

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ОРГАНИЗАЦИИ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА NOMA

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-1-4-11

Бакулин Михаил Германович,*Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия, m.g.bakulin@gmail.com***Manuscript received** 07 November 2022;**Accepted** 15 December 2023**Бен Режеб Тауфик Бен Камель,***Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия, benrejebt@yandex.ru***Крейнделин Виталий Борисович,***Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия, vitrkrend@gmail.com***Панкратов Денис Юрьевич,***Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия, dpankr@mail.ru***Смирнов Алексей Эдуардович,***Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия, smirnov.al.ed@gmail.com***Ключевые слова:** системы 6G,
неортогональный множественный доступ,
NOMA, кодовая книга, SCMA, WSMA

Большое количество исследований направлено на системы беспроводной связи шестого поколения 6G (Sixth Generation). Особый интерес представляет будущий стандарт проекта 3GPP, определяющий ключевые технологии, которые будут использованы в новом поколении систем беспроводной связи. Технология неортогонального множественного доступа NOMA (Non-orthogonal multiple access) является одной из фундаментальных для систем 6G. Благодаря технологии NOMA возможно реализовать концепцию "Massive connectivity" для систем 6G, предполагающую обеспечение высокой емкости будущих систем связи и более эффективное, чем в системах 4G и 5G, использование радиочастотного спектра. Существует несколько схем организации множественного доступа NOMA. Наиболее перспективными из них являются SCMA (Sparse Code Multiple Access) – множественный доступ с прореженными последовательностями и WSMA (Welch-bound equality Spread Multiple Access). Целью данной статьи является сравнение эффективности схем неортогонального доступа SCMA и WSMA.

Информация об авторах:*Бакулин Михаил Германович, доцент, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия**Бен Режеб Тауфик Бен Камель, декан, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия**Крейнделин Виталий Борисович, заведующий кафедрой, профессор, д.т.н., МТУСИ, Москва, Россия**Панкратов Денис Юрьевич, доцент, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия**Смирнов Алексей Эдуардович, доцент, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия***Для цитирования:***Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Анализ эффективности различных схем организации неортогонального множественного доступа NOMA // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №1. С. 4-11.***For citation:***Bakulin M.G., Ben Rejebe T.B.K., Kreyndelin V.B., Pankratov D.Y., Smirnov A.E. (2023) Analysis of different NOMA schemes efficiency. T-Comm, vol. 17, no.1, pp. 4-11. (in Russian)*

1. Введение

От поколения к поколению систем мобильной связи менялись частотные диапазоны, методы модуляции, методы помехоустойчивого кодирования, шифрования и многое другое. Однако, эволюция систем мобильной связи от первого до пятого поколения (1G – 5G) не затронула технологии множественного доступа и по сей день мы используем методы ортогонального множественного доступа OMA (Orthogonal Multiple Access).

Основной причиной перехода от систем OMA к системам NOMA [2, 5, 13, 15] является резко возросшие требования к емкости сети. Традиционные технологии множественного доступа не могут обеспечить требования к емкости, диктуемые Интернетом вещей и новыми услугами. Кроме того, дальнейшее использование систем OMA становится очень затруднительным, так как связано с ограничением количества ортогональных ресурсов. Таким образом, возможности традиционных технологий ортогонального множественного доступа исчерпаны и требуется использование новых схем множественного доступа NOMA в качестве новой фундаментальной технологии сетей связи будущего.

Частично попытки внедрения неортогонального доступа NOMA были предприняты в стандарте систем 5G New Radio [2], [6], [15], но это были лишь попытки. Идея использования одного и того же ортогонального ресурса (частотного или временного) для организации связи с несколькими абонентами очень перспективна, и именно поэтому ведущие мировые производители телекоммуникационного оборудования направили все силы своих научно-исследовательских подразделений на работу в этом направлении. Исследовательский ажиотаж и конкурентные исследования разработчиков привели к появлению разных разновидностей неортогонального множественного доступа NOMA.

Первой и одной из наиболее распространенных в литературе схемой стала PD-NOMA [2] (Power domain NOMA), предполагающая разделение абонентов внутри одного ортогонального ресурса по уровню мощности. Схеме PD-NOMA посвящено большое количество публикаций по причине того, что ее использование порождает большое количество вспомогательных задач, таких как: группирование пользователей, управление мощностью и последовательная демодуляция. В качестве второго глобального направления среди схем NOMA необходимо выделить множественный доступ с разделением по структуре сигнала. Именно в качестве направления, так как в данный момент существует несколько схем, организующих множественный доступ с разделением по структуре сигнала, например, с помощью кодовых книг или кодовых последовательностей.

Конкурентная борьба разработчиков привела к появлению множества разновидностей систем NOMA и на текущий момент многие из них рассматриваются в качестве технологических кандидатов в рамках международной стандартизации систем мобильной связи 5G, B5G (Beyond 5G) и 6G. Следует выделить наиболее перспективные и получившие широкое распространение в литературе схемы неортогонального доступа NOMA [2], [7], [8], [13], [15]:

- множественный доступ кодовым разделением с прореженными последовательностями LDS-CDMA (Low Density Spreading Code Division Multiple Access);

- множественный доступ с прореженным кодовым разделением SCMA (Sparse Code Multiple Access);

- множественный доступ с расширением на основе последовательностей Велча WSMA (Welch-bound equality Spread Multiple Access)

- множественный доступ с разделением по перемежению IDMA (Interleave Division Multiple Access);

- множественный доступ с разделением по шаблону PDMA (Pattern Domain Multiple Access);

- многопользовательский общий доступ MUSA (Multi-User Shared Access).

