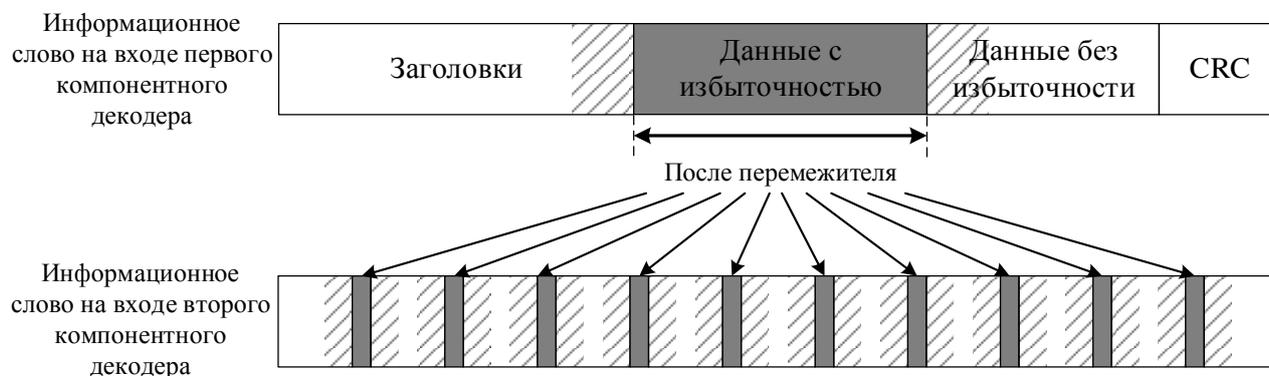


Рисунок 8 – Пример влияния коррелированных на процесс совместного турбо-декодирования (заштрихованные области соответствуют области влияния СДКИ)

Для улучшения параметров совместного декодирования при таком сценарии предложен следующий алгоритм. Предположим, что выход источника обладает высокой избыточностью и в результате СДКИ после нескольких итераций совместного турбо-декодера коррелированные биты были декодированы корректно. Тогда можно говорить о том, что они бесконечно надежны и такие биты можно назвать опорными битами или пилотными. Если при декодировании турбокода имеется информация о таких опорных битах, то благодаря перемежителю их влияние на декодированное слово будет значительно больше, что продемонстрировано на рисунке 8. Следовательно, чтобы увеличить вероятность корректного декодирования всего слова, надежности успешно декодированных бит источника можно установить равными $\pm\infty$ в зависимости от значения бита. После этого, чтобы распространить влияние высоконадежных позиций на все слово, необходимо выполнить несколько дополнительных итераций обычного турбо-декодирования, т.к. биты источника уже считаются известными и совместное декодирование нецелесообразно.

Однако не всегда благодаря избыточности можно корректно декодировать биты источника. Несмотря на это, очевидно, что биты, которые соответствуют коррелированным символам источника, будут декодированы лучше при совместном декодировании, т.е. вероятность ошибки на бит в последних будет меньше чем в других частях декодированного слова. Используя это наблюдение, можно усилить эффект от совместного декодирования. Оставшиеся ошибки в коррелированных битах после СДКИ можно исправить с помощью списочного алгоритма Витерби. Однако использовать алгоритм Витерби нужно не для всего информационного слова, а лишь для части, где

расположены данные с избыточностью. Поскольку эффективность списочного декодирования на коротких длинах выше, с большей вероятностью можно рассчитывать на то, что при таком подходе будет найдена корректная битовая последовательность. Поскольку на входе первого компонентного кода коррелированные биты источника сгруппированы (рисунок 8), то список должен строиться с использованием решетки первого компонентного кода.

