

МЕТОД СИНТЕЗА МАСШТАБИРУЕМЫХ КODOVЫХ КНИГ SCMA

Покаместов Дмитрий Алексеевич,
Томский университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Россия, dmaltomsk@mail.ru

Крюков Яков Владимирович,
Томский университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Россия, kryukov.tusur@gmail.com

Рогожников Евгений Васильевич,
Томский университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Россия, udzhon@mail.ru

Землянухин Сергей Юрьевич,
Томский университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Россия, sergzemlyanukhin@yandex.ru

Литвинов Рудольф Викторович,
Томский политехнический университет, Томск, Россия,
litvinov_rv@mail.ru

Заболоцкий Александр Михайлович,
Томский университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Россия, amz@tusur.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-8-18-26

Manuscript received 05 May 2026;

Accepted 22 July 2026

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки
России по проекту FEWM-2026-0007

Ключевые слова: SCMA, 6G, IoT, разреженные
матрицы, кодовые книги, NOMA, MPA

В статье предлагается метод построения масштабируемых регулярных кодовых книг для систем связи с неортогональным множественным доступом на основе разреженных кодов SCMA (Sparse Code Multiple Access). SCMA позволяет обеспечить высокую помехоустойчивость, спектральную эффективность, большое количество сетевых подключений и рассматривается как один из перспективных методов множественного доступа для систем связи следующих поколений. Эффективность систем с SCMA во многом определяется характеристиками используемых кодовых книг. В работе показано, что применение кодовых книг малой фиксированной размерности ограничивает возможности масштабирования системы и может приводить к ухудшению помехоустойчивости в условиях частотно-селективных замираний. Предложен метод синтеза кодовых книг SCMA, основанный на масштабировании базовых разреженных матриц с использованием квазициклического представления и контроле циклов малой длины в соответствующих матрицам фактор-графах. Для оценки эффективности предложенных решений разработана имитационная модель системы связи с SCMA. Методом Монте-Карло проведена оценка вероятностей битовых ошибок в различных моделях каналов распространения радиоволн. Результаты моделирования показывают, что увеличение размерности кодовых книг позволяет существенно снизить вероятность битовых ошибок в каналах с групповыми частотно-селективными замираниями, при сохранении вычислительной сложности алгоритма детектирования.

Информация об авторах:

Покаместов Дмитрий Алексеевич, доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники, к.т.н., ФГАОУ ВО "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники", Томск, Россия. ORCID 0000-0002-9405-4573

Крюков Яков Владимирович, доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники, к.т.н., ФГАОУ ВО "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники", Томск, Россия. ORCID 0000-0002-4115-9080

Рогожников Евгений Васильевич, заведующий кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники, к.т.н., ФГАОУ ВО "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники", Томск, Россия. ORCID 0000-0001-7599-0393

Землянухин Сергей Юрьевич, аспирант кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники, ФГАОУ ВО "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники", Томск, Россия

Литвинов Рудольф Викторович, доцент Отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники, к.ф.-м.н., Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Заболоцкий Александр Михайлович, директор института радиоэлектронной техники, ФГАОУ ВО "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники", Томск, Россия. ORCID 0000-0002-1801-7922

Для цитирования:

Покаместов Д. А., Крюков Я. В., Рогожников Е. В., Землянухин С. Ю., Литвинов Р. В., Заболоцкий А. М. Метод синтеза масштабируемых кодовых книг SCMA // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №8. С. 18-26.

For citation:

D. A. Pokamestov, Ya. V. Kryukov, E. V. Rogozhnikov, S. Yu. Zemlyanukhin, R.V. Litvinov, A.M. Zabolotskiy "A Method for the Design of Scalable SCMA Codebooks," T-Comm, 2026, vol. 20, no.8, pp. 18-26. (in Russian)

Введение

Методы неортогонального множественного доступа NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) являются перспективной технологией для повышения спектральной эффективности, помехоустойчивости и плотности подключений в системах связи следующих поколений. В ряде публикаций NOMA рассматривается для организации физического уровня в системах мобильной связи шестого поколения 6G [1-4]. По принципу разделения пользователей NOMA подразделяются на методы в домене мощности PD-NOMA (Power Domain NOMA) [5] и в домене кода CD-NOMA (Code Domain NOMA) [6]. Одним из наиболее перспективных методов CD-NOMA является SCMA [7]. SCMA основан на использовании разреженных многомерных кодовых книг, обеспечивающих отображение информационных битов в разреженные комплексные векторы.

Для детектирования переданных данных на приемной стороне применяется алгоритм распространения сообщений MPA (Message Passing Algorithm). За счет многомерности и разреженности кодовых слов SCMA позволяет реализовать перегруженные режимы передачи при числе абонентов, превышающем число ортогональных ресурсных элементов.

В таких условиях достигается повышенная спектральная эффективность и помехоустойчивость при сохранении приемлемой вычислительной сложности детектирования. Большинство методов NOMA могут быть реализованы совместно с ортогональным частотным мультиплексированием OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), что позволяет интегрировать их в системы мобильной связи, использующие OFDM в качестве технологии физического уровня. Также рассматриваются вопросы комбинирования SCMA с новыми методами формирования сигналов, такими как модуляция в ортогональном частотно-временном пространстве OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) [8] и аффинное частотное мультиплексирование AFDM (Affine Frequency Division Multiplexing) [9].

Характеристики систем на основе SCMA во многом определяются структурой кодовых книг, поэтому их формирование является ключевой задачей. В последние годы опубликован ряд работ, предлагающих различные подходы к синтезу кодовых книг. Большинство существующих методов основано на многоэтапном проектировании, включающем формирование многомерного базового сигнального созвездия, его преобразование и также построение кодовых книг отдельных слоёв с использованием разреженных матриц [10, 11].

Наибольшее внимание в литературе уделяется проектированию базовых сигнальных созвездий, в качестве которых рассматриваются различные варианты амплитудной модуляции QAM (Quadrature Amplitude Modulation) [12, 13], модуляции угла золотого сечения GAM (Golden Angle Modulation) [14] и другие конструкции. Помимо структурированных созвездий исследуются методы динамической оптимизации их формы [15], включая подходы на основе машинного обучения [16].

Несмотря на активные исследования SCMA в целом и кодовых книг в частности, ряд вопросов остается недостаточно изученным.

В частности, в большинстве работ не рассматриваются задачи синтеза формирующих разреженных матриц и связанных с ними фактор-графов.

Как правило, в литературе используются кодовые книги малой размерности, чаще всего для шести абонентов и четырёх поднесущих, за исключением отдельных работ [11, 17].