В данной статье рассмотрены схемы SCMA и WSMA как наиболее конкурирующие между собой разновидности технологий NOMA, произведено их сравнение между собой, а также с традиционной схемой ортогонального доступа OMA.

2. Множественный доступ с прореженными последовательностями SCMA

Рассмотрим сначала подробнее схему неортогонального множественного доступа с прореженными кодовыми последовательностями SCMA [14]. Для лучшего понимания принципа работы такой схемы будем оперировать следующими ключевыми обозначениями:

- K – количество абонентов в системе;
- N_{res} – число имеющихся ортогональных ресурсов, выделенных для организации множественного доступа.

Система SCMA работает в режиме перегрузки [9], т.е. выполняется следующее условие, являющееся особенностью всех разновидностей систем NOMA:

$$K > N_{res}. \quad (1)$$

Это означает, что K абонентов используют N_{res} ресурсов, т.е. сигналы K абонентов передаются с помощью ограниченного количества N_{res} физических ресурсов, что подразумевает использование одного и того же ресурса несколькими абонентами одновременно. Таким образом, если, например, два абонента используют один и тот же ресурс, то можно говорить о системе как перегруженной.

Правило распределения ресурсов между абонентами системы определяется кодовой книгой [12], представляющей собой набор матриц, содержащих столбцы (кодовые слова), с заданными точками созвездия для каждого используемого ресурса для каждого пользователя системы.

Третьим важным параметром систем SCMA является кратность модуляции, а если точнее, то количество столбцов (кодовых слов) $N_{codewords}$, которое содержит каждая матрица кодовой книги, предназначенная определенному абоненту. При этом говорить о модуляции применительно для систем SCMA будет некорректно в контексте понимания принципов ее работы. Для традиционных систем OMA кратность модуляции говорит о количестве точек выбранного метода модуляции, например, QPSK (4 точки созвездия) или 64-QAM (64 точки созвездия).

Следует отметить, что для системы SCMA смена конфигурации (параметров K и N_{res}) требует также и смены используемой кодовой книги. В связи с этим, одной из наиболее перспективных задач в развитии систем множественного доступа с прореженными последовательностями является синтез

новых кодовых книг для различных конфигураций системы NOMA.

Рассмотрим подробнее процесс формирования сигнала SCMA на примере известной кодовой книги [1] для конфигурации $4 \times 4 \times 6$ ($N_{res} = 4$, $N_{codewords} = 4$, $K = 6$). Представленная в [1] кодовая книга имеет следующую структуру (рис. 1).

Таблица 1

Кодовая книга SCMA для конфигурации $4 \times 4 \times 6$

№ абонента	Кодовая книга			
1	0	0	0	0
	$-0,1815 - 0,1318i$	$-0,6351 - 0,4615i$	$0,6351 + 0,4615i$	$0,1815 + 0,1318i$
	0	0	0	0
	0,7851	-0,2243	0,2243	-0,7851
2	0,7851	-0,2243	0,2243	-0,7851
	0	0	0	0
	$-0,1815 - 0,1318i$	$-0,6351 - 0,4615i$	$0,6351 + 0,4615i$	$0,1815 + 0,1318i$
	0	0	0	0
3	$-0,6351 + 0,4615i$	$0,1815 - 0,1318i$	$-0,1815 + 0,1318i$	$0,6351 - 0,4615i$
	$0,1392 - 0,1759i$	$0,4873 - 0,6156i$	$-0,4873 + 0,6156i$	$-0,1392 + 0,1759i$
	0	0	0	0
	0	0	0	0
4	0	0	0	0
	0	0	0	0
	0,7851	-0,2243	0,2243	-0,7851
	$-0,0055 - 0,2242i$	$-0,0193 - 0,7848i$	$0,0193 + 0,7848i$	$0,0055 + 0,2242i$
5	$-0,0055 - 0,2242i$	$-0,0193 - 0,7848i$	$0,0193 + 0,7848i$	$0,0055 + 0,2242i$
	0	0	0	0
	0	0	0	0
	$-0,6351 + 0,4615i$	$0,1815 - 0,1318i$	$-0,1815 + 0,1318i$	$0,6351 - 0,4615i$
6	0	0	0	0
	0,7851	-0,2243	0,2243	-0,7851
	$0,1392 - 0,1759i$	$0,4873 - 0,6156i$	$-0,4873 + 0,6156i$	$-0,1392 + 0,1759i$
	0	0	0	0

На рисунке 1 показан пример формирования группового сигнала SCMA [3]. Основной идеей, изложенной на рисунке 1, является иллюстрация использования кодовых слов (столбцов) каждой кодовой матрицы в качестве выбранного значения комплексного информационного символа, соответствующего заданной последовательности бит. На рисунке 1 проиллюстрирована кодовая книга, каждая матрица которой содержит четыре кодовых слова, что соответствует двухбитовой модуляции.

Следует отметить, что представленная в таблице 1 и на рисунке 1 кодовая книга содержит нулевые элементы, именно поэтому такие книги являются прореженными. Прореженный характер кодовых книг позволяет обеспечить низкую вычислительную сложность при демодуляции информационных символов сигналов всех пользователей.

Из рисунка 1 видно, что каждый пользователь выбирает кодовое слово из своей кодовой книги, соответствующее передаваемой битовой информационной последовательности, после чего все выбранные кодовые слова складываются, образуя групповой сигнал SCMA. Значения ненулевых элементов и их расположение внутри кодовых книг выбираются путем оптимизации характеристик помехоустойчивости системы SCMA, что является одной из серьезных исследовательских задач в области систем беспроводной связи будущих поколений.

