

На правах рукописи



**Покаместов Дмитрий Алексеевич**

**ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ СИСТЕМ  
СВЯЗИ С МНОЖЕСТВЕННЫМ ДОСТУПОМ НА ОСНОВЕ  
РАЗРЕЖЕННЫХ КОДОВ**

**Специальность:**

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Томск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

**Научный руководитель:** **Демидов Анатолий Яковлевич**  
кандидат физико-математических наук, доцент  
кафедры телекоммуникаций и основ  
радиотехники (ТОР), ТУСУР, г. Томск.

**Официальные оппоненты:** **Майстренко Василий Андреевич**  
доктор технических наук, заведующий  
кафедрой средств связи и информационной  
безопасности Омского государственного  
технического университета, г. Омск.

**Стукач Олег Владимирович**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
систем управления и мехатроники  
Национального исследовательского Томского  
политехнического университета, г. Томск.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «**Сибирский государственный  
университет телекоммуникаций и  
информатики**», г. Новосибирск.

Защита состоится 19 декабря 2017 года в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.268.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по адресу г. Томск, пр. Ленина, д.40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, д. 146 и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/4cyzs8h4>

Автореферат разослан «13» ноября 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Диссертационная работа посвящена методам и алгоритмам формирования сигналов множественного доступа на основе разреженных кодов (Sparse Code Multiple Access, SCMA). Традиционной задачей, стоящей при разработке систем связи, является повышение эффективности использования частотно временного ресурса. SCMA – метод множественного доступа, предложенный в 2013 г. Хусейном Никопором (Hosein Nikopour) и Хади Балаем (Hadi Baligh), сотрудниками канадского отделения компании Huawei, обладает большей помехоустойчивостью по сравнению с существующими методами, в том числе ортогональным частотным разделением каналов (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). При использовании SCMA пользователи (слои) ведут передачу кодовых слов (символов модуляции), которые содержатся в трехмерных кодовых книгах. Каждое кодовое слово состоит из нескольких комплексных амплитуд, модулирующих поднесущие. Количество ненулевых значений в кодовом слове значительно меньше общего числа поднесущих. Таким образом, код каждого абонента и общая кодовая книга являются разреженными. Каждая поднесущая модулируется суперпозицией амплитуд, формируемых несколькими абонентами, т.е. передача сигналов абонентов осуществляется неортогонально. Благодаря этому количество абонентов может превосходить количество доступных поднесущих. Все используемые поднесущие ортогональны и формируются в соответствии с технологией OFDM, или технологиями, основанными на OFDM.

Детектирование (демодуляция) символов SCMA осуществляется методами, основанными на алгоритме передачи сообщений (Message Passing Algorithm, MPA). Схожие алгоритмы применяются при декодировании кодов с малой плотностью проверок на четность (Low Density Parity Check Code, LDPC). Таким образом, технология SCMA объединяет подходы, применяемые в OFDM, LDPC кодах и методе кодового разделения каналов (Code Division Multiple Access, CDMA).

Начиная с 2013 года вышло достаточно большое количество публикаций, посвященных SCMA. В основном работу в этой области ведут сотрудники компании Huawei, среди которых стоит выделить Н. Nikopour, Н. Baligh, L. Zhang, М. Taherzadeh, К. Au и др. Среди отечественных исследователей стоит отметить работы А. Б. Сергиенко и В. П. Климентьева.

Помехоустойчивость SCMA напрямую зависит от способов заполнения кодовых книг. Использование различных книг приводит к разной вероятности битовой ошибки в системе связи. Тема формирования кодовых книг слабо освещена в литературе. Авторы, как правило, предлагают либо книги с фиксированными, обычно не высокими размерами, либо ограничиваются описанием общих подходов к формированию кодовых книг.

Таким образом, актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью создания методов и алгоритмов формирования кодовых книг с

произвольной размерностью для систем связи, работающих в каналах с различными параметрами.

**Цель диссертационной работы** – разработка методов формирования сигнальных конструкций SCMA на основе кодовых книг с произвольным числом поднесущих для достижения более высокой помехоустойчивости, по сравнению с существующими системами связи.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Анализ существующих методов и алгоритмов формирования и обработки сигналов с SCMA.
- Разработка программной модели системы связи с SCMA на основании существующих алгоритмов.
- Разработка методов и алгоритмов формирования кодовых книг SCMA, обеспечивающих более высокую помехоустойчивость по сравнению с существующими системами.
- Исследование помехоустойчивости системы связи с SCMA при передаче сигналов в разных моделях каналов передачи (канал с белым гауссовым шумом, многолучевые каналы с частотными замираниями).
- Математическое моделирование и экспериментальное исследование разработанных методов для подтверждения их работоспособности и соответствия заявленной цели.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач были применены методы линейной алгебры, теории вероятности, статистической радиотехники, основы теории графов, имитационное моделирование, экспериментальные исследования передачи сигналов с SCMA с использованием сертифицированного измерительного оборудования.

#### **Научная новизна работы:**

1) Разработаны методы и алгоритмы формирования сигнальных конструкций (кодовых книг) SCMA для произвольного числа поднесущих. Системы связи, построенные на основе таких алгоритмов, обладают большей помехоустойчивостью по сравнению с существующими системами связи. Теоретически и экспериментально было установлено, что система связи с SCMA при спектральной эффективности 3 бит/с/Гц достигает вероятности битовой ошибки в  $10^{-4}$  при отношении сигнал-шум на 1.5 дБ меньшем по сравнению с OFDM с QAM-8 и 8-PSK.

2) Показано, что вычислительная сложность алгоритма детектирования MPA растет линейно с ростом количества поднесущих в системе связи. Таким образом сделан вывод о том, что применение кодовых книг больших размеров не приводит к усложнению детектирования.

3) Показано, что для детектирования алгоритмом MPA целесообразно проводить не менее 7 итераций, вне зависимости от размерности кодовой книги.

4) Разработан способ изменения сигнальных созвездий кодовых книг для многолучевых каналов с неглубокими замираниями. При передаче сигналов в

таких каналах передатчик формирует кодовую книгу, применение которой позволяет снизить вероятность битовой ошибки по сравнению с существующими системами на основе OFDM с QAM-8 и 8-PSK, а также по сравнению с системами SCMA с известными книгами.

5) Предложены алгоритмы оценки уровня шума на входе детектора МРА. Показано, что в реальных условиях система SCMA имеет преимущество перед OFDMA, что подтверждает работоспособность и корректность разработанных методов и алгоритмов.

**Достоверность.** Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается согласованностью с результатами экспериментального исследования, проведенного с применением калиброванной и поверенной аппаратуры.

**Теоретическая и практическая значимость полученных результатов.** Результаты диссертационной работы позволяют обеспечить мультиплексирование в многоканальных системах связи с высокими показателями помехоустойчивости. Полученные методы формирования кодовых книг могут быть использованы при формировании сигналов с SCMA для передачи на произвольном количестве поднесущих. Показано, что применение SCMA с предложенными алгоритмами обеспечивает лучшую помехоустойчивость систем связи по сравнению с системами на основе OFDM.

Результаты работы внедрены на предприятии АО «НПФ «Микран» (г.Томск), при создании системы формирования и обработки сложных сигналов систем связи (х/д 20/17). Результаты используются в учебном процессе кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Многоканальные цифровые системы передачи» и «Системы и сети цифровой радиосвязи и радиодоступа».

**Апробация результатов работы.** Результаты работы были апробированы на международных и всероссийских конференциях:

- «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2014 г., 2015 г., 2016 г., 2017 г.
- Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS), 2015 IEEE International Conference, г. Тель-Авив, Израиль, 2015г.
- «Приборостроение, Электроника и Телекоммуникации – 2015», г. Ижевск, 2015г.
- 26-ая международной Крымская микроволновая конференция (КрыМиКо), г. Севастополь, 2016.
- SIBCON 2017. International Siberian Conference, г. Астана, 2017г.

**Личный вклад автора.** Основные результаты диссертации получены автором лично или при непосредственном его участии. Экспериментальные исследования проведены совместно с сотрудниками кафедры ТОР ТУСУР Я.В. Крюковым, Е.В. Рогожниковым, результаты обработаны лично автором. Совместно с научным руководителем обсуждались цели работы и пути их достижения, результаты работы. Все математические модели и программы разработаны автором.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод формирования сигнальных конструкций (кодовых книг) для систем связи с множественным доступом на основе разреженных кодов, в которых вероятность битовой ошибки  $10^{-4}$  достигается при отношении сигнал шум на 1.5 дБ меньше, чем при использовании модуляционной схемы OFDM QAM-8, для каналов с белым гауссовским шумом при спектральной эффективности 3 бит/с/Гц и передаче на произвольном числе поднесущих.

2. В каналах с белым гауссовским шумом в многоканальных системах связи с множественным доступом на основе разреженных кодов использование кодовых книг с размерностью, совпадающей с количеством поднесущих позволяет добиться вероятности битовой ошибки  $10^{-4}$  при отношении сигнал шум на 2 дБ меньше, чем при использовании известных кодовых книг малых размеров, без существенного увеличения вычислительной сложности алгоритма детектирования МРА.