Несмотря на то что кодовые книги малой фиксированной размерности демонстрируют высокую эффективность в каналах с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ), их применение в многолучевых каналах сопряжено с рядом ограничений. Прежде всего это связано с глубокими частотно-селективными замираниями, которые могут существенно искажать несколько соседних поднесущих OFDM и, таким образом, затрагивать все ненулевые компоненты кодового слова.

Другой проблемой является наличие коротких циклов в фактор-графах, соответствующих разреженным матрицам малой размерности. Это приводит к корреляции передаваемых сообщений в алгоритме MPA и, как следствие, к ухудшению его сходимости и росту BER (Bit Error Rate) [19].

В литературе недостаточно освещены вопросы формирования кодовых книг масштабируемой размерности и их влияния на помехоустойчивость SCMA. В основном рассматриваются работы, посвящённые совместному проектированию протографов низкоплотностных кодов и SCMA [20]. Основы подхода к формированию кодовых книг произвольной размерности и оценка их эффективности в каналах с аддитивным белым гауссовским шумом представлены в [21]. В этой работе предлагается метод формирования масштабируемых кодовых книг с контролем циклов малой кратности в разреженных матрицах. Метод позволяет формировать кодовые книги большой размерности с числом абонентов и поднесущих, превышающим 10^3 .

Показано, что увеличение размерности кодовых книг приводит к линейному росту вычислительной сложности обнаружения, остающейся сопоставимой со сложностью схем, использующих кодовые книги малой размерности. Результаты имитационного моделирования нисходящего канала (downlink) демонстрируют улучшение характеристик BER в зависимости от отношения сигнал шум SNR (Signal-to-Noise Ratio). Исследования проводились в различных моделях многолучевых каналов с замираниями, стандартизованных 3GPP [22]. Предложенный подход расширяет возможности применения SCMA в сценариях массового обслуживания и может быть использован при разработке перспективных беспроводных систем связи.

1 Модель системы связи с SCMA

1.1 Формирование и обработка сигналов с SCMA

На рисунке 1 представлена структурная схема канала связи с использованием SCMA. Базовая станция (передатчик) обслуживает J абонентов (слоев) и передает каждому предназначенный ему битовый вектор $\mathbf{b}_j, j = 1, \dots, J$. Рассматривается нисходящий канал с применением технологии OFDM, что подразумевает формирование K информационных поднесущих в частотной области.

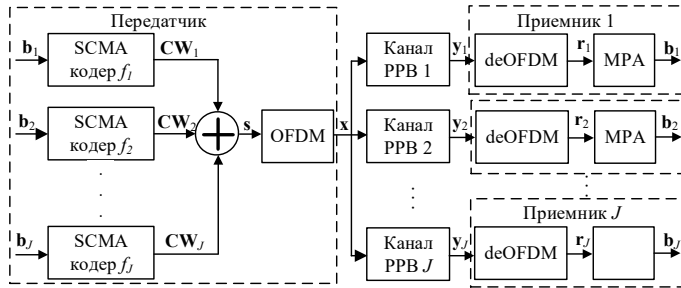


Рис. 1. Структурная схема канала связи с SCMA

Входные бинарные последовательности отображаются в комплексные разреженные кодовые слова в блоках SCMA кодер, каждый из которых определяет правило отображения:

$$f_j : \mathbb{B}^{\log_2(M)} \rightarrow \mathbf{CW}_{j,m_j}, \quad (1)$$

где M – индекс модуляции, определяющий битовую скорость, m_j – индекс выбранного кодового слова.

Сформированные в соответствии с (1) кодовые слова покомпонентно суммируются, образуя передаваемый SCMA символ:

$$\mathbf{s} = \sum_{j=1}^J \mathbf{CW}_{j,m_j}.$$

Из K компонентов, принимающих участие в формировании каждого элемента s_k ($\mathbf{s} = (s_k)$, $k = 1, \dots, K$) только dk не равны нулю, т.е. на каждой поднесущей одновременно сигналы передают dk абонентов.

Далее выполняются классические операции по формированию OFDM символов: добавление защитных интервалов, быстрое преобразование Фурье для перехода во временную область, добавление циклического префикса и др. В результате этих операций формируется OFDM символ, значение которого во временном домене обозначено $\mathbf{x}$.

После прохождения канала распространения радиоволн (РРВ) на входе j -го приемника формируется вектор принятого символа, который в частотном домене описывается выражением:

$$\mathbf{y}_j = \text{diag}(\mathbf{h}_j)\mathbf{s} + \mathbf{n}_j, \quad (2)$$

где $\mathbf{h}_j$ – канальный вектор, содержащий комплексные коэффициенты передачи на K поднесущих, $\mathbf{H} = (\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_J)^T = (h_{j,k})$ – канальная матрица, $\mathbf{n}_j \sim \mathcal{CN}(0, N_0 \mathbf{I})$ – вектор отсчетов аддитивного белого гауссовского шума с дисперсией N_0 , $\mathbf{I}$ – единичная матрица.

На приемной стороне выполняются классические операции по обработке OFDM символов: удаление циклического префикса, перевод в частотную область, эквалайзирование, выделение информационных поднесущих и др. Для детектирования SCMA символов и выделения оценки битового сообщения $\mathbf{b}_j$ выполняется алгоритм МРА. МРА основан на обмене сообщениями о вероятностях прихода компонентов кодового слова между узлами двудольного графа [7].

1.2 Кодовые книги SCMA

Ключевым элементом архитектуры системы связи с SCMA является правило отображения входных битовых

последовательностей в кодовые слова (1), которое задается кодовой книгой. Структура кодовой книги непосредственно связана с формой сигналов и распределением ресурсов и оказывает решающее влияние на помехоустойчивость системы. Общая кодовая книга $\mathbf{CB}$ является трехмерной матрицей и состоит из кодовых книг слоев $\mathbf{CB}_j$, каждая из которых, в свою очередь, содержит M кодовых слов. Кодовые слова являются разреженными векторами, состоящими из K элементов, из которых только dk не равно нулю. В каждом из K ресурсных элементов (например, поднесущих OFDM) одновременно ведут передачу только dk из J абонентов. Связь между абонентами и ресурсными элементами задается формирующей разреженной матрицей $\mathbf{F} \in \mathbb{B}^{K \times J}$, $\mathbf{F} = (\mathbf{f}_j) = (f_{kj})$, $j = 1, \dots, J$, $k = 1, \dots, K$ и соответствующим ей двудольным фактор-графом. Пример матрицы $\mathbf{F}$ и фактор-графа для $J = 6$, $K = 4$, $dk = 2$, $dk = 3$ приведен на рисунке 2 [19]. Круги фактор-графа соответствуют ресурсным элементам (строкам $\mathbf{F}$), а квадраты – абонентам (столбцам $\mathbf{F}$). Ребро графа соединяет j -ый квадрат и k -ый круг, если $f_{kj} = 1$.