При использовании кодовой книги каждому из K пользователей выделяется кодовая матрица, состоящая из N_{res} строк и $N_{codewords}$ столбцов. Поэтому каждая кодовая матрица X_k имеет размерность $N_{res} \times N_{codewords}$ и может быть представлена в виде:

$$X_k = \begin{bmatrix} x_{k1} & x_{k2} & \dots & x_{kN_{codewords}} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{N_{res} \times N_{codewords}}. \quad (2)$$

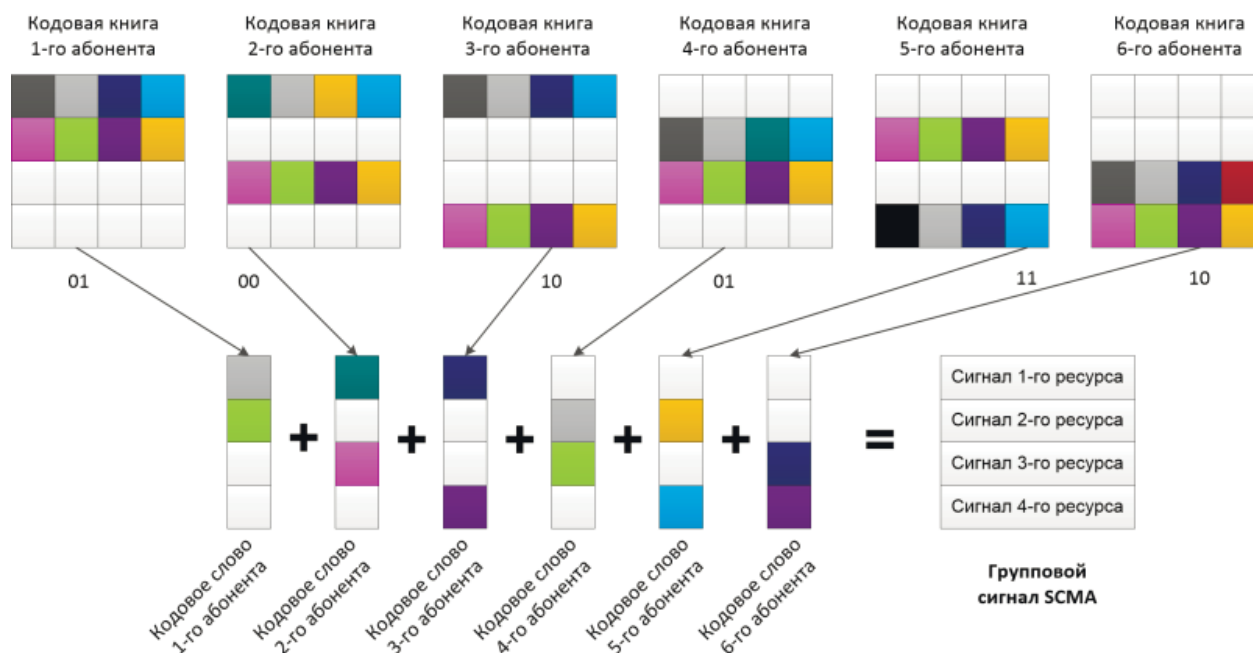


Рис. 1. Процесс формирования сигнала SCMA

Каждый столбец кодовой матрицы $\mathbf{X}_k$ (2) соответствует своему значению комплексного информационного символа. Например, если используется модуляция с четырьмя точками созвездия, то $N_{\text{codewords}} = 4$, а число бит, соответствующих одному символу, будет равно $\log_2(M) = \log_2(4) = 2$.

Тогда кодовая книга каждого пользователя будет иметь $N_{\text{codewords}} = 4$ столбца и

- для передачи комбинации бит {00} используется 1-й столбец $\mathbf{X}_k$;
- для передачи комбинации бит {01} используется 2-й столбец $\mathbf{X}_k$;
- для передачи комбинации бит {10} используется 3-й столбец $\mathbf{X}_k$;
- для передачи комбинации бит {11} используется 4-й столбец $\mathbf{X}_k$.

Рассмотрим подробнее модель сигнала SCMA в «нисходящем» канале (рис. 2)

Рис. 2).

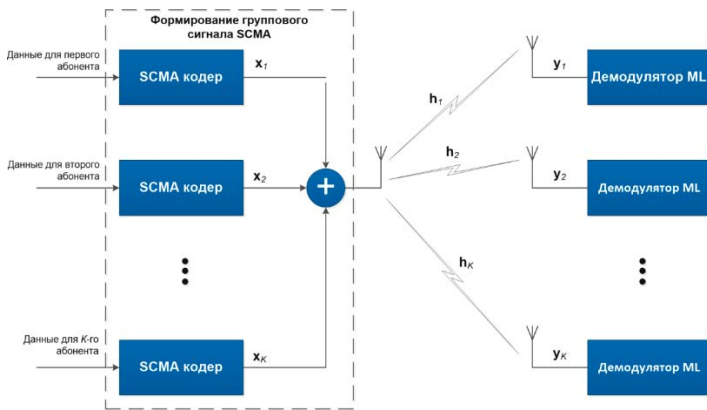


Рис. 2. Структура системы SCMA на линии «вниз» DL

В случае нисходящего канала формирование группового сигнала SCMA, состоящего из сигналов, предназначенных абонентам, производится на передающей стороне базовой станции. Наблюдаемый сигнал на входе приемника i -го пользователя можно представить в следующей форме [3], [5]:

$$\mathbf{y}_i = \text{diag}(\mathbf{h}_i) \cdot \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\eta}_i, \quad (3)$$