Таким образом, новый совместный списочный декодер формулируется для двух случаев. Если есть возможность определить правильную последовательность в списке, и если такой возможности нет. Для первого случая в качестве проверки корректности последовательности может служить отдельное CRC, которое вычисляется для бит на выходе кодера источника. Тогда схема декодера будет выглядеть, как показано на рисунке 9. Для второго случая, когда нет возможности проверки корректности последовательности на выходе списочного декодера Витерби, делается предположение, что любой элемент списка может быть потенциально корректным. Тогда результирующий декодер примет вид, показанный на рисунке 10. В результате декодирования рассчитывается список слов, из которых можно выбрать правильное с помощью CRC физического уровня.

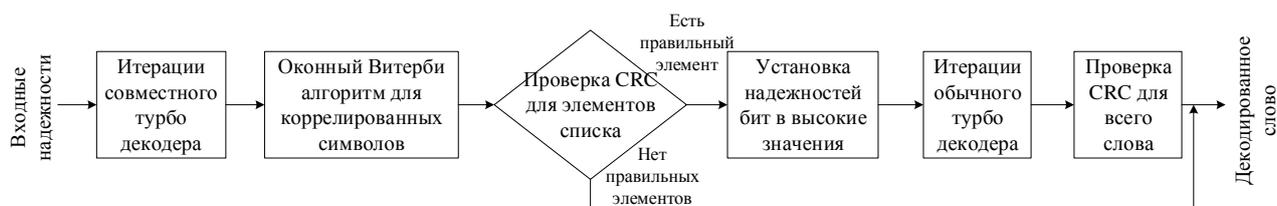


Рисунок 9 – Схема совместного турбо-декодера №1



Рисунок 10 – Схема совместного турбо-декодера №2

Поскольку результат СДКИ сильно зависит от типа источника и других параметров системы, работа предложенного алгоритма и результаты сравнения с классическим декодером приведены на примере передачи голосовых данных в системе 3GPP LTE. В стандарте 3GPP LTE кодирование речи осуществляется с помощью одного из двух алгоритмов: AMR-NB или AMR-WB. Оба кодека поддерживают несколько возможных степеней сжатия или скоростей передачи. В работе основное внимание уделено ключевым режимам 12,2 Кбит/с и 12,65 Кбит/с для AMR-NB и AMR-WB, соответственно.

Основными параметрами, которые рассчитываются и передаются при сжатии в кодеке AMR, являются коэффициенты артикуляторного фильтра,

индексы и коэффициенты адаптивной и фиксированной кодовых книг. В результате анализа получено, что наибольшей корреляцией обладает индекс адаптивной кодовой книги, поскольку период основного тона, который он характеризует, мало меняется во времени. Также большой межфреймовой зависимостью обладают первый и второй индексы, отвечающие за передачу информации о коэффициентах артикуляторного фильтра. Меньшей избыточностью обладают коэффициенты усиления обеих кодовых книг. Во всех остальных параметрах избыточность практически отсутствует, в то время как кодовые последовательности фиксированной кодовой книги имеют случайный характер.

Поскольку в стандарте 3GPP LTE для пакета AMR предусмотрено два типа заголовков, с проверкой CRC для коррелированных бит источника и без последней, то для декодирования могут быть использованы оба предложенных алгоритма в зависимости от режима работы. При моделировании был рассмотрен алгоритм Scaled-Max-Log-MAP. Для предложенного декодера после 8 итераций совместного декодирования и построения списка выполнялось 8 итераций классического турбо-декодера. Длина списка оконного алгоритма LVA была принята равной 16. Поскольку FER не отображает улучшение качества голоса, вызванное использованием совместного декодера, дополнительно приведено сравнение качества принимаемой речи по критерию MOS-LQO (Mean Option Score – Listening Quality Objective). Значение MOS-LQO рассчитывалось алгоритмом PESQ.

В результате проведенного моделирования видно, что предложенный алгоритм для кодека AMR-NB позволяет получить выигрыш чуть больше 0,15 дБ по вероятности ошибки на пакет по сравнению с классическим турбо-декодером. Это продемонстрировано на рисунке 11(а) и этот результат не зависит от того учитывается CRC или нет. По шкале MOS выигрыш варьируется от 0,15 до 0,4 пунктов (рисунок 11(б)). Как видно из рисунка 12(а) и 12(б) для AMR-WB выигрыш по FER составляет порядка 0,14 дБ, однако выигрыш по MOS лежит в интервале от 0,18 до 0,4 пунктов. Меньший выигрыш по FER для AMR-WB по сравнению с AMR-NB связан с тем, что отношение числа коррелированных и случайных бит у AMR-NB выше.