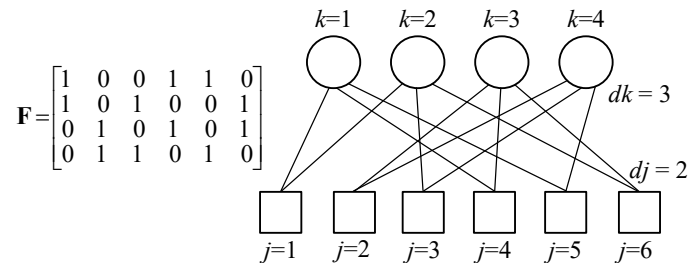


Рис. 2. Пример формирующей матрицы $\mathbf{F}$ и соответствующего ей фактор-графа для $J = 6$, $K = 4$, $dj = 2$, $dk = 3$

На рисунке 3 приведен пример сформированной на основе $\mathbf{F}$ общей кодовой книги (а), кодовых книг слоев (б) и кодовых слов 4-го слоя (в) [19]. В этом примере каждая кодовая книга содержит $M = 4$ кодовых слов.

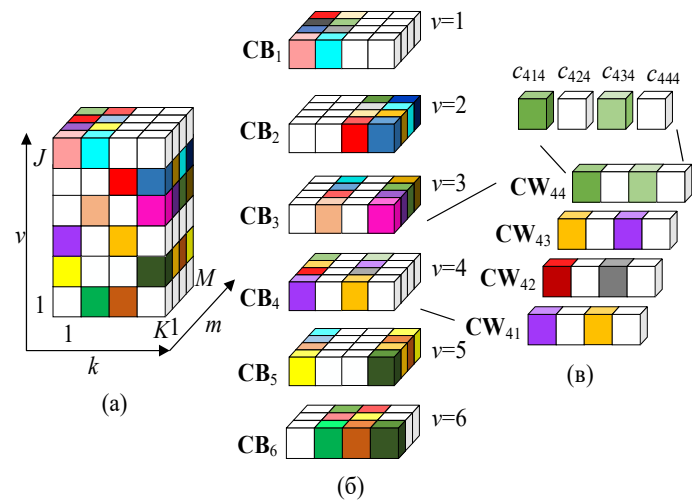


Рис. 3. Пример кодовой книги SCMA для $J = 6$, $K = 4$, $dj = 2$, $dk = 3$

Кодовая книга j -го слоя может быть получена с помощью следующего выражения [11]:

$$\mathbf{CB}_j = \mathbf{V}_j \Delta_j \mathbf{M}_c, \quad (3)$$

где $\mathbf{M}_c \in \mathbb{C}^{dj \times M}$ – материнское созвездие, $\Delta_j \in \mathbb{C}^{dj \times dj}$ – оператор преобразования (например, поворота [11]) материнского созвездия, $\mathbf{V}_j \in \mathbb{B}^{K \times dj}$ – оператор отображения на ресурсные элементы, удовлетворяющий условию $\mathbf{f}_j = \text{diag}(\mathbf{V}_j \mathbf{V}_j^T)$.

Отметим, что проектирование кодовых книг является сложной оптимизационной задачей, которую можно сформулировать как:

$$\mathbf{V}_j, \Delta_j, \mathbf{M}_c = \arg \max_{\mathbf{V}_j, \Delta_j, \mathbf{M}_c} (m(\mathbf{V}_j, \Delta_j, \mathbf{M}_c, J, K, df, dj, M)) \quad (4)$$

где m – заданный оптимизационный критерий, например, минимальное евклидово расстояние между точками многомерного сигнального созвездия [14]. Задача (4) комбинаторная, подразумевает наличие различных критериев m и не имеет однозначного аналитического решения. В ряде работ рассматриваются вопросы проектирования $\mathbf{M}_c$ и Δ_j [7, 10–14]. Вместе с тем, вопросы проектирования $\mathbf{F}$ рассматриваются значительно реже.

Задача формирования масштабируемых кодовых книг может быть представлена в виде последовательности этапов. На первом этапе осуществляется синтез формирующей матрицы распределения ресурсов $\mathbf{F} \in \mathbb{B}^{K \times J}$ требуемой размерности, определяющей структуру взаимодействия слоёв и ресурсных элементов. На втором этапе на основе постановки задачи (4) и выбранного критерия оптимизации m выполняется проектирование материнского созвездия $\mathbf{M}_c$ и операторов преобразования Δ_j . Третьим этапом является формирование кодовых книг слоёв в соответствии с (3), то есть отображение преобразованного материнского созвездия на ресурсные элементы.

2 Формирование масштабируемых кодовых книг SCMA

2.1 Требования к формирующим разреженным матрицам

В большинстве известных работ используется матрица распределения ресурсов $\mathbf{F}$, соответствующая конфигурации с шестью слоями и четырьмя ресурсными элементами ($J=6$, $K=4$), структура которой приведена на рисунке 2. Применение фиксированной матрицы малой размерности существенно ограничивает возможности масштабирования системы. Такой подход не позволяет формировать кодовые книги большого размера, необходимые для реализации сценариев массового обслуживания, а также для эффективной работы в каналах с частотно-селективными замираниями.

Рассмотрим требования к матрице $\mathbf{F}$, предъявляемые в соответствии с особенностями формирования и обработки сигналов с SCMA:

1. Матрица $\mathbf{F}$ должна быть регулярной, то есть число единичных элементов в каждой строке и в каждом столбце должно быть одинаковым:

$$\sum_{k=1}^K f_{kj} = dj, \forall j = 1, \dots, J, \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J f_{kj} = dk, \forall k = 1, \dots, K. \quad (6)$$

Регулярность структуры обеспечивает одинаковую вычислительную сложность обработки для всех узлов

алгоритма МРА и упрощает его программную и аппаратную реализацию.

2. Исключение циклов малой кратности в соответствующей матрице $\mathbf{F}$ двудольном графе. Под циклом кратности L понимается замкнутый путь, проходящий по различным вершинам графа и возвращающийся в исходную вершину. В двудольном графе длина любого цикла является чётной. Требование заключается в том, что минимальная длина цикла (обхват графа):

$$g = \min(L). \quad (7)$$

должна быть не меньше заданного значения. Пример появления двух циклов кратности 4 в фактор-графе для $J=6$, $K=4$, $dj=2$, $dk=3$ приведен на рисунке 4.