где $\mathbf{y}_i = [y_{i1} \ y_{i2} \ \dots \ y_{iN_{\text{res}}}]^T$ – наблюдаемый сигнал на входе приемника i -го пользователя; $\mathbf{h}_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ \dots \ h_{iN_{\text{res}}}]$ – вектор комплексных множителей канала для i -го пользователя; $\mathbf{x}_k = [x_{k1} \ x_{k2} \ \dots \ x_{kN_{\text{res}}}]^T$ – передаваемое кодовое слово пользователя; P_k – мощность сигнала для k -го пользователя; $\boldsymbol{\eta}_i$ – комплексный вектор шума наблюдения, имеющий нулевое среднее и корреляционную матрицу $2\sigma_{\eta}^2 \cdot \mathbf{1}$.

В случае «восходящего» канала каждый пользователь формирует собственный сигнал SCMA и сложение сигналов пользователей производится уже в канале (рис. 3).

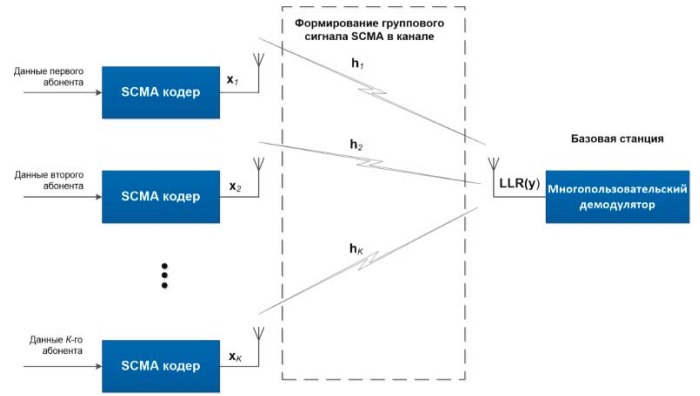


Рис. 3. Структура системы SCMA на линии «вверх» UL

Сигнал, наблюдаемый на входе приёмника базовой станции, можно представить следующим образом:

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} \cdot \text{diag}(\mathbf{h}_k) \cdot \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\eta}, \quad (4)$$

где $\mathbf{y}$ – вектор наблюдаемых сигналов абонентов на входе приёмника базовой станции; $\mathbf{h}_k = [h_{1k} \ h_{2k} \ \dots \ h_{N_{\text{res}}k}]$ – вектор комплексных множителей канала для k -го пользователя; $\boldsymbol{\eta}$ – N_{res} -мерный комплексный вектор шума наблюдения, имеющий нулевое среднее и корреляционную матрицу $2\sigma_{\eta}^2 \cdot \mathbf{1}$. Остальные обозначения соответствуют обозначениям, принятым в (3).

Кодовая книга определяет порядок распределения физических ресурсов между пользователями. Однако, часто в литературе, посвященной технологии NOMA, для случая прореженных кодовых последовательностей SCMA используются фактор-графы [1], [3], [4], позволяющие наглядно проиллюстрировать порядок распределения физических ресурсов между пользователями.

Фактор-граф содержит вершины (узлы) пользователей (изображены в виде кружков) и вершины (узлы) ортогональных ресурсов (изображены в виде квадратов). Пример фактор-графа приведен на рисунке 4.

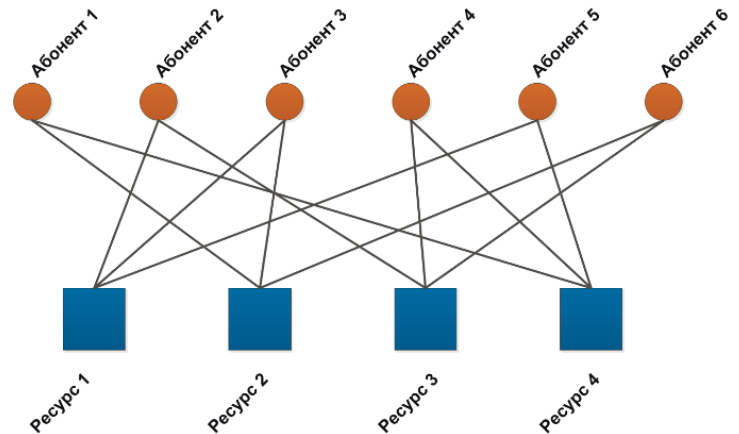


Рис. 4. Пример фактор-графа системы SCMA

Изображенный на рисунке 4 фактор-граф соответствует системе SCMA конфигурации 4x4x6. Читая фактор-граф необходимо следующим образом: если узел пользователя соединен с узлом ресурса, то значит этот ресурс используется пользователем, в противном случае ресурс не используется данным пользователем. В фактор-графе на рисунке 4 каждый пользователь использует только два ресурса из имеющихся четырех ресурсов. В то же время на каждом ортогональном ресурсе размещены сигналы трех пользователей.

Вторым удобным и наглядным способом представления правил распределения ресурсов между пользователями в системе SCMA, встречающимся в литературе, является матрица распределения ресурсов.

Фактор-графу, изображенному на рисунке 5, соответствует следующая матрица распределения ресурсов:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Столбцы матрицы (5) соответствуют пользователям, а строки физические ресурсы. При этом, если k -й пользователь использует j -й ресурс, то элемент матрицы принимает значение 1, в противном случае значение 0.