В четвертом разделе произведен анализ возможного выигрыша, который может дать использование предложенного во втором разделе списочного декодера турбокода при передаче речевых данных в системе 3GPP LTE. В ходе проведенного в разделе анализа были выделены следующие ограничения для использования СДКИ:

1. Использовать СДКИ невозможно без глубокой межуровневой оптимизации при проектировании приемника.
2. Для различных источников избыточности может быть не достаточно для получения интересных результатов.

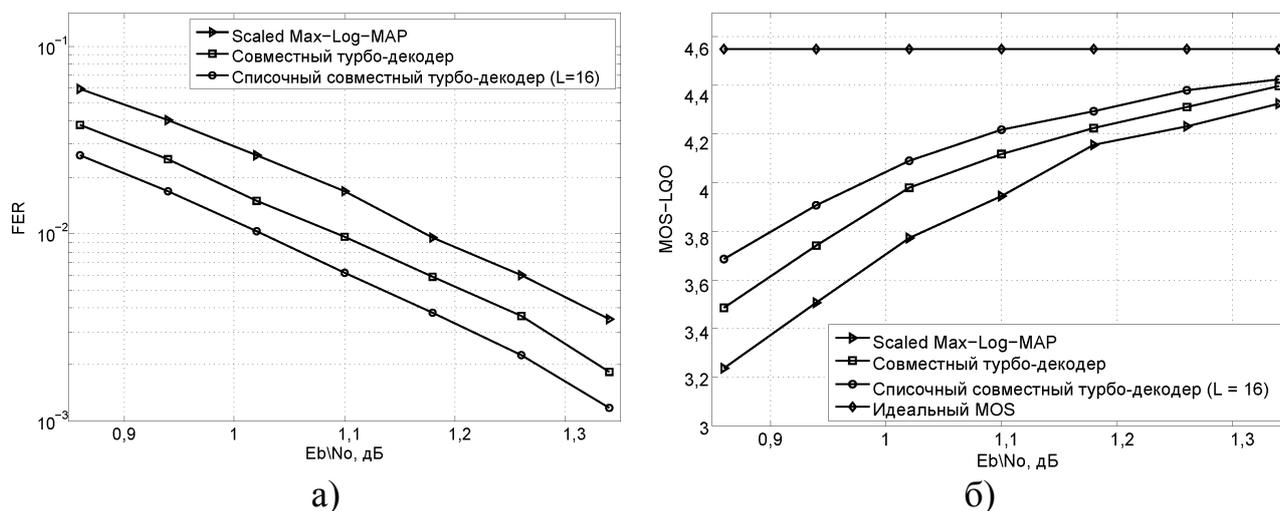


Рисунок 11 – Результаты моделирования совместного декодера (AMR-NB)