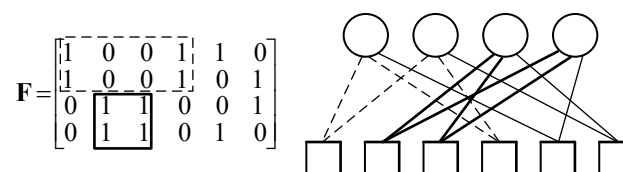


Рис. 4. Пример появления циклов кратности $g=4$ в фактор-графе

Исключение коротких циклов уменьшает корреляцию сообщений в алгоритме МРА. Наличие циклов малой длины приводит к тому, что при итерационной передаче сообщений между узлами фактор-графа информация быстро возвращается к исходному узлу по замкнутому пути. В результате сообщения становятся статистически зависимыми уже на ранних итерациях, что нарушает предположение об их условной независимости, лежащее в основе алгоритма МРА.

3. Матрица $\mathbf{F}$ должна задавать связный двудольный граф, то есть между любыми двумя вершинами графа должен существовать путь. На рисунке 5 приведен пример несвязного графа, в котором группы слоёв взаимодействуют только с определенными ресурсными элементами. Отметим, что такая структура уменьшает минимальную длину циклов g , которая в рассматриваемом сценарии также равна четырем.

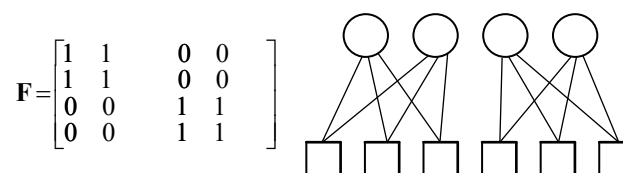


Рис. 5. Пример несвязного фактор-графа

Требование полноточности обеспечивает обмен сообщениями между всеми узлами фактор-графа и снижает вероятность формирования структур, способствующих появлению коротких циклов.

2.2 Алгоритм синтеза формирующей матрицы

Синтез разреженной матрицы распределения ресурсов может осуществляться на основе подхода, аналогичного алгоритму Галлагера, применяемому при построении низкоплотностных кодов LDPC (Low Density Parity Check). В этом случае матрица формируется путем последовательного добавления строк заданного веса с последующим контролем циклов

и структуры фактор-графа [19]. Однако при увеличении размерности матрицы такой подход приводит к росту вычислительной сложности.

В настоящей работе предлагается алгоритм формирования матрицы $\mathbf{F}$, основанный на ее квазициклическом отображении. Такой подход широко применяется при построении проверочных матриц LDPC кодов, например, в стандарте 5G NR.

Для генерации разреженной матрицы $\mathbf{F} \in \mathbb{B}^{K \times J}$ с параметрами dj, dk, g алгоритм включает в себя следующие шаги:

1. Выбор базовой матрицы $\mathbf{F}_0 \in \mathbb{B}^{K_0 \times J_0}$, с параметрами dj, dk, g_0 не содержащей коротких циклов. При этом должны выполняться условие:

$$\frac{J}{J_0} = \frac{K}{K_0} = Z, \quad (8)$$

где $Z \in \mathbb{N}$ – размер циркулянта.

2. Каждому ненулевому элементу $\mathbf{F}_0$ ставится в соответствие циркулянтная матрица $\mathbf{P}(a_{r,u})$ размерности $Z \times Z$, определяемая параметром циклического сдвига $a_{r,u} \in \{0, \dots, Z-1\}$, $\mathbf{A} = (a_{r,u}), r = 1, \dots, K_0, u = 1, \dots, J_0$. Циркулянтная матрица $\mathbf{P}(a_{r,u})$ представляет собой единичную диагональную матрицу, столбцы которой циклически сдвинуты на $a_{r,u}$ вправо. При этом если $a_{r,u} = -1$, то $\mathbf{P}$ – нулевая матрица. Например:

$$Z = 3, \mathbf{P}(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{P}(2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{P}(-1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3. Для выбора $a_{r,u}$ предлагается последовательное жадное случайное назначение из допустимого диапазона $\{0, \dots, Z-1\}$ с контролем появления циклов минимальной заданной кратности g . Между последовательностью вершин фактор-графа с индексами $r_i \in \{1, \dots, K_0\}, u_i \in \{1, \dots, J_0\}, f_{0,r_i,u_i} = 1$ отсутствует цикл длиной g , если выполняется условие [23]:

$$\sum_{i=1}^{g/2} (a_{r_i, u_i} - a_{r_i, u_{i+1}}) \neq 0 \pmod{Z} \quad (9)$$

В случае, если на этом этапе работы алгоритма условие (9) не выполняется, выбирается другое случайное значение $a_{r,u}$.

При возникновении ситуации, в которой невозможно сформировать $\mathbf{A} = (a_{r,u})$, не приводящую к появлению циклов кратности g , алгоритм возвращается ко второму шагу и назначение значений $a_{r,u}$ выполняется заново. В случае недостижения результата в течение заданного числа итераций алгоритм принудительно заканчивает работу.

4. После выбора всех $a_{r,u}$ для формирования $\mathbf{F}$ каждый элемент $f_{0,r,u}$ заменяется на матрицу $\mathbf{P}(a_{r,u})$.

Рассмотрим пример работы алгоритма. Пусть требуется создать формирующую матрицу $K = 18, J = 12, dj = 2, dk = 3, g = 8$. В качестве базовой матрицы $\mathbf{F}_0$ выберем разреженную матрицу, приведенную на рисунке 2 с параметрами $K_0 = 4, J_0 = 6, dj = 2, dk = 3, g_0 = 6$. В этом случае, в

соответствии с (8) параметр $Z = 3$. В результате работы алгоритма формируется матрица значений сдвига циркулянтов:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & -1 & 2 & -1 \end{bmatrix}.$$

Результирующая матрица имеет вид:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Соответствующий матрице (9) граф приведен на рисунке 6.

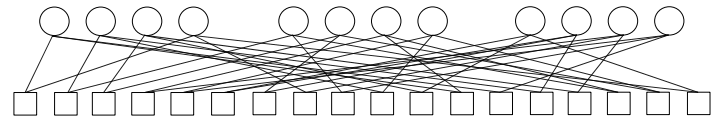


Рис. 6. Фактор-граф для матрицы (9)

Отметим, минимальная кратность циклов фактор-графа матрицы (10) составляет $g = 8$, в то время как для фактор-графа базовой матрицы $\mathbf{F}_0$ $g_0 = 6$. Увеличение кратности циклов обеспечивает снижение корреляции абонентских сигналов.

На рисунке 7 приведен фактор-граф, образующийся при применении кодовой книги с $K = 4, J = 6$ для 12 ресурсных элементов и 18 слоев.