3. Способ изменения сигнальных созвездий для систем связи с множественным доступом на основе разреженных кодов при передаче сигналов в каналах с неглубокими замираниями (модель канала пешехода EPA и канала со случайными фазами) позволяет добиться вероятности битовой ошибки  $10^{-4}$  при отношении сигнал шум на 2.5 дБ меньше, чем при использовании кодовых книг малых размеров при тех же условиях передачи.

**Публикации.** По материалам диссертационного исследования опубликована 21 работа, в том числе 7 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 5 работ в изданиях, индексируемых в Scopus из которых 4 работы в изданиях, индексируемых в Web of Science, 9 работ в иных изданиях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературных источников и двух приложений. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста. Список используемых источников содержит 111 наименований.

**КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость, описаны методы исследования, также приведены научные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы, внедрении результатов и структуре диссертации.

**Первая глава** посвящена описанию применения разреженных кодов в отдельных разделах радиотехники и радиосвязи. Приведен обзор методов множественного доступа к частотно-временному ресурсу, принципы которых легли в основу идеи множественного доступа на основе разреженных кодов.

Основные подходы по работе с разреженными матрицами в SCMA совпадают с подходами теории LDPC кодов. В частности, алгоритмы детектирования SCMA символов основаны на алгоритме распространения

доверия, используемом при декодировании LDPC кодов. По этой причине в первой главе достаточно подробно описаны низкоплотностные коды.

Эффективность кодов с малой плотностью проверок на четность обусловлена большими размерами проверочной (и генераторной) матрицы (в соответствии с теоремой Шеннона о кодировании для канала с шумами). Разреженность матриц позволяет применить специфические алгоритмы, такие как алгоритм распространения доверия (Belief Propagation, BP), алгоритм инверсии бит (Bit Flipping, BF). Эти алгоритмы основаны на пересчете вероятности появления «0» и «1» в проверочных узлах графа Таннера (двудольного графа, пример такого графа приведен в описании второй главы).

Проблема организации множественного доступа (мультиплексирования, разделения абонентов) является ключевой при разработке систем многоканальной связи. Выбор того или иного метода мультиплексирования напрямую влияет на эффективность использования частотно-временного ресурса, предоставляемого для передачи данных.

В настоящее время наиболее широкое распространение получил метод множественного доступа OFDMA. Он используется в современных системах связи LTE, WiMAX, Wi-Fi, DVB и др. В документах, описывающих возможные технологии 5G, большинство рассматриваемых методов так или иначе основаны на принципах OFDMA, поэтому в первом разделе OFDMA рассмотрен достаточно подробно.

На рисунке 1 приведена обобщенная схема формирования OFDM символов. Битовые потоки  $\mathbf{b}_i$  отображаются в комплексные коэффициенты  $C_i$ , каждый из которых является символом цифровой квадратурной модуляции (например, PSK, или QAM). Каждый коэффициент модулирует соответствующую ему поднесущую (гармоническое колебание), что достигается выполнением обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) размерностью  $N$  над вектором коэффициентов  $C_i$ . OFDM символ формируется как суперпозиция модулированных таким образом поднесущих. После этого поток параллельных отсчетов  $S_i$  переводится в последовательный вид и к нему добавляется защитный интервал в виде циклического префикса (ЦП). OFDM символ с ЦП подается на квадратурный модулятор (КМ) и отправляется в канал передачи.

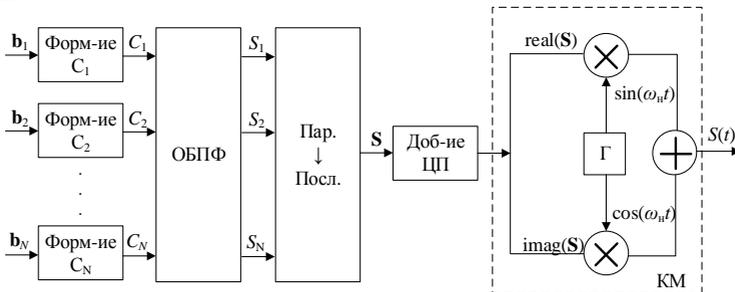


Рисунок 1 – Структурная схема формирователя OFDM символов

Длительность OFDM символа в  $N$  раз превосходит длительность символа QAM модуляции при аналогичной занимаемой полосе и общей скорости передачи (тоже справедливо и для других видов квадратурной модуляции).

В завершении первой главы приведен краткий обзор перспективных методов доступа, предложенных в рамках разработки концепции сетей 5G, в том числе метода неортогонального доступа NOMA (Non Orthogonal Multiple Access). Метод подразумевает передачу сигналов нескольких абонентов в одном частотно-временном ресурсе, и различающихся уровнем мощности. Разделить такие сигналы абонентов можно, например, методом последовательного подавления помех SIC (Serial Interference Cancellation). На основе идеи NOMA для использования в сетях пятого поколения были предложены методы неортогонального множественного доступа MUSA (Multi-User Shared Access), PDMA (Pattern Division Multiple Access) и SCMA (Sparse Code Multiple Access).

Объединение подходов CDMA и OFDMA получило название MC-CDMA (Multi Carrier CDMA). Сигналы MC-CDMA вначале получают расширение и формируются как CDMA, а затем создается многочастотный сигнал по схеме OFDM. Такая схема совмещает преимущества обоих подходов, однако алгоритмы детектирования MUD (Multi User Detection) имеет достаточно высокую вычислительную сложность.

На рисунке 2 приведена схема формирования LDS - OFDM символов. Вектор бит  $\mathbf{b}_v$ ,  $v$ -го абонента отображается в комплексный символ  $d_v$  по правилу цифровой квадратурной манипуляции. Далее, символ подвергается расширению разреженной последовательностью  $\mathbf{P}_v$ , содержащей малое число единиц:

$$\mathbf{L}_v = \mathbf{P}_v d_v. \quad (1)$$

Векторы  $\mathbf{P}_v$  и  $\mathbf{L}_v$  имеют длину  $F$  (количество поднесущих, в системе). Вектор комплексных амплитуд поднесущих  $\mathbf{C} = [c_1, c_2, \dots, c_F]$  формируется как поэлементная сумма векторов  $\mathbf{L}_v, v=1, 2, \dots, V$ :  $\mathbf{C} = \sum_{v=1}^V \mathbf{L}_v$ .

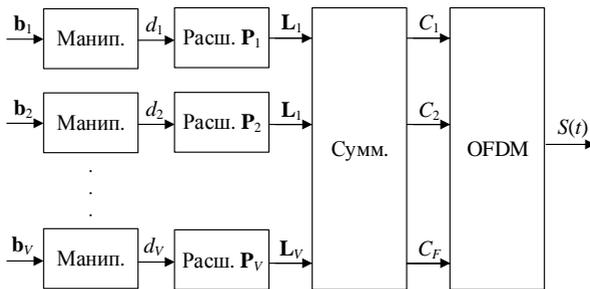


Рисунок 2 – Схема формирования LDS - OFDM символов

Системы с LDS более эффективно используют частотно-временной ресурс по сравнению с OFDM и CDMA. В литературных источниках показано, что при использовании сверточного кодирования со скоростью 1/2 и скорости

передачи 2 бита на поднесущую, LDS-OFDM может достигать вероятности битовой ошибки  $10^{-3}$  при отношении сигнал-шум (ОСШ) на 2 дБ меньшем, чем OFDM, при передаче сигнала в релейском канале с белым гауссовским шумом.

**Вторая глава** содержит разработанные автором методы формирования и обработки сигналов с множественным доступом на основе разреженных кодов. В этой главе вводятся основные понятия и определения для систем связи с SCMA, поэтому в автореферате она занимает большее место, по сравнению с другими главами.

В результате развития систем LDS возник новый метод – множественный доступ с разреженным кодом SCMA. Данный метод основан на формировании многомерных комплексных кодовых слов вместо двоичных кодов, осуществляющих распределение QAM символов по нескольким поднесущим. Благодаря этому достигается существенный выигрыш в помехозащищенности систем связи. Кодовые слова SCMA неортогональны между собой, их количество может превышать количество физических ортогональных поднесущих, что обеспечивает доступ большего количества пользователей по сравнению с OFDMA при использовании той же полосы частот.

Формирование SCMA символов выполняется в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 3, SCMA – блок SCMA кодирования (маппинга),  $\mathbf{b}_v$  – битовый поток  $v$ -го слоя (абонента),  $v = 1, \dots, V$ ,  $V$  – общее количество слоев,  $s_k$  – комплексная амплитуда  $k$ -ой поднесущей,  $k = 1, \dots, F$ ,  $F$  – общее количество ортогональных поднесущих. Набор значений  $s_k$  образуют вектор  $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_F]$ , модулирующий все  $F$  поднесущих. В отличие от классической схемы формирования OFDM символов, вместо

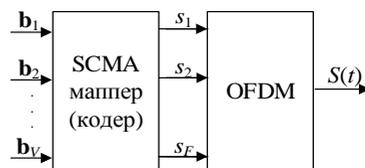


Рисунок 3 – Схема формирования SCMA символов

набора квадратурных модуляторов применяется блок SCMA кодирования, который также отображает биты в комплексные амплитуды поднесущих. Слой

является минимальной единицей ресурса, доступной пользователю. Количество пользователей, передающих данные в одном символе SCMA, способно достигать  $V$  и может быть больше количества поднесущих  $F$ , что является одним из ключевых достоинств технологии SCMA. Это позволяет организовывать более гибкую схему распределения сетевых ресурсов. Вместо блока OFDM можно применить другую операцию, обеспечивающую ортогональность поднесущих, например, использовать банк фильтров FBMC. В этом случае не нужно добавлять циклический префикс, что дополнительно экономит частотно-временной ресурс.