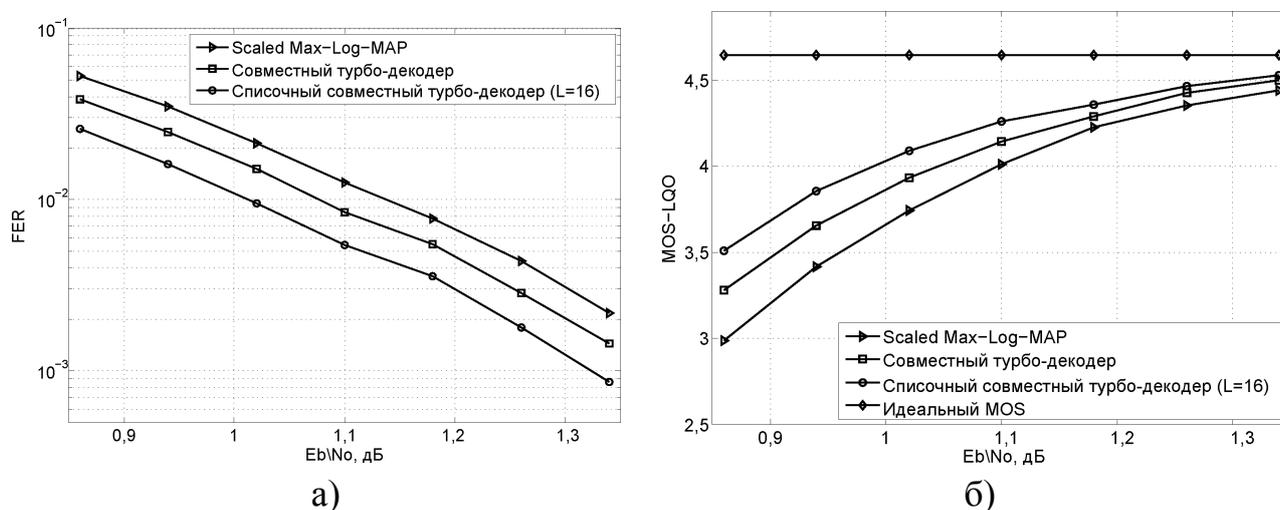


Рисунок 12 – Результаты моделирования совместного декодера (AMR-WB)

3. Для различных режимов сжатия данные с избыточностью могут иметь различный формат. Это ведет к тому, что необходимо хранить большое число матриц с переходными вероятностями.
4. В случае шифрования в сети совместное декодирование становится не возможным.

Поэтому применение универсального списочного декодера турбокода, который показывает стабильный прирост производительности на той или иной длине и не зависит от типа источника, является хорошим способом обеспечить требуемое качество передачи.

Анализ выполнен для основных режимов вокодеров AMR-NB и AMR-WB, которые обсуждались в предыдущем разделе. Дополнительно рассмотрены режимы 10,2 Кбит/с и 8,85 Кбит/с для AMR-NB и AMR-WB, соответственно. Для декодирования турбокода использован предложенный списочный декодер турбокода со списком $L=16$. Для оценки улучшения качества принимаемой речи приведены результаты вычисленных значений MOS-LQO. Как видно из графиков на рисунке 13, списочный декодер обеспечивает улучшение качества принимаемой речи на 0,18–0,5 MOS для AMR-NB в режиме 12,2 Кбит/с и на

0,18–0,45 MOS для режима 10,2 Кбит/с в зависимости от значений E_b/N_0 . Улучшение для AMR-WB составляет 0,15–0,5 MOS и 0,2–0,6 MOS для режимов 12,65 Кбит/с и 8,85 Кбит/с, соответственно (рисунок 14). Таким образом, предложенный списочный декодер в ряде случаев позволяет перевести качество принимаемой речи из класса «удовлетворительно» в класс «хорошо» по шкале MOS.