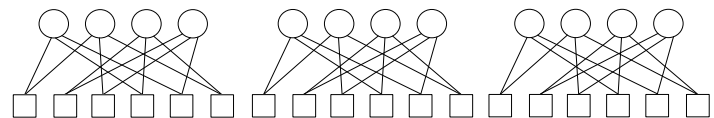


Рис. 7. Фактор-граф при использовании кодовой книги с $K = 4, J = 6$ на 12 ресурсных элементах и 18 слоях

Особенностями фактор графа, приведенного на рисунке 7, является наличие циклов кратности $g = 6$ и отсутствие связности, что приводит к выполнению детектирования МРА по отдельности над группами поднесущих. В отличие от этого, фактор-граф, приведенный на рисунке 6, является связным, что обеспечивает последовательный обход всех узлов при работе МРА.

Отдельно отметим, что как показано в [7], вычислительная сложность алгоритма МРА имеет порядок $O(I \cdot K \cdot M^{dk})$, где I – число итераций алгоритма. При использовании кодовых книг малой размерности, формирующих сигналы на группах из K_0 ресурсных элементов (как показано на рисунке 7), детектирование выполняется независимо для каждой группы. В этом случае параллельно выполняются $Z = K/K_0$ независимых алгоритмов МРА. Соответственно, суммарная вычислительная сложность обработки также имеет порядок

$O(I \cdot Z \cdot K_0 \cdot M^{dk}) = O(I \cdot K \cdot M^{dk})$, то есть совпадает со сложностью схемы, использующей кодовую книгу большой размерности на том же числе ресурсных элементов. Таким образом, увеличение размерности кодовых книг за счёт масштабирования формирующей матрицы не приводит к росту вычислительной сложности детектирования.

3 Результаты моделирования

Для оценки эффективности предложенного метода была разработана имитационная модель системы связи с SCMA, построенная в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1. Модель включает формирование SCMA символов с использованием синтезированных кодовых книг, OFDM-модуляцию, прохождение сигнала через канал распространения радиоволн, а также детектирование на приемной стороне с применением алгоритма МРА.

Для обеспечения корректной оценки эффективности предложенных решений, канальное кодирование в модели системы не использовалось. Эффективность работы оценивалась по зависимостям вероятности битовой ошибки BER (Bit Error Rate) от отношения энергии, приходящейся на бит информации к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 . Моделирование выполнялось методом Монте-Карло с многократной генерацией передаваемых символов, случайных реализаций канала и аддитивного гауссова шума.

В работе рассматриваются два сценария канала распространения радиоволн, соответствующих (2). В первом сценарии используется классическая модель некоррелированного частотно-селективного канала Релея $h_{j,k} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_h^2)$, $\sigma_h^2 = 1$ (далее канал Релея). Для такой модели характерны глубокие замирания на отдельных поднесущих, случайным образом распределённые по всему частотному спектру.

Во втором сценарии используется стандартизованная модель многолучевого канала Релея TDL-C (Tapped Delay Line C), рекомендованная в спецификации 3GPP TR 38.901 [22] (далее TDL-C). Данная модель описывает частотно-селективный канал с многолучевым распространением и значительным разбросом задержек, характерный для сценариев мобильной связи в городской застройке. В таких условиях группы соседних поднесущих могут одновременно испытывать глубокие замирания. Примеры реализаций канальных векторов для обоих сценариев приведены на рисунке 8.

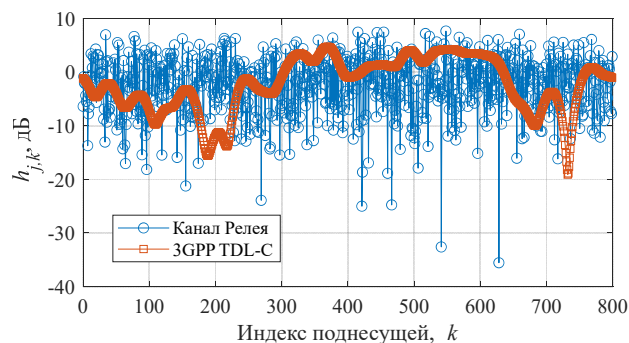


Рис. 8. Пример реализаций канальных векторов в двух сценариях

Во всех сценариях моделирования использовались кодовые книги с одинаковыми параметрами $dj = 2$, $dk = 3$, $M = 4$,

при этом изменялась их размерность, определяемая параметрами K, J . При синтезе формирующих матриц использовалась базовая матрица, приведенная на рисунке 2, а минимальная длина циклов g менялась для различных кодовых книг. Формирование кодовых книг, включая синтез операторов Δ_j и $\mathbf{M}_c$ основано на подходе, описанном в [11]. Для детектирования символов применялся алгоритм МРА с семью итерациями.

На рисунках 9-10 приведены зависимости среднего значения BER по всем абонентам от E_b/N_0 , демонстрирующие влияние минимальной длины циклов g на помехоустойчивость системы связи с SCMA. В этом эксперименте было сгенерировано четыре кодовых книги, для которых параметры $K = 16$, $J = 24$ совпадали, а минимальная длина циклов в формирующей матрице (параметр g) принимала значения [4, 6, 8, 12].

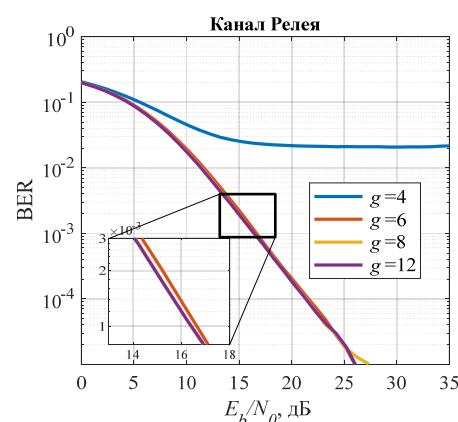


Рис. 9. Зависимости BER от E_b/N_0 в модели канала Релея при разных g

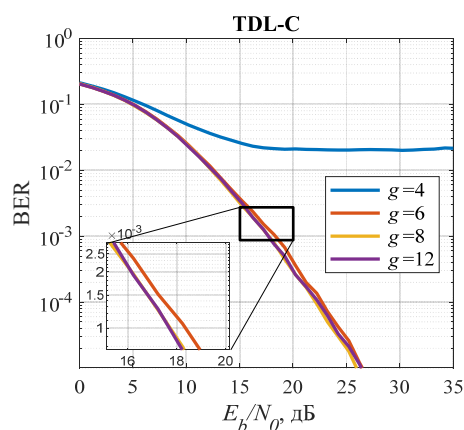


Рис. 10. Зависимости BER от E_b/N_0 в модели канала TDL-C при разных g

Как видно из рисунков, в обеих моделях каналов зависимости BER имеют схожий характер. Наличие циклов длины $g = 4$ приводит к существенному ухудшению BER. Из-за корреляции сообщений в фактор-графе алгоритма МРА при увеличении E_b/N_0 вероятность битовых ошибок не уменьшается до нулевых значений. В то же время исключение циклов большей кратности приводит лишь к незначительному улучшению характеристик BER. Так, для достижения вероятности ошибки 10^{-3} при наличии циклов длины $g = 6$ требуется

примерно на 0.5 дБ большее значение E_b/N_0 по сравнению с кодовыми книгами, в которых присутствуют только циклы длины $g = 8$ и $g = 12$.