Распределение пользователей по поднесущим определяется трехмерной матрицей  $\mathbf{CB} = [c_{vkm}]$  размерностью  $V \times F \times M$  – кодовой книгой (codebook, CB), индекс  $m_v = 1, \dots, M$  определяет вектор бит  $\mathbf{b}_v = [b_1, b_2, \dots, b_{\log_2 M}]$ , передаваемых

в слое  $v$ ,  $M$  – количество различных битовых реализаций, которые можно передать в слое  $v$ , т.е. длина вектора  $\mathbf{b}_v$  равна  $\log_2 M$ .

Значение  $m_v$  можно получить как  $m_v = \text{bin2dec}(\mathbf{b}_v) + 1$ , где  $\text{bin2dec}$  – перевод двоичного числа в десятичный вид.

Общая кодовая книга  $\mathbf{CB}$  состоит из  $V$  кодовых книг слоев  $\mathbf{CB}_v$  – двумерных матриц размерностью  $F \times M$ . Кодовым словом слоя  $v$  является вектор  $\mathbf{CW}_{vm_v}$ .

$$\mathbf{CB}_v = \begin{bmatrix} c_{v11} & c_{v12} & \dots & c_{v1m_v} & \dots & c_{v1M} \\ c_{v21} & c_{v22} & \dots & c_{v2m_v} & \dots & c_{v2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{vF1} & c_{vF2} & \dots & c_{vFm_v} & \dots & c_{vFM} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{CW}_{vm_v} = \begin{bmatrix} c_{v1m_v} \\ c_{v2m_v} \\ \dots \\ c_{vFm_v} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В зависимости от реализации  $\mathbf{b}_v$ , слоем  $v$  в частотном домене передается кодовое слово с соответствующим этой реализации индексом  $m_v$ .  $M$  кодовых слов  $\mathbf{CW}_{vm_v}$  образуют полную кодовую книгу слоя  $v$   $\mathbf{CB}_v$ .

Кодовая книга  $\mathbf{CB}$  формируется на основе разреженной матрицы  $\mathbf{B}$  размерностью  $V \times F$ , элементами которой являются нули и единицы. Нули в матрице  $\mathbf{B}$  на позициях  $v, k$  соответствуют нулевым элементам кодовой книги  $[c_{vkm_v}]$  для всех  $m_v = 1 \dots M$ . Разреженную матрицу можно представить в виде двудольного графа, также называемого графом Таннера.

На рисунке 4 приведен возможный пример матрицы и соответствующий ей граф Таннера для четырех поднесущих и шести слоев. Разреженная матрица  $\mathbf{B}$  может генерироваться одним из известных алгоритмов генерирования проверочных матриц LDPC кодов. Разреженная матрица SCMA будет значительно меньше матрицы LDPC кода, т.к. в современных системах связи используется, как правило, не более нескольких тысяч поднесущих.

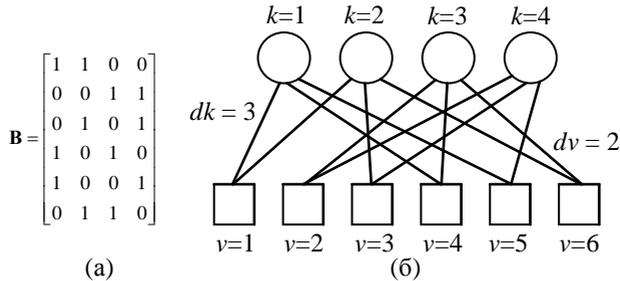


Рисунок 4 – Матрица  $\mathbf{B}$  кодовой книги и соответствующий ей граф Таннера для  $V = 6, F = 4, M = 3, dk = 3, dv = 2$

Кодовая книга  $\mathbf{CB}$  описывается пятью параметрами:  $V, F, M, dk, dv$ . Параметры  $V, F, M$  пояснены ранее,  $dk$  – количество кодовых слов на  $k$ -ой поднесущей. На рисунке 4 это количество ребер графа Таннера, соединяющих

вершину поднесущих  $k$  с вершинами слоев  $v$  (количество единиц в столбцах матрицы  $\mathbf{B}$ ). Параметр  $dv$  – количество поднесущих, модулируемых кодовым словом  $\mathbf{CW}_{vm_v}$  (количество ненулевых элементов кодового слова), на рисунке 4 это количество ребер графа Таннера, соединяющих вершину слоя  $v$  с вершинами поднесущих  $k$  (количество единиц в строках матрицы  $\mathbf{B}$ ). Количество нулей в формирующей матрице кодовой книги определяется параметрами  $dk$  и  $dv$ . В примере, изображенном на рисунке 4,  $V = 6$ ,  $F = 4$ ,  $dk = 3$ ,  $dv = 2$ . Параметры кодовой книги связаны между собой выражением  $dk = \frac{Vdv}{F}$ .

На рисунке 5 приведен пример общей кодовой книги (а), кодовых книг слоев (б), и кодовых слов книги четвертого слоя (в) для матрицы  $\mathbf{B}$ , рассмотренной выше (рисунок 4), пример формирования результирующего вектора  $\mathbf{S}$  (г).

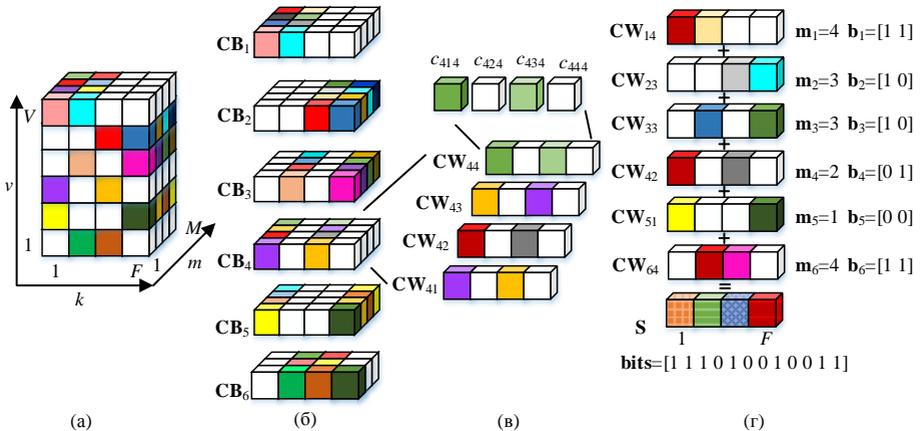


Рисунок 5 – Кодовые книги SCMA для  $V=6$ ,  $F=4$ ,  $M=4$ , (а) – общая кодовая книга, (б) – кодовые книги слоев, (в) – кодовые слова книги четвертого слоя, (г) – формирование результирующего вектора  $\mathbf{S}$

Кодовыми словами  $\mathbf{CW}_{vm_v}$  слоя  $v$  являются векторы из  $F$  элементов  $c_{vkm_v}$ , из которых  $dv$  ненулевые, остальные  $F-dv$  элементов заполняются нулями, в соответствии с формирующей разреженной матрицей  $\mathbf{B}$ . Результирующий вектор  $\mathbf{S}$  (комплексный сигнал в частотном домене) формируется как суперпозиция кодовых слов  $\mathbf{CW}_{vm_v}$  всех слоев:

$$\mathbf{S} = \sum_{v=1}^V \mathbf{CW}_{vm_v}, m_v \in [1, \dots, M]. \quad (3)$$

Только  $dk$  элементов кодовых слов  $c_{vkm_v}$  для каждой поднесущей отличны от нуля.

Пример формирования вектора  $\mathbf{S}$  для  $V=6$ ,  $F=4$ ,  $dk=3$  приведен на рисунке 5 (г). Передается вектор бит  $[1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1]$ , каждый слой  $v$  передает одну пару бит (дибит). В зависимости от значения бит в дибите, формирователь SCMA каждого слоя выбирает кодовое слово, соответствующее этой реализации. Выбранные кодовые слова всех пользователей складываются и формируют общий вектор огибающей сигнала в частотном домене  $\mathbf{S}$ .

Пусть сигнал  $\mathbf{S}$  передается в канале с селективными частотными замираниями и АБГШ (аддитивный белый гауссовский шум). Тогда принятый сигнал в частотном домене:  $\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{S} + \mathbf{N}$ , где  $\mathbf{H} = (h_{vk})$  – канальная матрица,  $\mathbf{N} = [n_k]$  – вектор шума в частотном домене. Принятый сигнал на  $k$ -ой поднесущей можно представить в виде  $y_k = \sum_{v=1}^V h_{vk} c_{vkm_v} + n_k$ .