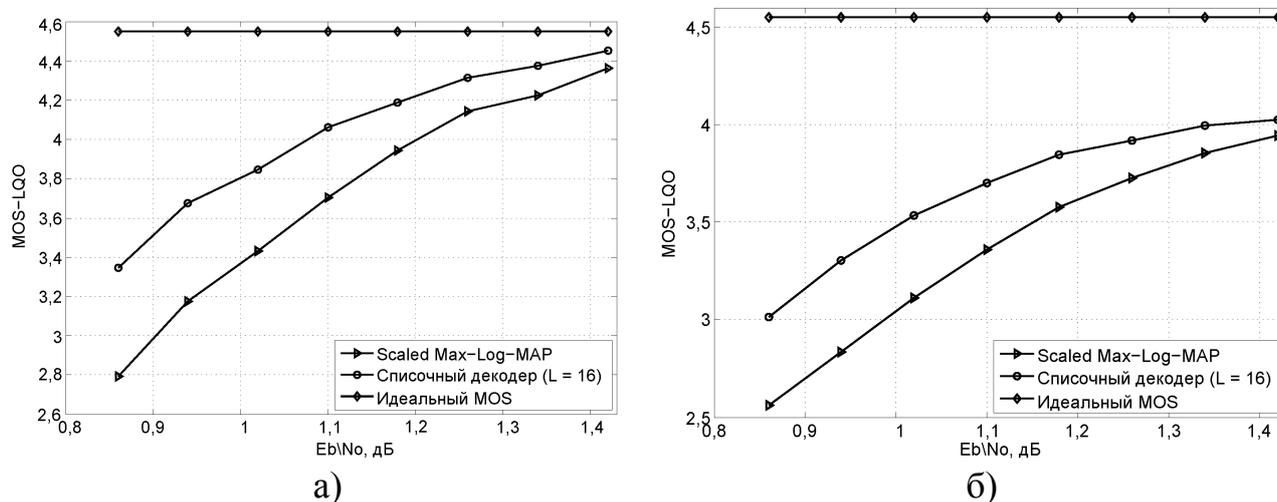


Рисунок 13 – Результаты моделирования списочного турбо-декодера для системы VoLTE и кодека AMR-NB: а) 12,2 Кбит/с, б) 10,2 Кбит/с

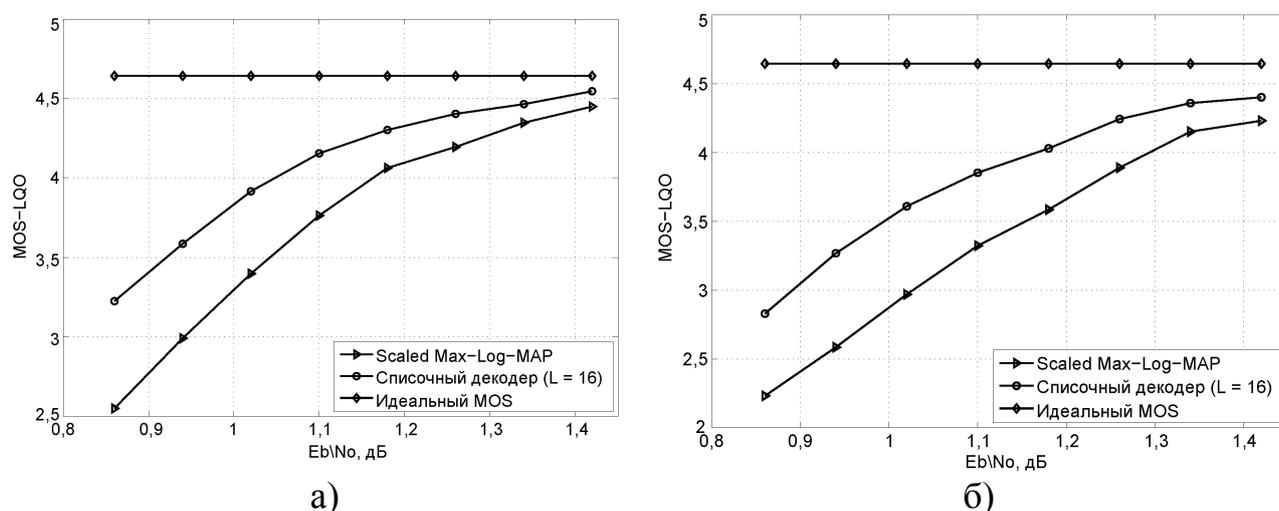


Рисунок 14 – Результаты моделирования списочного турбо-декодера для системы VoLTE и кодека AMR-WB: а) 12,65 Кбит/с, б) 8,85 Кбит/с

В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведено исследование списочных декодеров турбокодов. Показано, что существующие списочные алгоритмы дают уменьшение вероятности ошибки на пакет по сравнению с классическим турбо-

декодером лишь на малых длинах информационных слов. При увеличении длины слова эффективность рассмотренных алгоритмов резко снижается, и выигрыш становится незначительным, либо рост сложности алгоритма приводит к невозможности использования декодера.