Описанные способы распределения ресурсов между пользователями системы SCMA являются **эквивалентными**.

3. Множественный доступ с расширением на основе последовательностей Велча WSMA

Второй рассматриваемой разновидностью системы NOMA является схема множественного доступа с расширением на основе последовательностей Велча WSMA (Welch-bound equality Spread Multiple Access).

Синтез таких последовательностей Велча осуществляется путем сравнения общей корреляции TSC (Total Squared Correlation) с границей Велча [10]. При генерировании кодовых последовательностей WSMA одновременно оптимизируются такие показатели, как емкость системы и уровень корреляции между последовательностями. Однако, использование последовательностей Велча может привести к резкому увеличению сложности приёмника. Во избежание повышенной сложности реализации приёмника необходимо обеспечить ортогональность между определенным подмножеством векторов в данном наборе и соответствие границе Велча. Сгенерированный набор последовательностей, удовлетворяющих границе Велча формирует результирующую кодовую книгу WSMA.

Количество последовательностей соответствует количеству абонентов K в системе WSMA. Таким образом, имеется K векторов $\mathbf{s}_k$, $k = 1, \dots, K$ длиной N_{res} , обозначающих кодовые последовательности пользователей, для которых $\|\mathbf{s}_k\| = \sum_{l=1}^L s_{k,l}^2 = 1$. При этом матрица последовательностей имеет структуру $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_K]$ и размер $N_{res} \times K$.

Рассмотрим общее векторное представление многопользовательской системы WSMA для линии «вниз» DL в следующем виде:

$$\mathbf{y}_i = \text{diag}(\mathbf{h}_i) \cdot \sum_{k=1}^K \mathbf{s}_k x_k + \boldsymbol{\eta}_i \quad (6)$$

Аналогично на линии «вверх» UL имеем следующую модель

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \text{diag}(\mathbf{h}_k) \mathbf{s}_k x_k + \boldsymbol{\eta} \quad (7)$$

В схеме WSMA для каждого абонента задается конкретный вектор из набора заранее спроектированных векторов (последовательностей) размерности N_{res} . Эти векторы обладают определенными корреляционными свойствами.

Коэффициент загрузки системы WSMA определяется соотношением K/N_{res} , причем для поддержки большого числа абонентов необходимо, чтобы $(K/N_{res} > 1)$.

Граница Велча, используемая для формирования набора последовательностей может быть выражена следующим образом:

$$B_{Welch} = K^2 / N_{res} \quad (8)$$

Равенство (8) представляет собой границу взаимной корреляции любого набора из K последовательностей длины N_{res} (суммы квадратов взаимной корреляции последовательностей).

Коэффициент общей корреляции TSC, который ограничивается равенством (8), задается с помощью соотношения [10]:

$$TSC = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K |\mathbf{s}_i^T \mathbf{s}_j|^2 \geq K^2 / N_{res}, \quad (9)$$

где $\mathbf{s}_i$ и $\mathbf{s}_j$ – последовательности для абонентов системы, образующие матрицу последовательностей $\mathbf{S}^{N_{res} \times K} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_K]$. В случае выполнения (9) множество последовательностей $\mathbf{S}$ соответствует границе Велча, при этом векторы $\mathbf{s}_k$, $k = 1, \dots, K$ соответствуют границе Велча в совокупности, но не по отдельности.

В системах WSMA обработка производится на уровне символов, т.е. преобразования с помощью последовательностей WBA производятся над символами на выходе модулятора. Результатом умножения символов на выходе модулятора на последовательности WBA является матричная структура. Выбор последовательностей производится исходя из критерия максимизации пропускной способности.

На рисунке 5 приведена структура системы WSMA на линии «вниз» DL.

В таблице 2 приведен пример набора последовательностей, указанный в документе 3GPP [11], и предназначенный для восьми активных абонентов ($K = 8$, $N_{res} = 4$).

Конфигурация системы WSMA $K = 8$, $N_{res} = 4$ подразумевает, что загрузка системы составляет 200%. Каждый столбец кодовой книги – это комплексная WBE-последовательность с единичной нормой, которая назначается соответствующему абоненту.

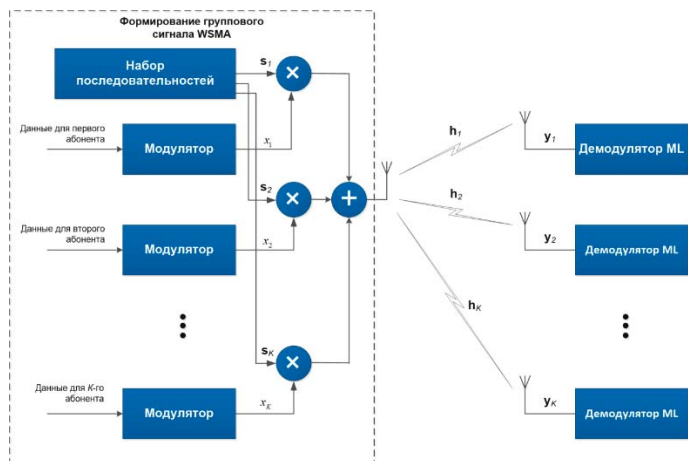


Рис. 5. Структура системы WSMA на линии «вниз» DL

Таблица 2

Пример кодовой книги WSMA, предложенной в стандарте 3GPP, для конфигурации $K = 8, N_{res} = 4$ [11]