Классический алгоритм детектирования основан на поиске переданных кодовых слов методом MAP (Maximum A posteriori Probability, оценки апостериорного максимума):

$$\hat{\mathbf{S}} = \operatorname{argmax}_{c_{vkm_v}} P(\mathbf{S} | \mathbf{Y}), \quad (4)$$

что сводится к следующему выражению:

$$\hat{\mathbf{S}} = \operatorname{argmax}_{c_{vkm_v}} P_{km_v} \exp\left(-\frac{1}{2} / y_k - \sum_{v=1}^V h_{vk} c_{vkm_v} + n_k \right|^2), \quad k = 1..F, \quad (5)$$

где  $\sigma_n^2$  – дисперсия шума,  $P_{km_v}$  – априорная вероятность появления кодового слова с индексом  $m_v$ . Алгоритм MAP рассматривает сигнал одновременно на  $F$  поднесущих, сравнивая принятый сигнал с  $M^V$  реализациями  $c_{vkm_v}$ , что приводит к большой вычислительной сложности алгоритма MAP.

Для уменьшения числа операций, в детектировании SCMA используют алгоритм передачи сообщений MPA (Message Passing Algorithm). Реализованный в ходе диссертационного исследования алгоритм для SCMA включает в себя несколько шагов:

1. Расчет вероятности передачи набора различных компонентов кодовых слов  $c_{vkm_1}, \dots, c_{vkm_v}, m_1, \dots, m_v=1, \dots, M$ , на поднесущей  $k$ :

$$R(k, m_1, m_2, \dots, m_v) = \exp\left(-\frac{1}{2} / y_k - (h_{1k} c_{1km_1} + h_{2k} c_{2km_2} + \dots + h_{vk} c_{vkm_v}) \right|^2). \quad (6)$$

Только  $dk$  из  $V$  компонент  $c_{vkm_v}$  на поднесущей  $k$  имеют ненулевое значение, поэтому на этом этапе рассчитывается  $F \cdot M^{dk}$  значений.

2. Инициация вероятностей передачи ненулевых компонент кодовой книги  $c_{vkm_v}$ . В первой итерации они соответствуют априорным вероятностям, и в

общем случае равны:  $I(c_{vkm_v}) = \frac{1}{M}$ .

3. Расчет и обновление вероятностей передачи компонентов кодовой книги  $c_{vkm_v}$  при условии передачи другими слоями всевозможных компонентов  $c_{jkm_j}$ ,  $j=1, \dots, V, j \neq v$  на этой же поднесущей  $k$ :

$$P(c_{vkm_v}/Y) = \sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M \dots \sum_{m_{v-1}=1}^M \sum_{m_{v+1}=1}^M \dots \sum_{m_V=1}^M R(k, m_{i_1}, m_{i_2}, \dots, m_{i_V}) \prod_{v=1}^V I(c_{vkm_v}), \quad (7)$$

$$m_v = 1, \dots, M.$$

Для каждой поднесущей  $k$  только  $dk$  кодовых слов несут отличные от нуля компоненты  $c_{vkm_v}$ . Поэтому выражение (7) можно записать в виде:

$$P(c_{v_i km_{v_i}}/Y) = \sum_{m_{v_1}=1}^M \sum_{m_{v_2}=1}^M \dots \sum_{m_{v_{i-1}}=1}^M \sum_{m_{v_{i+1}}=1}^M \dots \sum_{m_{v_{dk}}=1}^M R(k, m_{v_1}, m_{v_2}, \dots, m_{v_{dk}}) \prod_{v_i=1}^{dk} I(c_{v_i km_{v_i}}), \quad (8)$$

$$m_{v_i} = 1, \dots, 4,$$

где  $v_i$  – слои, имеющие ненулевые компоненты  $c_{vkm_v}$  на поднесущей  $k$ .

4. Обновление вероятностей передачи ненулевых компонентов кодовых слов:

$$I(c_{vkm_v}) = P(c_{vkm_v} | \mathbf{Y}). \quad (9)$$

Шаги 3–4 повторяются в течении  $N$  итераций.

На рисунке 6 приведены полученные зависимости вероятностей символьных ошибок SER (symbol error rate) от ОСШ, для разного количества итераций в алгоритме МРА для SCMA с параметрами  $V=6, M=4, dk=3, dv=2$  с предлагаемой кодовой книгой (описана ниже). Результаты получены методом имитационного моделирования для канала с АБГШ. Из рисунка 6 следует, что целесообразно производить не менее 7 итераций пересчета вероятностей в шагах 3–4.

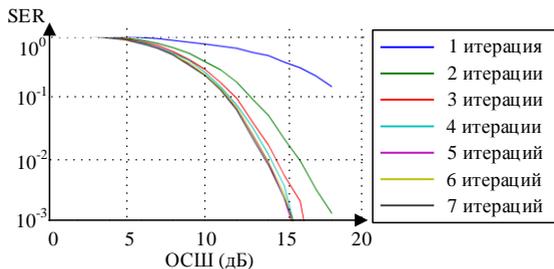


Рисунок 6 – График зависимости вероятности символьных ошибок от ОСШ и количества итераций для  $V=6, F=4, dk=3, dv=2, M=4$

5. Итоговая вероятность передачи кодовых слов  $\mathbf{CW}_{m_v}$  находится как произведение вероятностей приема его ненулевых компонент:

$$P(CW_{vm_v}) = P(c_{vk_1m_v})P(c_{vk_2m_v})\dots P(c_{vk_{dv}m_v}), \quad (10)$$

где  $k_j$ —индексы ненулевых компонент  $c_{vk_jm_v}$  кодового слова  $CW_{vm_v}$ ,  $j=1, \dots, dv$ .

В диссертации была оценена вычислительная сложность МРА. Показано, что сложность алгоритма оценивается как  $O(FM^{dk})$ . Относительно числа поднесущих  $F$  зависимость сложности линейна, таким образом идея использовать кодовые книги больших размеров не приведет к кратному увеличению нагрузки на процессор.

Помехоустойчивость и скорость передачи информации в системе связи с SCMA напрямую зависит от структуры и содержания кодовой книги. В диссертации предложен метод формирования книг, описание которого приводится ниже.

Кодовая книга  $\mathbf{C}\mathbf{B}$  формируется на основе разреженной матрицы  $\mathbf{V}$ . Такую матрицу можно сформировать, используя алгоритм, предложенный Робертом Галлагером для LDPC кодов, рисунок 7. Алгоритм основан на формировании подматрицы  $\mathbf{V}_0$ , элементы строки  $i$  этой подматрицы с индексами  $(i-1)dk+1 \dots i \cdot dk$  равны единицам, остальные элементы равны нулю. Подматрицы  $\mathbf{V}_1 \dots \mathbf{V}_{T-1}$  получаются путем случайных перестановок столбцов в подматрице  $\mathbf{V}_0$ . В результате перестановок в получившихся подматрицах должны отсутствовать циклы кратности 4. Цикл определяется как замкнутая последовательность ребер графа, начинающаяся и заканчивающаяся в одной вершине. Проверка на циклы может быть произведена путем нахождения попарного скалярного произведения столбцов (проверку пройдут подматрицы, чье скалярное произведение не превышает 1). Подматрицы, содержащие циклы отбрасываются. Подматрицы формируются до тех пор, пока количество строк результирующей матрицы не достигнет  $V$ .

Вывести аналитическое выражение, учитывающее влияние циклов кратности 4 на помехоустойчивость систем связи с SCMA видится весьма затруднительным, поэтому для его оценки применялись методы математического имитационного моделирования. На рисунке 8 приведены зависимости коэффициента битовой ошибки от отношения энергии, приходящейся на бит к спектральной плотности мощности шума ( $E_b/N_0$ ), для системы связи с SCMA  $F = 4$ ,  $V = 6$ ,  $dv = 2$ ,  $dk = 3$ , при формирующей матрице с циклами кратности 4 и без них.

$\mathbf{V}_0$	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	1	1	1
$\mathbf{V}_1$	1	0	0	0	1	0	1	0	0
	0	0	1	1	0	0	0	1	0
	0	1	0	0	0	1	0	0	1
$\mathbf{V}_2$	0	0	1	0	1	0	0	0	1
	0	1	0	1	0	0	1	0	0
	1	0	0	0	0	1	0	1	0
$\mathbf{V}_3$	1	0	0	1	0	0	0	0	1
	0	0	1	0	0	1	1	0	0
	0	1	0	0	1	0	0	1	0

Рисунок 7 – Пример формирования разреженной матрицы  $\mathbf{V}$

После формирования разреженных матриц, осуществляющих распределение пользователей по поднесущим, возникает задача определения комплексных амплитуд поднесущих. Эта задача сводится к поиску наиболее эффективного сигнального созвездия для компонент кодовых слов на конкретной поднесущей и для общего созвездия поднесущей. Критерием эффективности была выбрана минимизация общей вероятности битовой ошибки в системе связи.

В диссертационной работе предложен следующий подход к формированию созвездий кодовых книг SCMA на основе манипуляций с базовым созвездием одного слоя. В случае, если на всех поднесущих используется одно сигнальное созвездие, задается базовый вектор  $\mathbf{S}$  размерностью  $M$ . Этот вектор является созвездием  $k$ -ой поднесущей кодовой книги первого слоя. Созвездия остальных слоев, модулирующих  $k$ -ую поднесущую получаются путем поворота этого базового вектора на определенный угол  $a_i$ ,  $i=1 \dots dv$ ,  $a_1=0$ . Углы  $a_i$  выбираются таким образом, чтобы результирующее созвездие поднесущей максимально равномерно покрывало комплексную сигнальную плоскость.