2. Предложен алгоритм списочный декодирования турбокода, который позволяет уменьшить вероятность ошибки на пакет по сравнению с классическим турбо-декодером на 0,15-0,4 дБ в канале с АБГШ. При этом задержка декодирования алгоритма приемлема для его практического использования в сетях мобильной связи и близка к задержке классического турбо-декодера.
3. Предложена оконная модификация списочного декодера турбокода, которая позволяет ускорить процесс генерации списка и уменьшить задержку декодирования.
4. Разработан совместный декодер турбокода и кода источника, учитывающий наличие значительного числа случайных бит в информационном слове, которые не могут быть использованы для совместного декодирования и которые значительно снижают эффективность совместного декодирования в существующих подходах.
5. Разработан совместный декодер турбокода стандарта 3GPP LTE и вокодеров AMR-NB и AMR-WB. Проведен анализ избыточности данных на выходе вокодеров AMR-NB и AMR-WB для русской речи. Показано, что предложенный декодер уменьшает вероятность ошибки на пакет по сравнению с классическим турбо-декодером на 0,15 дБ. Улучшение качества принимаемой речи при этом варьируется от 0,15 до 0,4 пунктов по шкале MOS.
6. Проанализированы сценарии, при которых целесообразно использовать списочное и совместное декодирование. Рассмотрено применение предложенного списочного декодера турбокода для улучшения качества принимаемой речи в сетях связи стандарта 3GPP LTE. Показано, что списочный декодер позволяет улучшить качество речи на приемнике на 0,15–0,5 пунктов по шкале MOS по сравнению с классическим турбо-декодером.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Акмалходжаев, А.И. Совместный списочный декодер турбокода и вокодера AMR-NB для сетей четвертого поколения / А.И. Акмалходжаев // Информационно-управляющие системы. СПб.: ГУАП — 2014.— № 2 (69). — С. 63-70.
2. Акмалходжаев, А.И. Новый алгоритм списочного декодирования турбокодов / А.И. Акмалходжаев, А.В. Козлов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение.— 2013.— № 8 (56).— С. 20-23.

3. Акмалходжаев, А.И. Сравнительный анализ алгоритмов декодирования турбокодов на примере турбокода стандарта GPP LTE / А.И. Акмалходжаев // Вестник Таджикского технического университета. — 2014.— № 4 (28).— С. 44-47.

Другие статьи и материалы конференций:

4. Акмалходжаев, А.И. Списочное декодирование турбокодов / А. И. Акмалходжаев, А.В. Козлов // СПИСОК-2012. Материалы всероссийской научной конференции по проблемам информатики.— 2012.— С. 194-199.
5. Акмалходжаев, А.И. Новый пассивный метод оценки качества голоса в сети 3GPP LTE / А.И. Акмалходжаев // СПИСОК-2014. Материалы всероссийской научной конференции по проблемам информатики.— 2014.— С. 215-223.
6. Акмалходжаев, А.И. Совместное декодирование канала и источника / А.И. Акмалходжаев // Научная сессия ГУАП: сборник докладов.— 2013.— Т. 1.— С. 71-75.
7. Akmalkhodzhaev, A.I. New iterative turbo code list decoder / A.I. Akmalkhodzhaev, A. V. Kozlov // XIV International Symposium "Problems of Redundancy in Information and Control Systems". — 2014. — P. 15-18.
8. Akmalkhodzhaev, A.I. Joint decoding of turbo code and AWR-WB vocoder in 3GPP LTE system / A.I. Akmalkhodzhaev // 6th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). — 2014. — P. 402-406.
9. Akmalkhodzhaev, A.I. New Non-intrusive Speech Quality Assessment Algorithm for Wireless Networks / A.I. Akmalkhodzhaev, A. V. Kozlov // Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services. — 2015. — P. 215-225.