На рисунках 11-12 приведены зависимости BER от E_b/N_0 демонстрирующие влияние масштабирования размерности кодовых книг. Рассматривалось семь синтезированных кодовых книг, параметры которых приведены в таблице 1. Отметим, что параметры кодовой книги 1 соответствуют наиболее распространенному в литературе сценарию [7-9, 11, 13, 15].

Таблица 1

Параметры синтезированных кодовых книг

	J	K	g
CB № 1	6	4	6
CB № 2	12	8	8
CB № 3	48	32	12
CB № 4	96	64	16
CB № 5	384	256	16
CB № 6	768	512	16
CB № 7	1536	1024	16

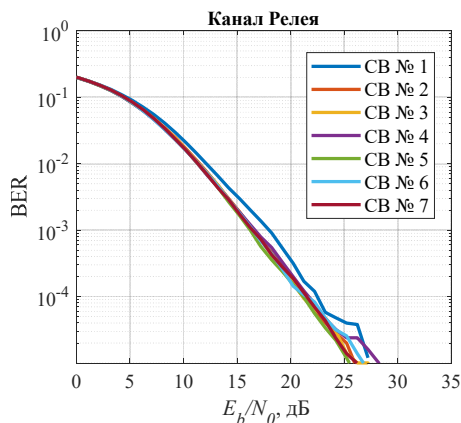


Рис. 11. Зависимости BER от E_b/N_0 в модели канала Релея для кодовых книг из таблицы 1

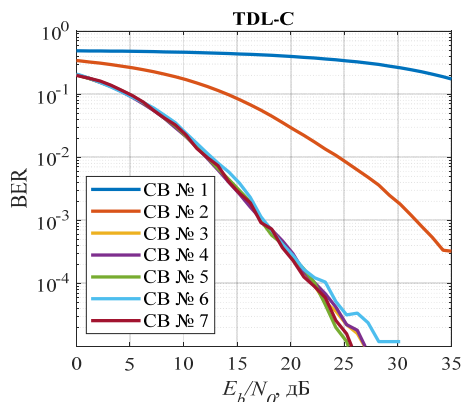


Рис. 12. Зависимости BER от E_b/N_0 в модели канала TDL-C для кодовых книг из таблицы 1

Как видно из рисунка 11, увеличение размерности кодовых книг приводит к снижению вероятности битовых ошибок. Наиболее заметный прирост эффективности наблюдается при двукратном масштабировании кодовой книги до $K = 8$ ресурсных элементов. Рисунок 12 показывает, что при наличии групповых замираний, характерных для модели TDL-C, дальнейшее

увеличение размерности до $K = 48$ (кодовая книга № 3) обеспечивает дополнительное снижение BER по сравнению с кодовыми книгами малой размерности (№1 и №2). При этом последующее увеличение размерности кодовых книг не приводит к дальнейшему улучшению помехоустойчивости.

На рисунках 13 и 14 приведено сравнение использования масштабируемых кодовых книг и кодовой книги малой размерности (CB №1 из табл. 1) при разбиении общего числа поднесущих K (8, 64, 1024) на группы по четыре. Пример такого разбиения показан на рисунке 7.

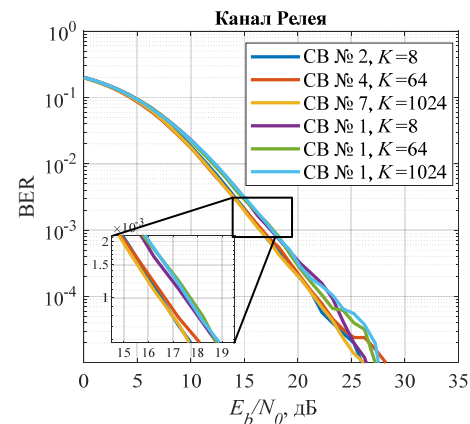


Рис. 13. Зависимости BER от E_b/N_0 в модели канала Релея при использовании малых и масштабируемых кодовых книг

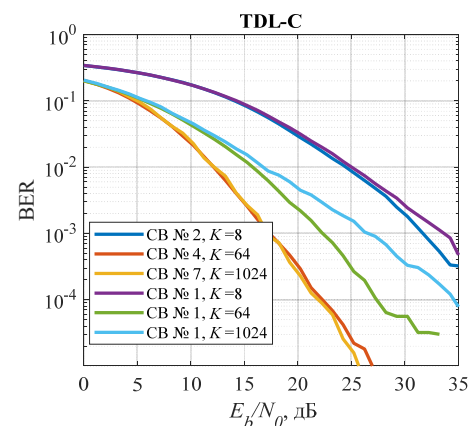


Рис. 14. Зависимости BER от E_b/N_0 в модели канала TDL-C при использовании малых и масштабируемых кодовых книг

Рисунок 13 демонстрирует, что использование масштабируемых кодовых книг в канале Релея обеспечивает более высокую помехоустойчивость по сравнению с применением кодовой книги №1. Выигрыш составляет около 1 дБ при $BER = 10^{-3}$. При этом вследствие случайных некоррелированных замираний, характерных для этой модели канала, применение кодовой книги №1 на различном числе поднесущих приводит к практически одинаковому уровню помехоустойчивости. Этот уровень уступает результатам, достигаемым при использовании масштабируемых кодовых книг, для которых наблюдаются близкие значения BER.

Как видно из рисунка 14, в модели канала TDL-C использование масштабируемых кодовых книг (№ 4 и 7) обеспечивает существенно меньшую вероятность битовых ошибок по сравнению с применением кодовой книги №1. Помехоустойчивость системы с CB №1 значительно зависит от числа

используемых поднесущих. Если короткий SCMA символ (для СВ №1 его длина равна 4) попадает в область глубоких замираний, детектирование с использованием алгоритма МРА приводит к появлению битовых ошибок. При использовании более длинных SCMA символов (в рассматриваемом примере их длина составляет 8, 64 и 1024) даже при попадании части их элементов в область глубоких замираний детектирование МРА может быть выполнено корректно, что обеспечивает более высокую помехоустойчивость системы.

Заключение

В работе предложен метод синтеза кодовых книг SCMA, основанный на масштабировании базовых разреженных матриц. В основе метода лежит замена ненулевых элементов базовой матрицы на циркулянтные матрицы, параметры которых выбираются с учетом контроля циклов малой кратности в соответствующих матрицам фактор-графах.