В диссертации рассмотрен пример формирования кодовой книги для системы связи с шестью слоями и четырьмя поднесущими при скорости передачи каждого слоя 2 бита на символ ( $V=6$ ,  $F=4$ ,  $M=4$ ,  $dk=3$ ,  $dv=2$ ) в соответствии с подходом, описанным выше. На рисунке 9 приведен пример формирования сигнального созвездия вектора  $\mathbf{G}_k$  одной поднесущей комплексными значениями  $c_{vkm}$ , трех слоев ( $dk=3$ ) при  $M=4$ .

Согласно предлагаемому автором алгоритму значения  $c_{vkm}$  располагаются внутри кодовой книги  $v$ -го слоя таким образом, чтобы точки с минимальным евклидовым расстоянием на первой ненулевой поднесущей располагались на максимальном евклидовом расстоянии на следующих ненулевых поднесущих, а сумма модулей компонентов для каждого кодового слова была постоянной. Это достигается путем перестановки точек созвездия второй модулируемой поднесущей внутри кодовой книги каждого слоя. Так, на первой поднесущей компоненты  $a$  расставлены в прямом порядке (1, 2, 3, 4), на второй они переставлены (2, 4, 1, 3). Этот подход иллюстрирует рисунок 10, на котором приведены реальные части созвездий точек ( $a_{1m}$ ) без поворота.

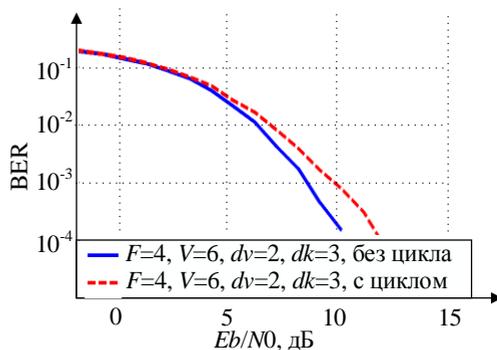


Рисунок 8 – Зависимость BER от  $E_b/N_0$  для SCMA с формирующей матрицей с циклом кратности 4 и без цикла,  $V=4$ ,  $F=6$ ,  $dv=2$ ,  $dk=3$ ,  $M=4$ , 8 итераций алгоритма МРА

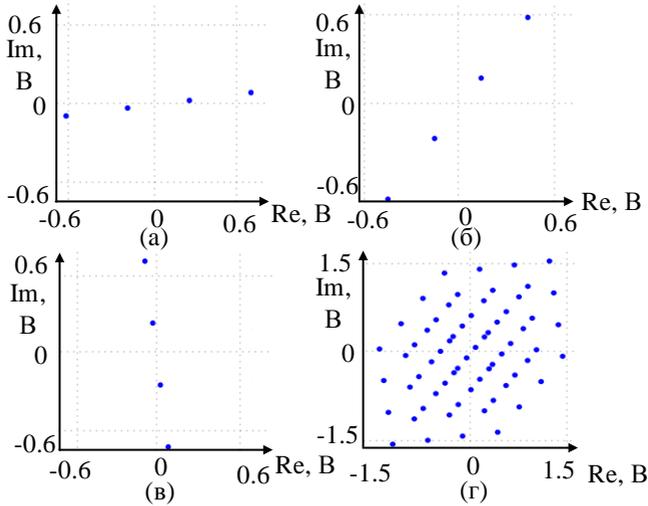


Рисунок 9 – Формирование сигнального созвездия одной поднесущей, (а), (б), (в) – сигнальные созвездия компонент кодовых слов  $c_{vkm_v}$ , при  $m_v = 1, \dots, M$  для трех слоев, (г) – результирующее сигнальное созвездие поднесущей  $k$ ,  $M=4$ ,  $dk=3$

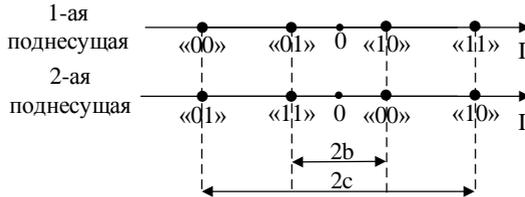


Рисунок 10 – Перестановка точек базового созвездия внутри кодовой книги одного слоя при  $dv = 2$

Таким образом, символы с большей разницей в хэмминговом пространстве обладают большей разницей и в евклидовом пространстве, в результате чего снижается вероятность битовой ошибки. При увеличении параметра  $dk$  принцип сохраняется.

В соответствии с предложенным подходом можно сформировать кодовые книги для различных параметров  $V$ ,  $F$ ,  $dv$ ,  $M$ , которые соответствуют различным сценариям работы системы связи с SCMA.

Рассмотрена помехоустойчивость систем связи с SCMA, работающих при различных параметрах и размерностях кодовых книг **СВ**, которые сформированы в соответствии с вышеописанным подходом.

Система SCMA с параметрами  $V=6$ ,  $F=4$ ,  $M=4$  (такую кодовую книгу чаще всего рассматривают другие исследователи) по сравнению с аналогичными по скорости передачи системами OFDM-QAM-8 и OFDM-8-PSK, имеет меньшую вероятность битовой ошибки, рисунок 11. Помехоустойчивое кодирование в рассматриваемых системах связи не применялось. При моделировании рассматривался канал с АБГШ, при детектировании МРА выполнялось 8 итераций.

Разработанный метод позволяет формировать кодовые книги с необходимыми параметрами (количество абонентов  $V$ , количество поднесущих  $F$ ) При увеличении размера матрицы (т.е. при увеличении количества абонентов и поднесущих), и сохранении их соотношения (коэффициента перегруженности системы, англ. overload factor), помехоустойчивость не падает. В диссертации рассмотрены различные сценарии соотношения количества пользователей и поднесущих. Здесь приведена зависимость BER от  $Eb/N0$  для трех характерных случаев: 1 - количество поднесущих меньше количества пользователей (высокая загруженность), 2 - количество пользователей совпадает с количеством несущих (сценарий OFDMA) и 3 - количество пользователей меньше количества поднесущих (помехоустойчивый сценарий), рисунок 12.

Проведено сравнение помехоустойчивости системы связи с SCMA, работающей с кодовыми книгами, предлагаемыми в диссертации (CB1) и известной ранее кодовой книгой (CB2), представленной в презентации компании Altera (параметры кодовой книги:  $dk = 3$ ,  $M = 4$ ;  $F = 4$ ,  $V = 6$ ). При совпадении разрядности помехоустойчивость совпадает, рисунок 13 (а). При увеличении количества поднесущих и сохранении скорости передачи и соотношения поднесущие-абоненты, предлагаемая кодовая книга дает лучший результат

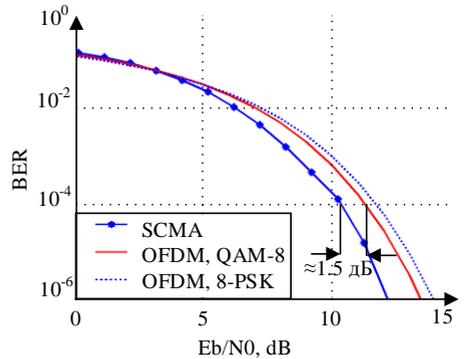


Рисунок 11 – Зависимость вероятности битовых ошибок от  $Eb/N0$  для системы связи с SCMA с параметрами  $F = 4$ ,  $V = 6$ ,  $dk = 3$ , OFDM QAM-8 и OFDM 8-PSK

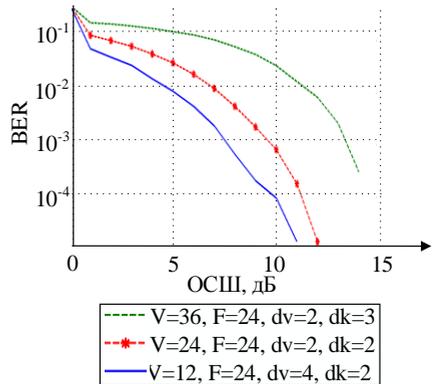


Рисунок 12 – Зависимость вероятности битовых ошибок от отношения сигнал шум для различных  $V$ , при  $F = 24$ ,  $M = 4$ ; 8 итераций алгоритма МРА

(рисунок 13 (б)) в каналах с АБГШ, при оценке параметров этих каналов. Для применения СВ 2 весь массив поднесущих делится на группы по 4, каждая группа образует в частотном домене один SCMA символ (подробнее этот процесс описан в диссертации).