№ Ре- сурс	1	2	3	4
1	$[-0,6617 + 0,1004i]$	$[-0,0912 + 0,4191i]$	$[0,4151 + 0,3329i]$	$[0,2736 - 0,4366i]$
2	$[0,0953 + 0,4784i]$	$[-0,4246 - 0,0859i]$	$[0,2554 - 0,3140i]$	$[0,5452 + 0,2068i]$
3	$[-0,4233 - 0,1399i]$	$[-0,4782 + 0,3752i]$	$[-0,3808 + 0,1569i]$	$[-0,4690 - 0,2225i]$
4	$[-0,1265 + 0,3153i]$	$[-0,4936 + 0,1233i]$	$[0,6130 + 0,0873i]$	$[-0,3399 + 0,0974i]$
№ От- счеты	5	6	7	8
1	$[-0,4727 - 0,1234i]$	$[-0,3413 + 0,1257i]$	$[0,4216 + 0,1187i]$	$[0,4603 + 0,2142i]$
2	$[0,0592 - 0,6432i]$	$[0,3671 - 0,1430i]$	$[-0,0241 - 0,5620i]$	$[0,0048 - 0,4244i]$
3	$[0,3493 - 0,1988i]$	$[0,6514 - 0,0660i]$	$[-0,4507 - 0,0958i]$	$[0,4047 + 0,1601i]$
4	$[-0,0975 + 0,4161i]$	$[0,2174 + 0,4864i]$	$[-0,5167 + 0,1116i]$	$[-0,4908 + 0,3629i]$

4. Результаты компьютерного моделирования

Сравнение эффективности схем SCMA и WSMA производилось с помощью компьютерного моделирования. Результаты компьютерного моделирования позволяют сравнить помехоустойчивость систем SCMA и WSMA, работающих в режиме перегрузки (150%, 4 физических ресурса, 6 абонентов), и обычной системы OMA работающей в обычном режиме без перегрузки (4 физических ресурса, 4 абонента). Данные конфигурации выбраны специально для отображения преимуществ в спектральной эффективности систем SCMA и WSMA по сравнению с традиционной системой OMA. Результаты получены при использовании 4 физических ресурсов, но при этом системы SCMA и WSMA позволяют увеличить емкость системы в 1,5 раза при приемлемых потерях в помехоустойчивости. Результаты моделирования получены для канала связи с дружными замираниями с использованием турбокодирования со скоростью $\frac{1}{2}$.

Для системы OMA при моделировании использовалась модуляция QPSK.

Результаты моделирования получены с переменным количеством экспериментов для разных точек ОСШ для повышения адекватности моделирования. Результаты моделирования для точек от 2 до 12 дБ получены с помощью усреднения наблюдений 5000 экспериментов, для точек ОСШ от 14 до 18 дБ с помощью 10000 экспериментов, для точек ОСШ от 20 до 28 использовались результаты усреднения 20000 экспериментов. Кратко параметры моделирования приведены в таблице 3

Таблица 3

Параметры компьютерного моделирования

Множественный доступ	1. Не ортогональный доступ SCMA (4 физических канала); 2. Не ортогональный доступ WSMA (4 физических канала); 3. Ортогональный доступ OMA (4 физических каналов), Модуляция QPSK.
Количество абонентов	OMA – 4 абонента; SCMA – 6 абонентов; WSMA – 6 абонентов.
Канал	Релеевский канал с замираниями (дружные по ресурсам, времени и по абонентам) на линии DL; Релеевский канал с замираниями (дружные по ресурсам и по времени, независимые по абонентам) на линии UL.
Длина кадра	568 бит
Помехоустойчивое кодирование	Турбокодер со скоростью 1/2
Демодуляция	Мягкая оценка. Логарифм отношений правдоподобия.
Количество экспериментов	5000 – 20000

На рисунке 6 приведены зависимости величин FER (вероятность появления ошибочного кадра) от отношения сигнал/шум в канале для систем SCMA, WSMA и традиционной схемы ортогонального доступа OMA для случая применения помехоустойчивого кодирования в «нисходящем» канале.

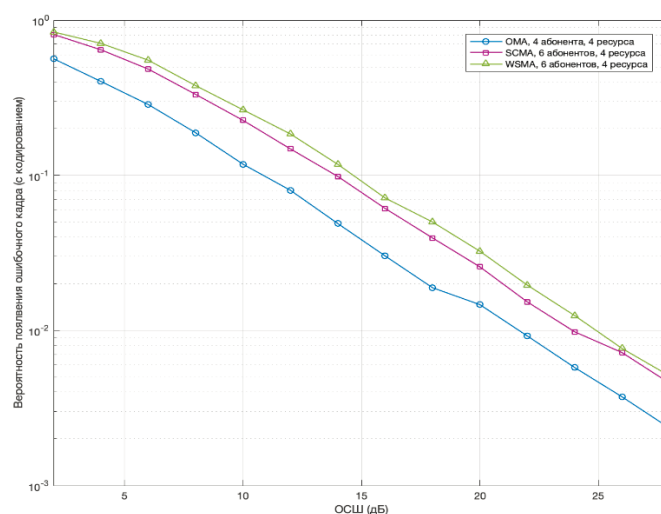


Рис. 6. Сравнение помехоустойчивости схем SCMA, WSMA и OMA в нисходящем канале с помехоустойчивым кодированием

Энергетический выигрыш традиционной схемы OMA составляет 2,1 дБ и 3,2 дБ по уровню FER 10^{-2} для схем SCMA и WSMA, соответственно. Схемы неортогонального доступа проигрывают по помехоустойчивости, но важно помнить, что этот энергетический проигрыш является платой за увеличенную емкость системы. Для рассмотренных конфигураций схем неортогонального доступа перегрузка составляет 150% и отмеченный энергетический проигрыш является компромиссом увеличенной в 1,5 раза емкости сети.