Показано, что использование кодовых книг большой размерности не приводит к увеличению вычислительной сложности алгоритма детектирования МРА. При передаче SCMA символов в системах связи с OFDM в условиях многолучевых каналов предложенный подход позволяет существенно снизить вероятность битовых ошибок.

Рассмотрено влияние циклов малой длины в фактор-графах, соответствующих формирующим матрицам. Показано, что наиболее деструктивное влияние оказывают циклы длины 4, которые должны быть устранены на этапе синтеза формирующей матрицы. В то же самое время устранение циклов длины ≥ 8 приводит лишь к незначительному росту помехоустойчивости.

Имитационное моделирование системы связи с использованием предложенных решений демонстрирует повышение помехоустойчивости передачи при увеличении размерности кодовых книг. Наиболее заметно этот эффект проявляется в каналах с глубокими групповыми замираниями, к которым относится модель TDL-C. Природа наблюдаемого выигрыша обусловлена разнесением элементов кодовых слов по различным областям частотного спектра, что приводит к распределению и усреднению влияния замираний при работе алгоритма МРА.

Сравнение предложенного подхода с базовой схемой, использующей кодовую книгу малой размерности и группировку поднесущих, показывает, что выигрыш от масштабирования кодовых книг может превышать 10 дБ.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2026-0007.

Литература

1. Tera S. P., Chinthajjala R., Pau G., Kim T. H. Toward 6G: An overview of the next generation of intelligent network connectivity // IEEE Access. 2024. №. 13, pp. 925-961.
2. Pokamestov D.A. et al. 6G communication systems: concept, trends, physical level technologies // Radio Engineering and Electronics. 2024. Vol. 69, №. 1, pp. 3-33.
3. Sarkar D., Yadav S.S., Pal V., Kumar N., Patra S.K. A comprehensive survey on IRS-assisted NOMA-based 6G wireless network: Design perspectives, challenges and future directions // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2024. Vol. 21, №. 2, pp. 2539-2562.
4. Pokamestov D., Kryukov Y., Rogozhnikov E., Shalin G., Shinkevich A., Litvinov R. Comparative analysis of multiple access techniques for 6G communication systems: D. Pokamestov et al // Telecommunication Systems. 2025. Vol. 88, №. 3, p. 104.
5. Крейнделин В.Б., Варукина Л.А. Обработка и прекодирование сигналов в системе с неортогональным доступом и с разделением по мощности // Т-Comm: Телекоммуникации и Транспорт. 2024. Т. 18, №. 6. С. 38-45.
6. Bakulin, M.G., Kreyndelin, V.B., Pankratov, D.Y., Smirnov, A.E. Classification of NOMA Schemes // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. IEEE. 2023. pp. 1-5.
7. Nikopour H., Baligh H. Sparse code multiple access // 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE. 2013. pp. 332-336.
8. Li Q., Liu G., Zhao Y., Liu C., Xu F. Deep learning-based downlink OTFS-SCMA // IEEE Wireless Communications Letters. 2024. Vol. 13, №. 12, pp. 3434-3438.
9. Luo Q., Xiao P., Liu Z., Wan Z., Thomas N., Gao Z., He Z. AFDM-SCMA: A promising waveform for massive connectivity over high mobility channels // IEEE Transactions on wireless communications. 2024. Vol. 23, №. 10, pp. 14421-14436.
10. Taherzadeh M., Nikopour H., Bayesteh A., Baligh H. SCMA codebook design // 2014 IEEE 80th vehicular technology conference (VTC2014-Fall). IEEE. 2014. pp. 1-5.
11. Cai D., Fan P., Lei X., Liu Y., Chen D. Multi-dimensional SCMA codebook design based on constellation rotation and interleaving // 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE. 2016. pp. 1-5.
12. Alam M., Zhang Q. Performance study of SCMA codebook design // 2017 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC). IEEE. 2017. pp. 1-5.
13. Yu L., Lei X., Fan P., Chen D. An optimized design of SCMA codebook based on star-QAM signaling constellations // 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). IEEE. 2015. pp. 1-5.
14. Mheich Z., Wen L., Xiao P., Maaref A. Design of SCMA codebooks based on golden angle modulation // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2018. Vol. 68, №. 2, pp. 1501-1509.
15. Gao M., Ge W., Zhang P., Zhang Y. An efficient codebook design for uplink SCMA // IEEE Access. 2020. №. 8, pp. 211665-211675.
16. Kim M., Kim N.I., Lee W., Cho D.H. Deep learning-aided SCMA // IEEE Communications Letters. 2018. Vol. 22, №. 4, pp. 720-723.
17. da Silva B.F., Silva D., Uchôa-Filho B.F., Le Ruyet D. A multistage method for SCMA codebook design based on MDS codes // IEEE wireless communications letters. 2019. Vol. 8, №. 6, pp. 1524-1527.
18. Pokamestov D.A., Kryukov Y.V., Rogozhnikov E.V., Kanatbekuli I. Adapting SCMA Codebooks to Channel State // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. 2021. pp. 1-4.
19. Покаместов Д.А., Демидов А.Я., Крюков Я.В. Влияние формирующих матриц на помехозащищенность каналов связи с множественным доступом на основе разреженных кодов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2016. Т. 19. №. 3. С. 65-69.
20. Chen J., Yang Z., Fang Y., Li Y., Zhan J. Design of protograph LDPC-coded SCMA systems with power-imbalanced multi-level decoding // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2025.
21. Pokamestov D.A., Demidov A.Y., Kryukov Y.V., Rogozhnikov E.V. Dynamically changing SCMA codebooks // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE. 2017. pp. 1-4.
22. 3GPP TR 38.901 v19.0.0, "Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 19)," Tech. Rep., Jun. 2025.
23. Fossorier M.P.C. Quasicyclic low-density parity-check codes from circulant permutation matrices // IEEE transactions on information theory. 2004. Vol. 50, №. 8, pp. 1788-1793.

A METHOD FOR THE DESIGN OF SCALABLE SCMA CODEBOOKS

Dmitry A. Pokamestov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, dmaltomsk@mail.ru
Yakov V. Kryukov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, kryukov.tusur@gmail.com
Evgeny V. Rogozhnikov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, udzhon@mail.ru
Sergey Yu. Zemlyanukhin, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, sergzemlyanukhin@yandex.ru
Rudolf V. Litvinov, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, litvinov_rv@mail.ru
Aleksandr M. Zabolotskiy, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, amz@tusur.ru

Abstract

This paper proposes a method for constructing scalable regular codebooks for communication systems with non-orthogonal multiple access based on Sparse Code Multiple Access (SCMA). SCMA provides high error resilience, high spectral efficiency, and support for a large number of network connections, and is therefore considered one of the promising multiple access techniques for next-generation communication systems. The performance of SCMA systems is largely determined by the characteristics of the employed codebooks. It is shown that the use of codebooks with a small fixed size limits the scalability of the system and may lead to degraded error performance under frequency-selective fading conditions. A method for SCMA codebook synthesis is proposed, based on scaling sparse base matrices using a quasi-cyclic representation and controlling short cycles in the corresponding factor graphs. To evaluate the efficiency of the proposed approach, a simulation model of an SCMA communication system was developed. Bit error rate performance was evaluated using Monte Carlo simulations for different radio propagation channel models. The simulation results demonstrate that increasing the codebook dimensionality significantly reduces the bit error rate in channels with group frequency-selective fading while maintaining the computational complexity of the detection algorithm.