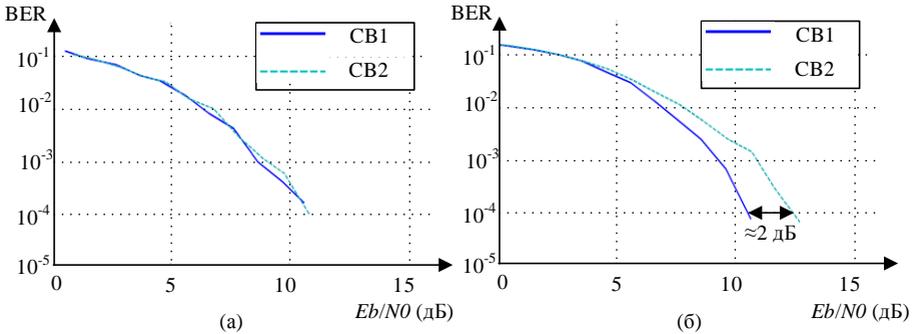


Рисунок 13 – Зависимость BER от  $E_b/N_0$  для системы связи с SCMA для двух кодовых книг  $dk = 3$ ,  $M = 4$ ; (а)  $F = 4$ ,  $V = 6$ ; (б)  $F = 800$ ,  $V = 1200$

Результаты моделирования, описанные во второй главе, показывают, что система связи с SCMA в которой кодовые книги формируются в соответствии с предлагаемым методом, достигает вероятности битовой ошибки  $10^{-4}$  при ОСШ на 1.5 дБ меньше по сравнению с OFDM-QAM и на 2 дБ меньше по сравнению с SCMA с описанными другими авторами кодовыми книгами (при передаче на большом числе поднесущих).

**В третьей главе** рассматривается влияние оценки параметров канала распространения радиоволн (АЧХ канала и дисперсии шума) на помехоустойчивость передачи системы связи с множественным доступом на основе разреженных кодов, а также предлагается способ снижения этого влияния в каналах с неглубокими замираниями.

На первом этапе выполнения алгоритма детектирования МРА рассчитываются вероятности приема компонент всевозможных кодовых слов на каждой поднесущей, (6). Далее в МРА выполняется пересчет и корректировка вероятностей в соответствии с графом Таннера.

Правильность оценки дисперсии шума  $k$ -ой поднесущей  $\sigma_k^2$  и коэффициентов передачи  $h_{vk}$  канала оказывают решающее влияние на эффективность детектирования МРА. При этом для OFDM в комплексе с QAM – модуляциями это требование не является настолько критичным. В диссертации рассмотрено влияние ошибки оценки дисперсии шума на вероятность битовых ошибок для различных конфигураций кодовых книг и параметров многолучевого канала передачи.

Дисперсия мощности шума на  $k$ -ой поднесущей может быть определена как:

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I |x_k(i) - y_k(i)|^2, \quad (11)$$

где  $x_k(i)$  –  $i$ -ый отсчет переданного сигнала на  $k$ -ой поднесущей,  $y_k(i)$  –  $i$ -ый обработанный отсчет принятого сигнала на  $k$ -ой поднесущей перед выполнением процедуры (1),  $i = 1 \dots I$ ,  $I$  – длина выборки отсчетов сигнала на поднесущей  $k$ .

Отсчеты сигнала  $x_k(i)$  в общем случае не известны приемнику. Поэтому дисперсию можно рассчитать по отклонениям преамбулы, которая известна как передающей, так и приемной стороне. Однако преамбула представляет из себя два одинаковых OFDM символа,  $I = 2$ . Определив по первому символу оценку коэффициентов передачи  $h_k$ , по второму можно оценить не дисперсию, а мощность одной реализации шума  $n_k^2$  (2) Использование такой оценки в МРА приводит к неудовлетворительному результату.

Для увеличения объема выборки можно принять предположения, что шум является АБГШ и усреднить значение его оценки по всей выборке. Кроме этого, если учесть, что на вход МРА сигнал с шумом приходит после выполнения процедуры эквалайзирования, то значения усредненной дисперсии шума также нужно пронормировать относительно АЧХ канала (далее на графиках метод 1).

В качестве альтернативного подхода к оценке дисперсии шума, предложен расчет по отклонению принятых символов от регенерированных, полученных после детектирования отсчетов сигнала и обратной модуляции. В этом случае алгоритм будет соответствовать схеме, приведенной на рисунке 14.

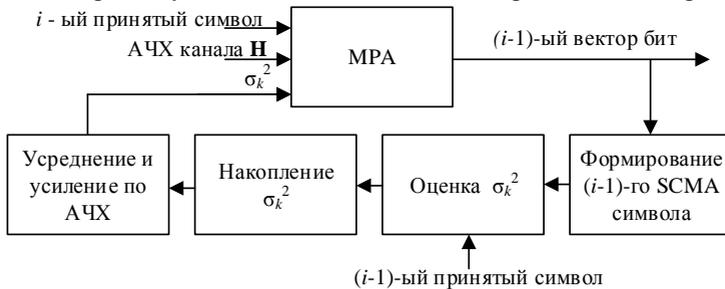


Рисунок 14 – Схема алгоритма оценки  $\sigma^2$  по регенерированным символам с усреднением и выравниванием по АЧХ

После детектирования восстанавливается (регенерируется) переданный SCMA символ, который при расчете дисперсии шума выступает в качестве опорного. Полученная таким образом оценка дисперсии шума используется при детектировании следующего символа. Оценка накапливается и уточняется с каждым принятым символом. При детектировании первого символа дисперсия

рассчитывается по преамбуле. Если шум в канале белый, то для уточнения полученной оценки ее можно усреднить для всех поднесущих и усилить в соответствии с АЧХ канала (далее на графиках метод 2).

Очевидный источник методической погрешности данного метода состоит в том, что при появлении битовых ошибок, регенерированный символ отличается от переданного, и оценка рассчитывается неверно, что в силу существующей обратной связи приводит к еще большему числу ошибок при детектировании следующего символа. Таким образом, достоверность оценки последовательно ухудшается. Однако, с другой стороны, при таком подходе дисперсия оценивается по объему выборки, значительно превышающему длину опорного сигнала. В диссертации приведены также другие методы оценки дисперсии шума.

Для снижения зависимости влияния ошибок эквалайзирования и оценки дисперсии шума в каналах с неглубокими замираниями была предложена кодовая книга с меньшим количеством уникальных точек в результирующем созвездии, рисунок 15. В базовом созвездии две точки кодового слова накладываются друг на друга на первой поднесущей, однако разнесены на остальных. Несмотря на то, что евклидово расстояние в многомерном пространстве сохраняется, влияние ошибки оценки канала снижается. Это объясняется нелинейным характером зависимости ошибки оценки дисперсии шума и АЧХ канала. Увеличение расстояния на одной поднесущей ведет к нелинейному снижению ошибок оценки параметров канала.

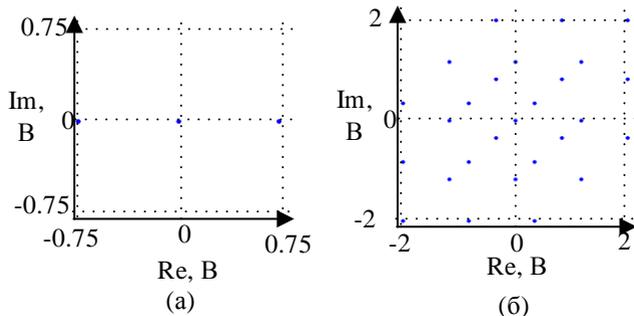


Рисунок 15 – (а) – Модифицированное базовое созвездие одного слоя, (б) – Модифицированное результирующее созвездие для SCMA с параметрами  $dk = 3$ ,  $dv = 2$ ,  $M = 4$

Для оценки целесообразности данного подхода было проведено имитационное моделирование системы связи с SCMA для предложенных кодовых книг при оценке дисперсии шума в каналах с многолучевым распространением. В качестве моделей каналов были выбраны канал со случайными начальными фазами и постоянной амплитудой, канал пешехода ЕРА, канал автомобиля EVA и канал города ETU (эти модели рекомендованы

для моделирования основными исследовательскими институтами и группами). На рисунке 16 приведены результаты моделирования – зависимости битовой ошибки от  $E_b/N_0$ .

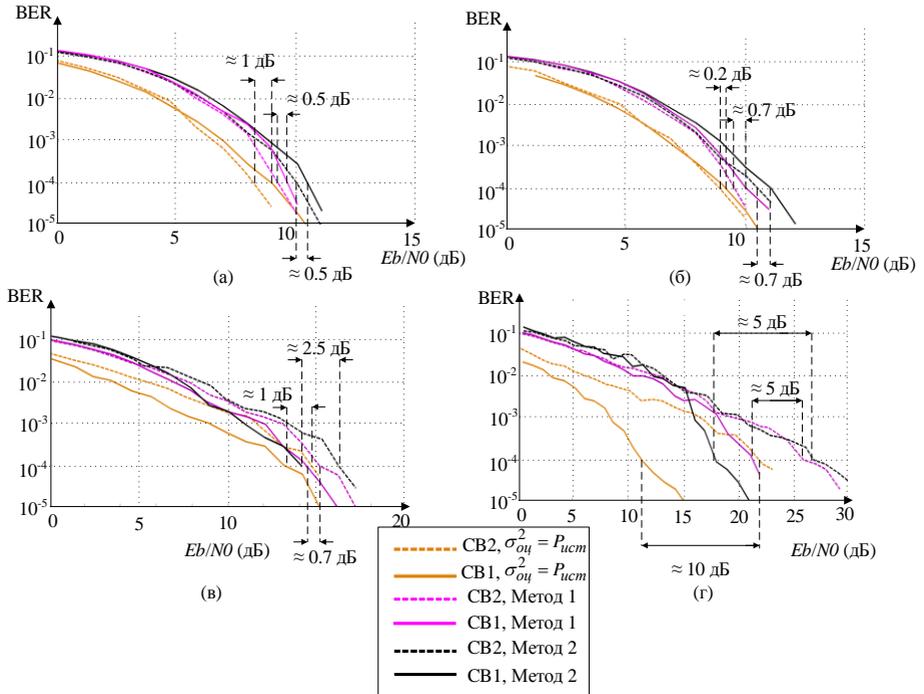


Рисунок 16 – Зависимость вероятности битовых ошибок от  $E_b/N_0$  для системы связи с SCMA с параметрами  $F=4$ ,  $V=6$ ,  $dk=3$ , при передаче в каналах со случайными фазами (а), EFA(б), EVA(в), ETU(г)

Модифицированная кодовая книга (CB2, пунктирные линии) дает преимущество в каналах со слабыми замираниями. В то же время, в каналах с глубокими замираниями (ETU, EVA) предлагаемый подход дает отрицательный эффект. Это объясняется тем, что в случае попадания компоненты кодового слова в область глубоких замираний, для нее значительно ухудшается отношение сигнал-шум. При отсутствии второй сигнальной компоненты верное детектирование всего символа затруднено. Каналы со слабыми замираниями лишены этого недостатка, в них девиации отношения сигнал-шум для разных поднесущих невелики. В результате этого детектирование по одной компоненте для различных кодовых слов возможно и приносит положительный эффект.

Проведено сравнение помехоустойчивости системы связи с SCMA, работающей с кодовыми книгами, предлагаемыми в диссертации (CB 1) и известной ранее кодовой книгой (CB 2), представленной компанией Altera.

Сравнение проводилось для многолучевых релейских каналов. Для каналов со случайными фазами и канала EPA сигналное созвездие изменялось в соответствии с изложенным выше подходом. Зависимости BER от  $E_b/N_0$  приведены на рисунке 17.

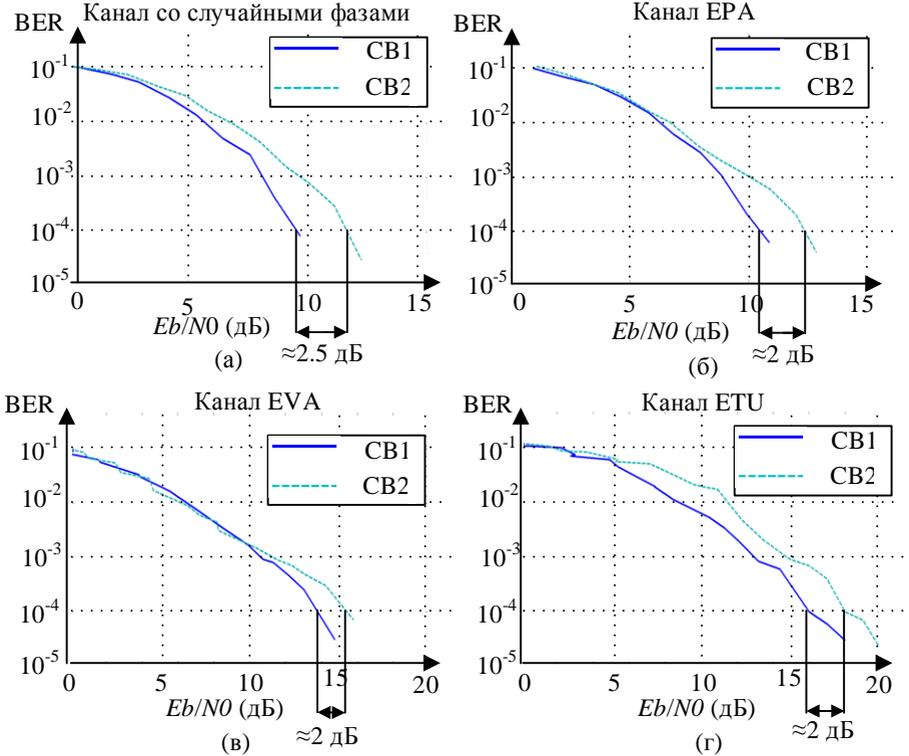


Рисунок 17 – Зависимости вероятности битовых ошибок от  $E_b/N_0$  для систем связи с формированием SCMA символов на основе CB1 и CB2 при передаче в каналах (а) со случайными фазами, (б) канал EPA, (в) канал EVA, (г) канал ETU

Как видно из рисунка 17, использование предложенных в диссертации кодовых книг дает до 2.5 дБ выигрыша, при передаче сигналов в многолучевых каналах и оценке их параметров на стороне приемника.

**В четвертой главе** приведено описание результатов экспериментального исследования системы связи с SCMA и сравнение с существующими системами на основе OFDM-QAM и PSK. Был разработан лабораторный макет, построенный на векторном генераторе сигналов произвольной формы Agilent E8267D и векторном анализаторе сигналов Rohde & Schwarz FSV 3. Передача сигналов осуществлялась в проводных и беспроводных каналах с различными передаточными характеристиками. Для передачи формировались кадры по

схеме, в которой реализованы основные принципы физического уровня систем связи четвертого поколения, рисунок 18.



Рисунок 18 – Последовательность операций по формированию кадра

После приема сигнала выполнялась последовательность операций по синхронизации и обработке кадра, приведенная на рисунке 19.

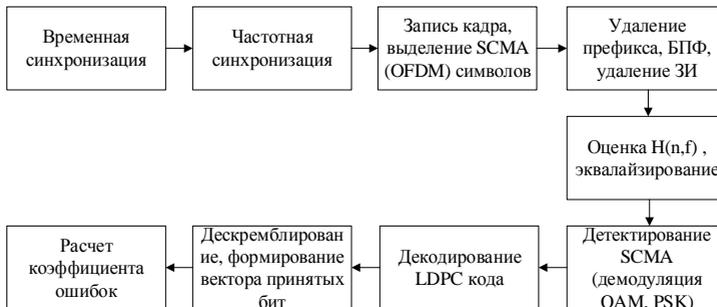


Рисунок 19 – Последовательность операций по обработке принятого кадра

Было получено большое количество зависимостей вероятностей битовых ошибок от  $E_b/N_0$  для различных размерностей кодовых книг ( $V = 150, 400, 600, 800, 1200$ ;  $F = 100, 400, 800$ ) и различных каналов передачи (внутри лаборатории, передача в соседний кабинет сквозь стену, передача по коридору) при разной полосе частот сигнала (1, 2, 5, 10 МГц) и расстоянии между поднесущими. Сигналы передавались на несущей 2.495 ГГц. На рисунке 20 приведены зависимости коэффициентов битовых ошибок от  $E_b/N_0$  и SNR для характерных сценариев передачи при беспроводной передаче внутри

лаборатории. Исследовалась кодовая книга, предложенная в главе 2 (SCMA-F) и кодовая книга с модифицированным созвездием, предложенным в главе 3 (SCMA-M).

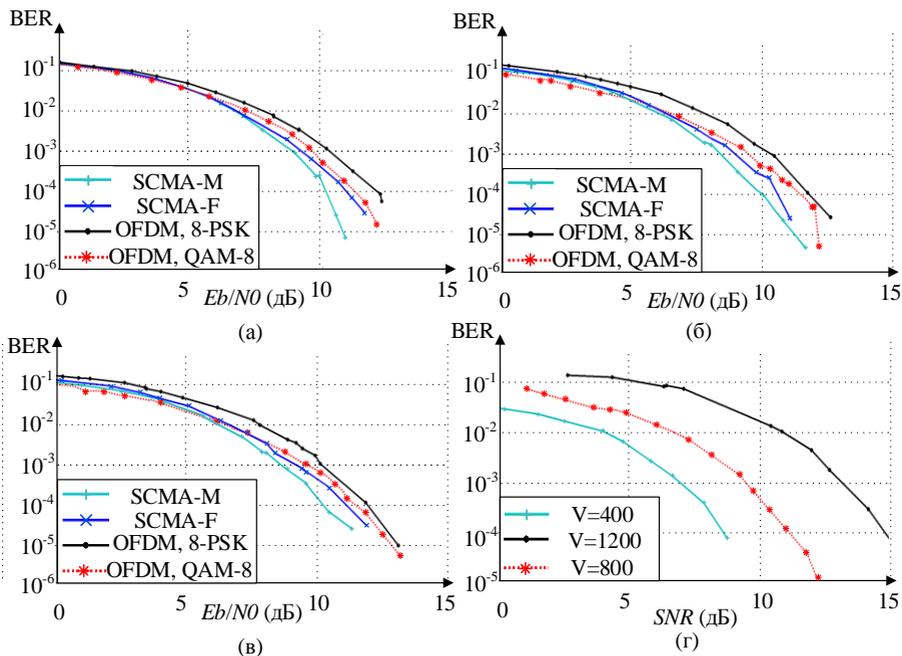


Рисунок 20 – Зависимость вероятности битовых (а) от  $E_b/N_0$ ,  $F=100$ ,  $V=150$ ,  $dk=3$ ,  $\Delta F=1$  МГц; (б) от  $E_b/N_0$ ,  $F=400$ ,  $V=600$ ,  $dk=3$ ,  $\Delta F=5$  МГц; (в) от  $E_b/N_0$ ,  $F=800$ ,  $V=1200$ ,  $dk=3$ ,  $\Delta F=10$  МГц; (г) от SNR,  $F=800$ ,  $dk=3$ ,  $\Delta F=10$  МГц

Результаты экспериментального исследования подтверждают работоспособность предложенных в диссертации алгоритмов формирования и обработки сигналов с SCMA. Зависимости вероятностей ошибок, полученные в эксперименте близки к зависимостям, полученным в результате моделирования. Система с SCMA более эффективно использует частотно-временной ресурс по сравнению с традиционными системами на основе OFDMA. Этот вывод был сделан на основании того, что при заданном отношении сигнал-шум, система связи с SCMA стабильно имела меньшую вероятность битовой ошибки по сравнению с системами на основе OFDM-QAM (PSK). Кроме того, система связи с SCMA, построенная на основе предложенной кодовой книги демонстрирует меньшую вероятность ошибки по сравнению с ранее предложенными кодовыми книгами других авторов при передаче на большом числе поднесущих.

**В заключении** сведены основные результаты и выводы по работе.

1. Предложен метод формирования кодовых книг для необходимого количества поднесущих и абонентов. Для этого генерируется разреженная

матрица необходимой размерности с требуемой степенью разреженности. В графах, соответствующих таким матрицам должны отсутствовать циклы кратности 4. Далее, строки с ненулевыми элементами отображаются в комплексные амплитуды компонент кодовых слов. Сигнальные созвездия этих компонент формируются в результате поворота базового одномерного сигнального созвездия.

2. Путем математического имитационного моделирования получены зависимости вероятностей символьных (битовых) ошибок от отношения сигнал-шум (энергии, приходящейся на один бит сообщения к спектральной плотности мощности шума) для системы связи с SCMA с предложенными кодовыми книгами.

3. Произведено сравнение помехоустойчивости системы связи на основе SCMA с существующими проработанными решениями на основе OFDM – QAM (PSK) и с SCMA с описанными другими авторами кодовыми книгами. По сравнению с системами SCMA с известными книгами при большом числе поднесущих (которое характерно для существующих систем цифрового телевидения и связи) предложенный подход дает 2 дБ выигрыша в ОСШ при достижении вероятности битовой ошибки  $10^{-4}$ . По сравнению с системами на основе OFDM – QAM (PSK) SCMA с предлагаемой кодовой книгой дает 1.5 дБ выигрыша в ОСШ при достижении вероятности битовой ошибки  $10^{-4}$ .

4. Рассмотрена работа системы связи с SCMA в каналах с многолучевым распространением (модели каналов пешехода (EPA), автомобиля (EVA), города (ETU) и канал с постоянными амплитудами и случайными фазами). Предложены способы оценки дисперсии шума на входе детектора МРА, показано как ошибка этой оценки влияет на помехоустойчивость системы связи.

5. Предложен способ модификации сигнального созвездия SCMA, с которым снижается количество битовых ошибок при передаче в каналах пешехода и канале с постоянной амплитудой и случайными фазами (каналы с неглубокими замираниями), при оценке параметров канала с ошибкой.

6. Проведено сравнение работы системы связи с SCMA с предложенными и известными кодовыми книгами. Показано, что при большом числе поднесущих предложенная кодовая книга дает выигрыш 2.5 дБ в ОСШ, при распространении сигналов в многолучевых каналах и вероятности битовой ошибки  $10^{-4}$ .

7. Выполнено экспериментальное исследование передачи сигналов с SCMA. Разработан лабораторный макет системы связи с SCMA. Проведено экспериментальное исследование передачи сигналов по проводному и беспроводному каналам. Зафиксирован выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с системами на основе OFDMA – PSK (QAM) и с системами SCMA с известными кодовыми книгами. Экспериментальное исследование подтвердило работоспособность и корректность разработанных алгоритмов формирования, обработки сигналов и оценки состояния канала распространения радиоволн для систем связи с SCMA.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Покаместов Д.А. Модель фазового шума с учетом спектральной маски синтезаторов частоты и генераторов сигнала / Я.В. Крюков Д.А. Покаместов, Е.В. Рогожников / Известия Томского политехнического университета. Информационные технологии. – 2014. – Т. 325. №5. – С. 54-61.
2. Покаместов Д.А. Формирование и обработка сигналов множественного доступа с разреженным кодом / Д.А. Покаместов, А.Я. Демидов, Я.В. Крюков, и др. // Электросвязь. – 2016. – №10. – С. 56–61.
3. Покаместов Д.А. Помехоустойчивость канала управления системы LTE / Я.В. Крюков, Д.А. Покаместов, Е.В. Рогожников // Технологии и средства связи. — 2016. — №4. — С. 54-57.
4. Покаместов Д.А. Влияние формирующих матриц на помехозащищенность каналов связи с множественным доступом на основе разреженных кодов / Д.А. Покаместов, А.Я. Демидов, Я.В. Крюков // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 65-69.
5. Покаместов Д.А. Алгоритм расчета мощности каналов при неортогональном множественном доступе NOMA / Я. В. Крюков, А. Я. Демидов, Д. А. Покаместов // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 91–94.
6. Покаместов Д.А. Расчет зон обслуживания кластера базовых станций систем сотовой связи при заданном распределении абонентов / Д.А. Покаместов, В.А. Кологривов, Г.П. Бабур-Карателли, Я.В. Крюков // Вестник СИБГУТИ, 2017. – №2. – С. 26–34.
7. Покаместов Д.А. Концепция физического уровня систем связи пятого поколения / Д.А. Покаместов, Я.В. Крюков, Е.В. Рогожников и др. // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2017. – Т. 60. – № 7. – С. 367–382.

### Публикации, индексируемые в Web of Science, Scopus

1. Pokamestov D.A. Multipath powerline communications channel (PLC) modelling / R. Abenov, D. Pokamestov, A. Geltser // Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS), 2015 IEEE International Conference on. – 2015. – PP. 1-4.
2. Pokamestov D.A. Decrease in the computational complexity of the signal processing algorithms for passive radars using the signals of illuminators of opportunity / E. V. Rogozhnikov, D. A. Pokamestov, R. R. Abenov // 2016 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2016. – с. 168-172.
3. Pokamestov D.A. Full duplex wireless communication system, analog and digital cancellation, experimental research / E.V. Rogozhnikov, A.S. Koldomov, D.A. Pokamestov et al. // Control and Communications (SIBCON), 2017 International Siberian Conference on. – 2017. – PP. 1–5.
4. Pokamestov D.A. Dynamically changing SCMA codebooks / D.A. Pokamestov, A.Ya. Demidov, Ya.V. Kryukov, E.V. Rogozhnikov // Control and Communications (SIBCON), 2017 International Siberian Conference on. – 2017. – PP. 1-4.

5. Pokamestov D.A. Concepts of the physical level of the fifth generation communications systems / D.A. Pokamestov, Y.V. Kryukov, E.V. Rogozhnikov et al. // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2017. – V. 60, №.7, PP. 285–296.

#### **Публикации в иных сборниках и журналах**

1. Покаместов Д.А. Обнаружение OFDM сигналов с периодической преамбулой / Д.А. Покаместов, Я.В. Крюков // *Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2014»*. – Томск: В-Спектр, 2014. – Ч. 2. – С. 58–60.

2. Покаместов Д.А. Модель многолучевого канала линии электропередач / Р.Р. Абенюв, Д.А. Покаместов, В.А. Воробьев // *Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2015»*. – Томск: В-Спектр, 2015. – Ч. 2 С. 167-169.

3. Покаместов Д.А. Регистратор OFDM сигналов на базе ПЛИС ALTERA / Д.А. Покаместов, Я.В. Крюков, А.В. Максимов // *Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов. Сборник научных статей Всероссийской научно-практической конференции*. – Барнаул, 2015. – С. 58-63.

4. Pokamestov D.A. Powerline Communications Channel: Modeling and Noise Monitoring / R.R. Abenov, D.A. Pokamestov, A.A. Geltser et al. // «Приборостроение, Электроника и Телекоммуникации – 2015» Сборник статей I Международного форума ИЕЕТ-2015, проводимого в рамках XI Международной научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства». – Ижевск, 2015. – С.7-13.

5. Покаместов Д.А. Сравнение методов помехоустойчивого кодирования в беспроводных системах связи. Моделирование и анализ кодирования с низкой плотностью проверок на четность (LDPC) / А.И. Костюков, Д.А. Покаместов // *Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2016»*. – Томск: В-Спектр, 2016. – С. 256-259.

6. Покаместов Д.А. Множественный доступ с разреженным кодом / Д.А. Покаместов, А.Я. Демидов, Я.В. Крюков // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». *Материалы конференции*. – 2016. – Т. 4. – С. 693-700.

7. Покаместов Д.А. Метод неортогонального множественного доступа / Я.В. Крюков, А.Я. Демидов, Д.А. Покаместов // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». *Материалы конференции*. – 2016. – Т. 4. – С. 658-665.

8. Покаместов Д.А. Формирование и обработка OFDM сигналов / В.В. Ковалев, О.Ю. Селецкая, Д.А. Покаместов // *Молодой ученый*. – 2016. – № 14(118). – С. 151-154.

9. Покаместов Д.А. Формирование разреженных регулярных матриц для LDPC кодирования / А.С. Дубровский, Д.А. Покаместов // *Материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2017»*. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 1. – С. 246-248.