На рисунке 7 приведены зависимости величин FER для случая применения помехоустойчивого кодирования в «восходящем» канале.

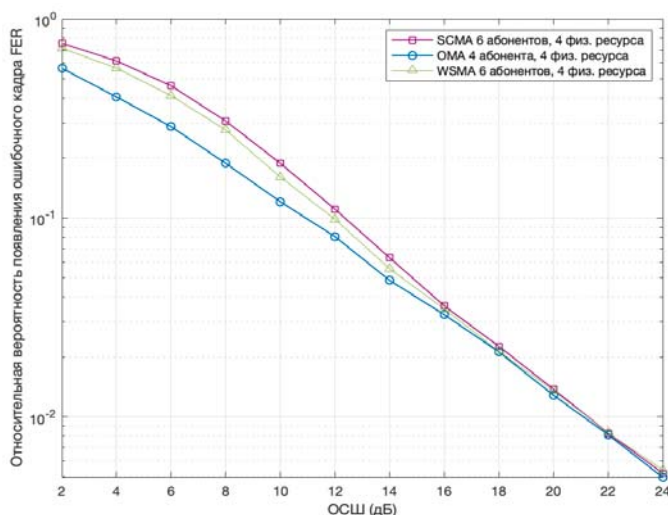


Рис. 7. Сравнение помехоустойчивости схем SCMA, WSMA и OMA в восходящем канале с помехоустойчивым кодированием

В восходящем канале результаты помехоустойчивости выглядят иначе. Энергетический выигрыш традиционной схемы OMA составляет всего лишь 0.2 дБ по сравнению со схемами SCMA и WSMA по уровню FER 10^{-2} . Между собой схемы SCMA и WSMA не имеют значительного лидерства в помехоустойчивости в восходящем канале, наблюдается лишь незначительный выигрыш схемы WSMA перед схемой SCMA в 0,02 дБ по уровню FER 10^{-2} .

Методы неортогонального доступа позволяют ощутимо увеличить емкость сети, при этом в нисходящем канале схема SCMA обладает лучшей помехоустойчивостью. Кроме того, необходимо отметить, что в рамках данной работы при моделировании использовался одинаковый алгоритм демодуляции. Однако, схема SCMA относится к разряду прореженных разновидностей NOMA, что позволяет использовать более простые итерационные алгоритмы типа MPA (Message Passing Algorithm) [1, 13].

Заключение

Главный принцип неортогонального множественного доступа – использование одного частотно-временного ресурса несколькими пользователями. Конечно, эта идея известна разработчикам и исследователям, но она до сих пор не использовалась в качестве ключевой фундаментальной технологии систем мобильной связи. Сейчас использование этой идеи уже диктуется эволюцией самих систем связи, а точнее их резко возросшей емкостью.

Технологии множественного доступа, основанные на этой идее, в том числе рассмотренные схемы SCMA и WSMA, были предложены относительно недавно. Здесь в этой статье мы попытались лишь изложить основные принципы этих схем множественного доступа, а также проиллюстрировать их преимущества перед традиционными системами OMA. Огромное количество задач еще стоит перед исследователями и разработчиками: необходимы новые алгоритмы приёма, оптимизация кодовых книг, снижение вычислительной сложности. Кроме того, одним из самых интересных направлений исследований является возможность применения технологий множественного доступа с уже хорошо зарекомендовавшими себя другими технологиями, например, методы полного дуплекса FD или технология MIMO.

Литература

1. Altera Innovate Asia website, Presentation “1st 5G Algorithm Innovation Competition-ENV1.0-SCMA”, <http://www.innovateasia.com/5g/en/gp2.html>.
2. Qu Luo, Pengyu Gao, Zilong Liu, Lixia Xiao, Zeina Mheich, Pei Xiao, Amine Maaref. An Error Rate Comparison of Power Domain Non-Orthogonal Multiple Access and Sparse Code Multiple Access // IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021, vol. 2, pp. 500-511.
3. Manish Mandloi, Devendra Gurjar, Prabina Pattanayak, Ha Nguyen. 5G and Beyond Wireless Systems. PHY Layer Perspective. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2021, 425 p.
4. Климентьев В.П. Методы приема сигналов в системах множественного доступа с разреженным кодированием: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2018. 167 с.
5. Mojtaba Vaezi, Zhiguo Ding, H. Vincent Poor. Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond. Switzerland, Springer, 2019. 670 p.
6. 3GPP TR 38.812 V16.0.0 (2018-12), Technical Report, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for NR (Release 16), 2018.
7. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В. Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Схемы NOMA с обработкой на уровне символов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 5. С. 4-14.
8. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Миронов Ю.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Многостанционный доступ в системах связи пятого и последующих поколений // Электросвязь. 2022. – № 5. С. 16-21.
9. Nikopour H., Baligh H. Sparse code multiple access // IEEE Proc. of Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. (PIMRC), Sep. 2013, pp. 332-336.
10. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Технология NOMA с кодовым разделением в 3GPP: 5G или 6G? // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №1. С. 4-14.
11. 3GPP, -166056, Final Minutes report RAN185-v100, http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_86/Docs/
12. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Смирнов А.Э. Способы минимизации объема передаваемой информации в обратном канале многоантенных систем MIMO // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 3. С. 17-24.
13. Y. Liu, Z. Qin, M. Elkhassan, Z. Ding, A. Nallanathan and L. Hanzo. Non-orthogonal Multiple Access for 5G and Beyond // Proc. IEEE, vol. 105. no. 12. Dec. 2017, pp. 2347-2381.
14. Lisu Yu, Zilong Liu, Miaowen Wen, Donghong Cai, Shuping Dang, Yuhao Wang, and Pei Xiao. Sparse Code Multiple Access for 6G Wireless Communication Networks: Recent Advances and Future Directions. Submitted on 3 Apr 2021. [HTTPS://ARXIV.ORG/ABS/2104.01402v1](https://arxiv.org/abs/2104.01402v1)
15. Douglas H. Morais. Key 5G Physical Layer Technologies. Enabling Mobile and Fixed Wireless Access. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 297 p.

ANALYSIS OF DIFFERENT NOMA SCHEMES EFFICIENCY

Mikhail G. Bakulin, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, m.g.bakulin@gmail.com

Ben Rejeb Taoufik, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, benrejebt@yandex.ru

Vitaly B. Kreyndelin, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, vitrkrend@gmail.com

Denis Y. Pankratov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, dpankr@mail.ru

Alexey E. Smirnov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, smirnov.al.ed@gmail.com

Abstract

Sixth generation 6G (Sixth Generation) wireless communication systems are the most popular direction of articles and literature. The main interest is the future standard of the 3GPP project, which defines the key technologies that will be used in the new generation of wireless communication systems. NOMA (Non-orthogonal multiple access) technology is one of the fundamental technologies for 6G systems. Using NOMA technology, it is possible to implement the concept of "Massive connectivity" for 6G systems, which assumes the provision of high capacity of future communication systems and more efficient use of the radio frequency spectrum. There are several schemes for organizing multiple NOMA access. The most promising of them are SCMA (Sparse Code Multiple Access) -and WSMA (Welch-bound equality Spread Multiple Access). The main goal of this article is to compare the performance of non-orthogonal SCMA and WSMA schemes.

Keywords: 6G, Non-orthogonal multiple access, NOMA, codebook, SCMA, WSMA.

References

1. Altera Innovate Asia website, Presentation "1st 5G Algorithm Innovation Competition-ENV1.0-SCMA", <http://www.innovateasia.com/5g/en/gp2.html>.
2. Qu Luo, Pengyu Gao, Zilong Liu, Lixia Xiao, Zeina Mheich, Pei Xiao, Amine Maaref. "An Error Rate Comparison of Power Domain Non-Orthogonal Multiple Access and Sparse Code Multiple Access," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, vol. 2, pp. 500-511.
3. Manish Mandloi, Devendra Gurjar, Prabina Pattanayak, Ha Nguyen. 5G and Beyond Wireless Systems. PHY Layer Perspective. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2021, 425 p.
4. V.P. Klimentev. Metody priema signalov v sistemah mnozhestvennogo dostupa s razrezhennim kodirovaniem: diss. kand. teh. nauk. St. Petersburg, 2018. 167 p. (in Russian)
5. Mojtaba Vaezi, Zhiguo Ding, H. Vincent Poor. Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond. Switzerland, Springer, 2019, 670 p.
6. 3GPP TR 38.812 V16.0.0 (2018-12), Technical Report, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for NR (Release 16), 2018.
7. M.G. Bakulin, T.B.K. Ben Rezheb, V. B. Kreyndelin, D.Yu. Pankratov, A.E. Smirnov (2022), "Skhemy NOMA s obrabotkoj na urovne simvolov," *T-Comm*. Vol. 16. No. 5, pp. 4-14. (in Russian)
8. M.G. Bakulin, T.B.K. Ben Rezheb, V.B. Krejndelin, Yu.B. Mironov, D.Yu. Pankratov, A.E. Smirnov (2022), "Mnogostacionnyj dostup v sistemah svyazi pyatogo i posleduyushchih pokolenij," *Elektrosvyaz*. No. 5, pp. 16-21. (in Russian)
9. H. Nikopour and H. Baligh, "Sparse code multiple access," *IEEE Proc. of Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, Sep. 2013, pp. 332-336.
10. M.G. Bakulin, T.B.K. Ben Rezheb, V.B. Krejndelin, D.Yu. Pankratov, A.E. Smirnov, "Tekhnologiya NOMA s kodovym razdeleniem v 3GPP: 5G ili 6G?" *T-Comm*. Vol 16. No.1, pp. 4-14. (in Russian)
11. 3GPP, -166056, Final Minutes report RAN185-v100, http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_86/Docs.
12. M.G. Bakulin, T.B.K. Ben Rezheb, V.B. Krejndelin, A.E. Smirnov (2021), "Sposoby minimizatsii ob'yoma peredavaemoj informatsii v obratnom kanale mnogoantennyh sistem MIMO," *T-Comm*. Vol. 15. No. 3, pp. 17-24.
13. Y. Liu, Z. Qin, M. El-kashlan, Z. Ding, A. Nallanathan and L. Hanzo (2017), "Non-orthogonal Multiple Access for 5G and Beyond". *Proc. IEEE*, vol. 105. no. 12. Dec. 2017, pp. 2347-2381.
14. Lisu Yu, Zilong Liu, Miaowen Wen, Donghong Cai, Shuping Dang, Yuhao Wang, and Pei Xiao. Sparse Code Multiple Access for 6G Wireless Communication Networks: Recent Advances and Future Directions. Submitted on 3 Apr 2021. <https://arxiv.org/abs/2104.01402v1>
15. Douglas H. Morais. Key 5G Physical Layer Technologies. Enabling Mobile and Fixed Wireless Access. Springer Nature Switzerland AG, 2020, 297 p.