Keywords: SCMA, 6G, IoT, sparse matrices, codebooks, NOMA, MPA

References

- [1] S. P. Tera, R. Chinthajjala, G. Pau, T. H. Kim, "Toward 6G: An overview of the next generation of intelligent network connectivity," *IEEE Access*. 2024, no. 13, pp. 925-961.
- [2] D. A. Pokamestov et al., "6G communication systems: concept, trends, physical level technologies," *Radio Engineering and Electronics*. 2024, Vol. 69, No. 1, pp. 3-33.
- [3] D. Sarkar, S. S. Yadav, V. Pal, N. Kumar, S. K. Patra, "A comprehensive survey on IRS-assisted NOMA-based 6G wireless network: Design perspectives, challenges and future directions," *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2024, Vol. 21, No. 2, pp. 2539-2562.
- [4] D. Pokamestov, Y. Kryukov, E. Rogozhnikov, G., Shalin, A. Shinkevich, R. Litvinov, "Comparative analysis of multiple access techniques for 6G communication systems," *Telecommunication Systems*. 2025, Vol. 88, No. 3, pp. 104.
- [5] V. B. Kreindelin, L. A. Varukina, "Processing and precoding of signals in a system with non-orthogonal access and power division," *T-Comm*. 2024, Vol. 18, No. 6, pp. 38-45.
- [6] M. G. Bakulin, V. B. Kreindelin, D. Y. Pankratov, A. E. Smirnov, "Classification of NOMA Schemes," *2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. IEEE. 2023, pp. 1-5.
- [7] H. Nikopour, H. Baligh, "Sparse code multiple access," *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE. 2013, pp. 332-336.
- [8] Q. Li, G. Liu, Y. Zhao, C. Liu, F. Xu, "Deep learning-based downlink OTFS-SCMA," *IEEE Wireless Communications Letters*. 2024, Vol. 13, No. 12, pp. 3434-3438.
- [9] Q. Luo, P. Xiao, Z. Liu, Z. Wan, N. Thomos, Z. Gao, Z. He, "AFDM-SCMA: A promising waveform for massive connectivity over high mobility channels," *IEEE transactions on wireless communications*. 2024, Vol. 23, No. 10, pp. 14421-14436.
- [10] M. Taherzadeh, H., Nikopour, A. Bayesteh, H. Baligh, "SCMA codebook design," *2014 IEEE 80th vehicular technology conference (VTC2014-Fall)*. IEEE. 2014, pp. 1-5.
- [11] D. Cai, P. Fan, X. Lei, Y. Liu, D. Chen, "Multi-dimensional SCMA codebook design based on constellation rotation and interleaving," *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE. 2016, pp. 1-5.
- [12] M. Alam, Q. Zhang, "Performance study of SCMA codebook design," *2017 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)*. IEEE. 2017, pp. 1-5.
- [13] L. Yu, X. Lei, P. Fan, D. Chen, "An optimized design of SCMA codebook based on star-QAM signaling constellations," *2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*. IEEE. 2015, pp. 1-5.
- [14] Z. Mheich, L. Wen, P. Xiao, A. Maaref, "Design of SCMA codebooks based on golden angle modulation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2018, Vol. 68, No. 2, pp. 1501-1509.
- [15] M. Gao, W. Ge, P. Zhang, Y. Zhang, "An efficient codebook design for uplink SCMA," *IEEE Access*. 2020, No. 8, pp. 211665-211675.
- [16] M. Kim, N. I. Kim, W. Lee, D. H. Cho, "Deep learning-aided SCMA," *IEEE Communications Letters*. 2018, Vol. 22, No. 4, pp. 720-723.
- [17] B. F. da Silva, D. Silva, D., B. F. Ucha-Filho, D. A. Le Ruyet, "Multistage method for SCMA codebook design based on MDS codes," *IEEE wireless communications letters*. 2019, Vol. 8, No. 6, pp. 1524-1527.
- [18] D. A. Pokamestov, Y. V. Kryukov, E. V. Rogozhnikov, I. Kanatbekuli, "Adapting SCMA Codebooks to Channel State," *2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. IEEE. 2021, pp. 1-4.
- [19] D. A. Pokamestov, A. Ya. Demidov, Ya. V. Kryukov, "Research of formation of matrices for noise immunity of communication channels with multiple access based on sparse codes," *Reports of Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics*. 2016, Vol. 19, No. 3, pp. 65-69.
- [20] J. Chen, Z. Yang, Y. Fang, Y. Li, J. Zhan, "Design of protograph LDPC-coded SCMA systems with power-imbalanced multi-level decoding," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2025.
- [21] D. A. Pokamestov, A. Ya. Demidov, Ya. V. Kryukov, E. V. Rogozhnikov, "Dynamically changing SCMA codebooks," *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. IEEE. 2017, pp. 1-4.
- [22] 3GPP TR 38.901 v19.0.0, "Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 19)," Tech. Rep., Jun. 2025.
- [23] M. P. C. Fossorier, "Quasicyclic low-density parity-check codes from circulant permutation matrices," *IEEE transactions on information theory*. 2004, Vol. 50, No. 8, pp. 1788-1793.

Information about authors:

Dmitry A. Pokamestov, Associate Professor of the Department of Telecommunications and Fundamentals of Radio Engineering, Ph.D. (Tech.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia. ORCID 0000-0002-9405-4573
Yakov V. Kryukov, Associate Professor of the Department of Telecommunications and Fundamentals of Radio Engineering, Ph.D. (Tech.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia. ORCID 0000-0002-4115-9080
Evgeny V. Rogozhnikov, Head of the Department of Telecommunications and Fundamentals of Radio Engineering, Ph.D. (Tech.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia. ORCID 0000-0001-7599-0393
Sergey Yu. Zemlyanukhin, Postgraduate Student of the Department of Telecommunications and Fundamentals of Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia.
Rudolf V. Litvinov, Associate Professor of the Division of Automation and Robotics, School of Engineering for Information Technologies and Robotics, Ph.D. (Phys.-Math.), Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.
Alexander M. Zabolotskiy, Director of the Institute of Radio Electronic Engineering, Ph.D. (Tech.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia.