

КОМБИНИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ SCMA И MIMO С АВТОВЫБОРОМ АНТЕНН

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-5-55-61

Manuscript received 28 March 2025;
Accepted 18 April 2025

Бен Режеб Тауфик Бен Камель,
Московский технический университет связи и
информатики, Москва, Россия,
t.benreheb@mtuci.ru

Ключевые слова: комбинирование,
неортогональный доступ, SCMA, NOMA,
многоантенные системы, MIMO, SCMA-MIMO,
автовыбор антенн

Неортогональный множественный доступ – ключевая технология для внедрения в стандарты сотовой связи будущих поколений. Внедрение технологии NOMA требует согласования с уже используемыми и хорошо зарекомендовавшими себя технологиями, такими как технология многоантенных систем MIMO. Совместное использование технологий MIMO и NOMA позволяет обеспечить эффективное использование радиочастотного спектра за счет пространственной обработки сигналов и высокую емкость сети за счет уплотнения сигналов абонентов и функционирования в режиме перегрузки. Существует несколько разновидностей технологии NOMA, каждая из которых может быть объединена с технологией MIMO с учетом особенностей. Неортогональный множественный доступ на основе прореженных последовательностей SCMA является одной из наиболее перспективных разновидностей технологии NOMA. Целью данной статьи является анализ возможности комбинирования технологии SCMA с технологией MIMO в режиме автовыбора антенн (antenna selection) для организации пространственных ортогональных ресурсов как одного из возможных вариантов комбинирования этих технологий для систем мобильной связи следующих поколений. Результаты компьютерного моделирования подтверждают эффективность совместного использования именно разновидности NOMA с разреженными последовательностями SCMA и технологии MIMO в режиме автовыбора антенн.

Информация об авторе:

Бен Режеб Тауфик Бен Камель, доцент, к.т.н., Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия

Для цитирования:

Бен Режеб Тауфик Бен Камель. Комбинирование технологий SCMA и MIMO с автовыбором антенн // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №5. С. 55-61.

For citation:

Ben Rejeb T.B.K., "Combination of SCMA and MIMO with antenna selection," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.5, pp. 55-61. (in Russian)

Введение

В развитии стандартов сотовой подвижной связи прослеживается четкая тенденция – каждый новый стандарт беспроводной связи отличался от предыдущего новыми прорывными возможностями для пользователей, что всегда обеспечивалось главной фундаментальной технологией, лежащей в основе стандарта. Например, прорывной с свое время оказалась технология кодового разделения каналов в системах CDMA (Code Division Multiple Access) для стандартов сотовой связи третьего поколения. Далее с появлением технологии ортогонального частотного мультиплексирования OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) резко возросло качество предоставляемых услуг связи в системах четвертого поколения. Разумеется, всегда новые фундаментальные технологии сопровождались появлением новых помехоустойчивых кодов, методов модуляции и т.д., но четко прослеживается, что в каждом новом стандарте была основная движущая и новая на то время фундаментальная технология.

Фундаментальной технологией для будущих стандартов мобильной связи и систем радиодоступа выступает технология неортогонального доступа NOMA. Технологию NOMA можно разделить на две категории: NOMA с кодовым разделением (Code Domain NOMA) и NOMA с разделением по мощности (Power Domain NOMA).

Схема SCMA (Sparse Code Multiple Access), является одной из разновидностей технологии NOMA, где для уплотнения сигналов абонентов используются прореженные кодовые последовательности. Система SCMA, как и другие разновидности технологии NOMA функционирует в перегруженном режиме, когда количество пользователей системы превышает число доступных ортогональных ресурсов $K > N_{res}$. В ситуации, когда количество ресурсов ограничено, необходимо правило распределения доступных N_{res} ресурсов между K абонентами системы. Такое правило определяется кодовой книгой, состоящей из матриц, содержащих кодовые слова (столбцы матрицы), определяющих право абонента использовать тот или иной ресурс системы.

В системах SCMA не используются традиционные методы модуляции. В качестве модулятора выступает непосредственно кодер SCMA, кратность модуляции которого определяется кодовой книгой.

Постановка задачи

Главной задачей этой работы является исследование возможности комбинирования технологии NOMA, а именно разновидности SCMA, с технологией MIMO в режиме автовыбора антенн. Такой сценарий совместного использования обладает рядом преимуществ и может является одним из наиболее перспективных вариантов комбинирования для включения в будущие стандарты мобильной связи. Система SCMA позволяет эффективно уплотнять сигналы абонентов для дальнейшей передачи по одному частотному ресурсу, а система MIMO в режиме автовыбора антенн позволяет подобрать наилучший ресурс для передачи сигналов абонентов. Комбинирование этих технологий в таких режимах имеет значительный потенциал, который может быть выражен в спектральной эффективности и энергетическом выигрыше.

В традиционных системах SCMA в качестве ортогональных ресурсов используются частотные ресурсы, т.е. N_{res} ортогональных несущих частот (диапазонов частот). Соответственно, масштабирование системы SCMA, например, увеличение количества абонентов или увеличения количества ресурсов, потребует увеличения количества частотных ресурсов, являющихся крайне ограниченными. Использование нескольких антенн на передающей и нескольких антенн на приемной стороне (технология MIMO) позволяет организовать N_{res} ортогональных пространственных каналов, использующих одинаковый диапазон частот, при этом N_{res} не ограничено природными частотными ресурсами, а зависит от количества передающих N_{tx} и приёмных N_{rx} антенн.

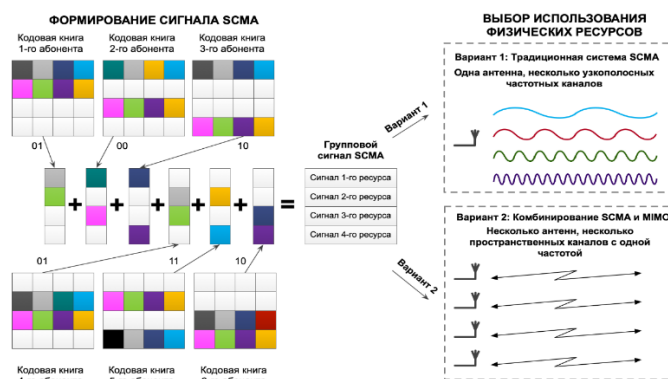


Рис. 1. Возможные варианты организации физических ресурсов для системы SCMA

Идея использования пространственных ортогональных каналов вместо частотных ортогональных каналов изложена в [1]. При этом изменение подхода к организации физических каналов для системы SCMA не влияет на свойства системы и индивидуальные преимущества технологии SCMA сохраняются [2]. Использование технологии MIMO для организации физических ресурсов системы SCMA имеет потенциал для улучшения характеристик системы. В случае классической системы SCMA с частотными физическими ресурсами передача символов SCMA производится по имеющимся ортогональным несущим частотам, характеристики которых (передаточные коэффициенты) определяются текущим состоянием канала. Если же использовать пространственные физические ресурсы с помощью технологии MIMO, то можно заранее оснастить антенную решетку избыточным количеством антенных элементов и с помощью технологии автовыбора антенн осуществлять поиск наилучших пространственных каналов, т.е. добавить возможность отбора необходимого количества N_{res} пространственных физических ресурсов, обладающих наилучшими характеристиками. Необходимо отметить, что в случае классической системы SCMA с частотными ресурсами такой выбор не предоставляется, кроме того количество ресурсов строго ограничено [2].

Такая концепция возможна при использовании технологии автовыбора антенн, более известной в литературе и источниках как «Antenna selection». Рассмотрим ее подробнее, а именно критерии, на основе которых осуществляется автовыбор антенн.

Автовыбор антенн в системах MIMO

Технологически для производителей оборудования базовых станций нет сложностей оснастить базовую станцию решеткой антенных элементов размерностью 32, 64, 128 и более [3]. Сложность заключается в выборе $N_{tx,as}$ активных антенн, а точнее в переборе всех возможных комбинаций из $N_{tx,as}$ антенн базовой станции и приёмных антенн мобильной станции на основании информации о текущем состоянии канала связи [4, 16-18]. На основе оценки текущего состояния канала выбирается матрица активных антенн \mathbf{H}_{AS} , получаемая путем произведения текущей полной матрицы всех пространственных каналов \mathbf{H}_{full} и матрицы выбора антенн \mathbf{S}_{tx} или \mathbf{S}_{rx} , в зависимости от того где производится выбор активных антенн: из антенной решетки передатчика [5, 6] или антенной решетки приёмника [5, 6]. Исходная полная матрица канала \mathbf{H}_{full} размерности $N_{rx} \times N_{tx}$ путем умножения на матрицы \mathbf{S}_{tx} и \mathbf{S}_{rx} принимает размерность $N_{rx,AS} \times N_{tx,AS}$. Таким образом после оценки всех пространственных каналов системы с помощью пилотных сигналов и получения полной матрицы передаточных коэффициентов применение \mathbf{S}_{tx} и \mathbf{S}_{rx} осуществляет вычеркивания из полной матрицы \mathbf{H}_{full} лишних строк и столбцов, результатом чего является получение матрицы канала для выбранных антенн \mathbf{H}_{AS} [4, 7].

Задача выбора лучших антенн для передачи на основе информации о текущем состоянии канала зачастую имеет высокую вычислительную сложность, так как обычно требует перебора всех возможных комбинаций и должна выполняться постоянно. Большое количество антенн на стороне базовой станции влечет за собой большое количество комбинаций [8, 9], которые должны быть перебраны за ограниченное время передачи символа SCMA [10]. Для простоты дальнейшего изложения остановимся на выборе антенн только на передающей стороне, т.е. применении матрицы \mathbf{S}_{tx} , выполняющей удаление всех лишних столбцов матрицы \mathbf{H}_{full} .

Рассмотрим наиболее распространенные алгоритма выбора антенн. В литературе и источниках тема критериев автовыбора антенн хорошо освещена [4, 11]. Необходимо отметить, что большинство алгоритмов автовыбора антенн требуют полного перебора всех комбинаций передающих и приёмных антенн, однако существуют алгоритмы, не требующие полного перебора, например, алгоритм автовыбора антенн по критерию наиболее мощных пространственных каналов [4, 7, 11]:

Исходные данные: \mathbf{H} – полная матрица информации о состоянии канала, $\frac{E_s}{2\sigma_\eta^2}$ – отношение сигнал/шум в канале связи, n – порядковый номер антенны (номер столбца матрицы \mathbf{H})

Шаг 1. Вычисление метрики по столбцам матрицы
Начало цикла, для $n = 1 \dots N_{tx}$:

$$b_n = \mathbf{H}_n \left(\mathbf{1} + \frac{E_s}{2\sigma_\eta^2} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right)^{-1} \mathbf{H}_n^H, \tag{1}$$

Конец цикла

Шаг 2. Выбор первых $N_{tx,as}$ максимальных значений b_n .

Шаг 3. Составление матрицы \mathbf{H}_{AS} из столбцов, соответствующих значениям b_n , выбранным на шаге 2.

Критерий (1) не требует перебора всех возможных матриц канала и, соответственно, не требует сложных вычислений, что является его главным преимуществом, недостатком является его невысокая эффективность.

Остальные наиболее популярные в источниках алгоритмы автовыбора антенн требуют перебора всех возможных матриц канала, например, критерий максимума пропускной способности [4].

В таком случае производится такой выбор подмножества из $N_{tx,AS}$ антенн из N_{tx} имеющихся передающих антенн и подмножества из $N_{rx,AS}$ антенн из N_{rx} имеющихся приемных антенн, чтобы обеспечить максимум пропускной способности C_{max} в канале:

$$C_{max} = \max_{\tilde{\mathbf{H}}} \log_2 \det \left(\mathbf{1} + \frac{SNR}{N_{tx,as}} \tilde{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{H}}^H \right), \tag{2}$$

где $\tilde{\mathbf{H}}$ – текущая рассматривая матрица-кандидат из всех возможных комбинаций размерности $N_{rx} \times N_{tx,AS}$.

Автовыбор антенн на основе критерия (2) обладает высокой эффективностью, но требует значительных вычислений при большом количестве антенн БС. Наиболее широко используемым критерием для автовыбора антенн в источниках, посвященных многоантенным системам, является критерий максимума отношения сигнал/шум (критерий максимума нормы Фробениуса) Этот критерий сводится к критерию максимума нормы Фробениуса $\|\tilde{\mathbf{H}}\|_F^2$ выбранной матрицы канала $\tilde{\mathbf{H}}$:

$$\max_{\tilde{\mathbf{H}}} \|\tilde{\mathbf{H}}\|_F^2 = \max_{\tilde{\mathbf{H}}} \sum_{m=1}^{N_{rx}} \sum_{n=1}^{N_{tx,as}} |\tilde{h}_{mn}|^2. \tag{3}$$

Еще одним критерием для автовыбора антенн, часто встречающимся в источниках, является критерий минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции:

$$\min_{\tilde{\mathbf{H}}} tr \left(\left(\frac{SNR}{N_{tx,as}} \tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{H}} + \mathbf{1} \right)^{-1} \right). \tag{4}$$

Модель системы SCMA с автовыбором антенн

Наиболее простой, но интересный в плане комбинирования вариант системы SCMA-MIMO приведен на рисунке 2. Здесь в качестве ортогональных ресурсов для системы SCMA выступают параллельные пространственные каналы между передающими и приёмными антеннами системы SU-MIMO [1, 2, 7].

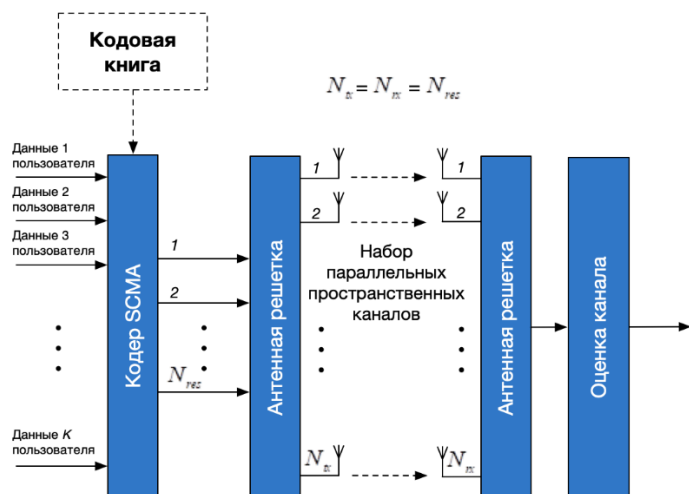


Рис. 2. Иллюстрация систем SCMA использованием параллельных пространственных в качестве ортогональных ресурсов

Представленный на рисунке 2 вариант комбинированной системы может быть дополнен блоком автовыбора антенн для выбора наилучших пространственных каналов с помощью канала обратной связи. Пример такой системы приведен на рисунке 3.

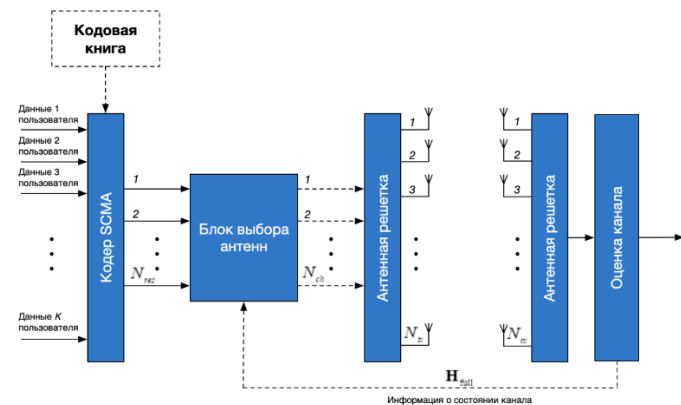


Рис. 3. Иллюстрация возможного варианта системы SCMA с автовыбором антенн

Для удобства описания введем следующие обозначения: K – количество пользователей; N_{tx} – количество передающих антенн БС; $N_{tx,as}$ – количество выбранных антенн на стороне БС; N_{ch} – количество активных пространственных каналов; N_{res} – классическое для систем SCMA количество ортогональных ресурсов $N_{res} = N_{ch}$ (для рассматриваемого случая); \mathbf{H}_{full} – общая матрица коэффициентов передачи между всеми антеннами; \mathbf{S}_{tx} – матрица выбора антенн на передающей стороне; $\tilde{\mathbf{H}}$ – матрица канала с учетом выбора $N_{tx,as}$ передающих антенн из общего количества передающих антенн N_{tx} .

В представленном варианте комбинирования на рисунке 3 технология SCMA и технология MIMO применяются последовательно друг за другом и при этом обратной связью охвачена только система MIMO. Такой вариант комбинирования

позволяет реализовать использование пространственных физических ресурсов для системы SCMA и сохраняет индивидуальные преимущества каждой из технологий, но такой вариант комбинирования еще имеет потенциальной резерв, который может быть разменен на дополнительный выигрыш в энергетической эффективности, пропускной способности или помехоустойчивости.

Рассмотренный вариант комбинирования технологий SCMA и MIMO (рис. 3) можно дополнительно модифицировать, охватив каналом обратной связи и кодер SCMA для совместного процесса оптимизации антенной конфигурации и выбора используемой кодовой книги SCMA как представлено на рисунке 4.

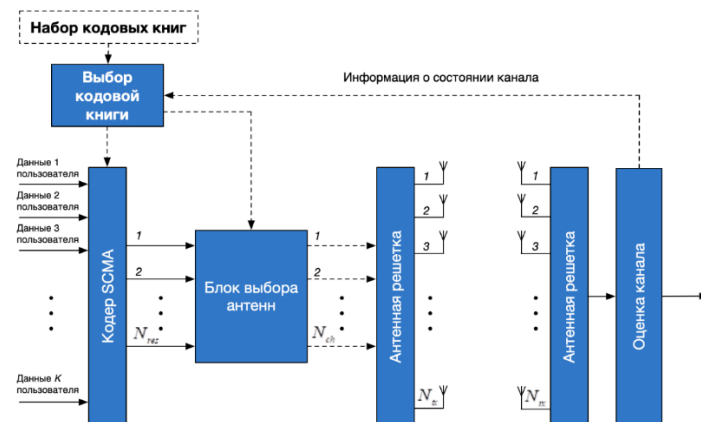


Рис. 4. Система SCMA с автовыбором антенн с совместной оптимизацией порядка модуляции и антенной конфигурации

Совместная оптимизация антенной конфигурации и кодирования SCMA порождает задачу синтеза набора кодовых книг SCMA для работы с разным количеством входных сигналов и ортогональных ресурсов (пространственных каналов). На данный момент задача синтеза набора или семейства кодовых книг разных размерностей плохо освещена в литературе.

Для случая «нисходящего» канала формирование группового сигнала производится на стороне БС. Модель сигнала, наблюдаемого на приёмной стороне, можно представить следующим образом:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} \mathbf{S}_{tx} \mathbf{X} + \boldsymbol{\eta} = \mathbf{H}_{AS} \mathbf{X} + \boldsymbol{\eta}, \quad (5)$$

где \mathbf{S}_{tx} – матрица выбора антенн на передающей стороне,

$\mathbf{Y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_{N_{res}}]^T$ – сигнал на входе приемника;

$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{N_{res}}]^T$ – используемая абонентом кодовая матрица [11].

С учетом использования пространственных каналов между выбранными антеннами на стороне БС и антеннами АТ в качестве отдельных ортогональных ресурсов, т.е. использования $N_{res} = N_{ch}$, необходимо применение SVD-разложения (сингулярного разложения) матрицы канала \mathbf{H} или матрицы $\tilde{\mathbf{H}}$ в случае выбора антенн на передающей стороне:

$$\mathbf{Y} = SVD(\mathbf{H}_{AS}) \mathbf{X} + \boldsymbol{\eta} = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V} \mathbf{X} + \boldsymbol{\eta}. \quad (6)$$

Имея на передающей стороне информацию о состоянии канала, очевидным является последний шаг – использование матрицы \mathbf{V}' в качестве прекодирующей матрицы на стороне БС, т.е. использование прекодированного вектора символов $\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{V}'\mathbf{X}$.

Умножая слева обе части (6) на эрмитову матрицу \mathbf{U}' , получим:

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{U}'\mathbf{Y} = \mathbf{D}\tilde{\mathbf{X}} + \mathbf{U}'\boldsymbol{\eta}, \quad (7)$$

где $\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{U}'\mathbf{Y}$ - преобразованный вектор наблюдения.

Далее на приёмной стороне применим обратную диагональную матрицу собственных чисел \mathbf{D}^{-1} :

$$\mathbf{D}^{-1}\tilde{\mathbf{Y}} = \tilde{\mathbf{X}} + \mathbf{D}^{-1}\mathbf{U}'\boldsymbol{\eta}. \quad (8)$$

Следует отметить, что умножение вектора шума наблюдения на матрицы \mathbf{U}' и \mathbf{D}^{-1} не меняет его статистических свойств.

Описанный подход позволяет осуществить достаточно простые операции прекодирования на передающей стороне и демодуляции на приёмной стороне, но требует наличия полной информации о состоянии канала на передающей стороне.

Компьютерное моделирование комбинированной системы SCMA-MIMO с автовыбором антенн

Для проверки эффективности описанного метода комбинирования было проведено моделирование системы связи, использующей технологию SCMA для уплотнения сигналов абонентов и технологию MIMO с автовыбором антенн для организация отдельных ортогональных пространственных каналов. Параметры моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Условия моделирования и параметры системы связи

Модуляция	SCMA
Количество сигналов абонентов	6
Количество пространственных каналов (активных антенн)	4
Количество антенн БС	8
Канал связи	Независимые релейские замирания по всем лучам
Демодуляция и декодирование	SVD + Метод максимального правдоподобия [12, 13, 14] (жесткая схема принятия решений)
Количество экспериментов	1500

Традиционный сценарий системы SCMA без применения технологии MIMO представлен на рисунке 5 кривой помехоустойчивости “Simple SCMA with frequency resources”. Из результатов моделирования видно, что в случае применения технологии MIMO с самым простым критерием автовыбора антенн на передающей стороне по максимуму нормы Фробениуса “Max. Frobenius norm” можно без расширения спектра сигнала получить энергетический выигрыш до 1,5 дБ на низких отношениях сигнал/шум (ОСШ) по сравнению с традиционной схемой SCMA с одной антенной. На высоких значениях ОСШ традиционная схема SCMA имеет лучшие характеристики.

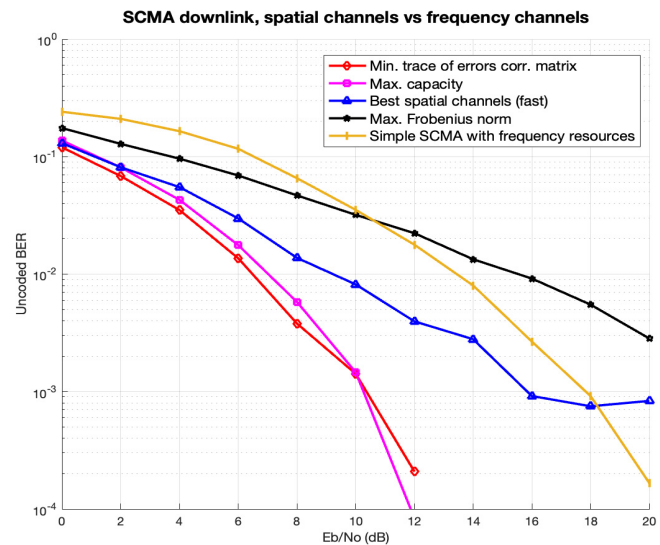


Рис. 5. Результаты моделирования комбинированной системы SCMA с автовыбором антенн с использованием критериев (1)-(4)

Вторым интересным результатом моделирования является применение критерия автовыбора антенн (1). Критерий (1) “Best spatial channels (fast)” не требует полного перебора всех возможных комбинаций антенн и является относительно простым в реализации и позволяет получить значительный энергетический выигрыш до 4 дБ с помощью применения технологии MIMO по сравнению с традиционной системой SCMA, при этом не требуя расширения спектра передаваемого сигнала.

Критерии (2) и (4) “Max. capacity” и “Min.trace of errors corr. matrix” показывают наилучшие характеристики помехоустойчивости, обеспечивая энергетический выигрыш до 7 дБ по сравнению с традиционной системой SCMA, однако платой за такой выигрыш является высокая вычислительная сложность алгоритма выбора антенн путем полного перебора всех возможных комбинаций.

Схема SCMA как разновидность схемы NOMA для уплотнения сигналов абонентов и реализации множественного доступа одна из наиболее перспективных фундаментальных технологий, которая выступит основой ближайших глобальных стандартов беспроводной связи. Ее внедрение в современные реалии ограниченного частотного спектра возможно только совместно с технологией MIMO. Дальнейшее увеличение эффективности таких комбинированных систем возможно только за счет совместной турбо-обработки.

Выводы

Использование технологии MIMO в режиме автовыбора антенн позволяет выгодно преумножить главные достоинства технологии SCMA. Использование технологии SCMA выгодно с позиции увеличения спектральной эффективности, что критически актуально для современных систем беспроводной связи, а технология MIMO в режиме автовыбора антенн позволяет выбрать наилучший частотный канал для передачи сигналов SCMA. Комбинирование технологии MIMO в режиме автовыбора антенн и технологии SCMA слабо освещено в литературе и источниках, но именно такой вариант

комбинирования этих технологий является выгодным. Небольшая плата в виде увеличения вычислительной сложности за процедуру выбора лучших пространственных каналов системы MIMO позволяет значительно улучшить систему SCMA в эквиваленте энергетического выигрыша и при этом сэкономить частотный ресурс по сравнению с традиционными технологиями ортогонального множественного доступа.

В работе была рассмотрена эта перспектива комбинирования двух ключевых технологий будущих стандартов мобильной связи в одном из возможных режимов работы. Обычно стандартами предусмотрено несколько режимов работы используемой технологии. Например, известная технология MIMO может функционировать в нескольких режимах: пространственное мультиплексирование, пространственно-временное кодирование, режим с обратной связью и без, режим автовыбора антенн и др., при этом каждый из режимов совместим с технологией OFDM. Основная концепция системы SCMA отлично подходит для работы с системой MIMO с автовыбором антенн.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что использование пространственных каналов для передачи уплотненных сигналов позволяет преодолеть физические ограничения частотных ресурсов, а использование несложных критериев автовыбора антенн позволяют получить значительный энергетический выигрыш по сравнению с классической системой SCMA, использующей частотные ресурсы. Реализация таких комбинированных систем также зависит от алгоритмов демодуляции. Для демодуляции сигналов SCMA применяется алгоритм MPA (Message Passing Algorithm) [15] или алгоритм максимального правдоподобия [13], с помощью которого были получены результаты компьютерного моделирования. Оба алгоритма обладают высокой вычислительной сложностью, значительно увеличивающейся при масштабировании системы: увеличении количества абонентов или увеличении количества пространственных каналов.

Рассмотренный вариант комбинирования технологий является одним из наиболее перспективных и может быть доработан и улучшен за счет формирования специальных кодовых книг для системы SCMA, нацеленных на использование пространственных ресурсов с учетом специфики различных моделей каналов, а также совместного процесса оптимизации выбора антенных конфигураций технологии MIMO и размера кодовых книг системы SCMA.

Литература

- Zhang Y.-P., Yu Q.-Y., Liu Z.-J., Zhou Y.-K., Meng W.-X. Antenna-Resource-Based SCMA in Downlink Multiuser Transmission Systems // 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), Antwerp, Belgium, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128639.
- Бен Режеб Тауфик Бен Камель. Комбинирование технологий многоантенных систем MIMO и неортогонального доступа на основе разреженных последовательностей SCMA // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №7. С. 37-43.
- Dadi M.B., Rehami B.C. Performance of downlink MIMO-NOMA system in 5G Networks // 2023 IEEE International Workshop on Mechatronic Systems Supervision (IW_MSS), Hammamet, Tunisia, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/IW_MSS59200.2023.10368947.
- Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Хазов М.Л. Критерии автовыбора антенн в системах MIMO // Электросвязь. 2018. № 10. С. 78-81.
- Demiral B., Ertuğ Ö. Transmitter Receiver Antenna Selection for MIMO-NOMA System // 2021 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), Split, Hvar, Croatia, 2021, pp. 1-4, doi: 10.23919/SoftCOM52868.2021.9559104
- Can M., Altunbas I. Joint Transmit and Receive Antenna Selection in MIMO-NOMA-Based Uplink Satellite Networks // IEEE Sensors Journal, vol. 24, no. 15, pp. 24841-24850, 1 Aug.1, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3415113.
- Yu Y., Chen H., Li Y., Ding Z., Song L., Vucetic B. Antenna Selection for MIMO Nonorthogonal Multiple Access Systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 4, pp. 3158-3171, April 2018, doi: 10.1109/TVT.2017.2777540.
- He K., Vu T.X., Chatzinota, S., Ottersten B.E. Fast Optimal Antenna Selection for Massive MIMO // 2023 IEEE 24th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2023, pp. 186-190.
- Bae S., Choi J. Joint Precoding and Antenna Selection for Sum Spectral Efficiency Maximization // 2024 15th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju Island, Korea, Republic of, 2024, pp. 940-945, doi: 10.1109/ICTC62082.2024.10827353.
- Abbas W.B., Khalid S., Ahmed Q.Z., Khalid F., Alade T.T., Sureephong P. Heuristic Antenna Selection and Precoding for a Massive MIMO System // IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 5, pp. 83-96, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2023.3339402.
- Lei T., Luo Q., Ni S., Chen S., Yu L., Xiao P. Novel Sparse Codebook Design for MIMO-SCMA // IEEE Transactions on Vehicular Technology, doi: 10.1109/TVT.2025.3527996.
- Yang C.-Y., Yu Q.-Y., Zhang Y.-P. Pilot Sequences Aided Spatial Modulation for Grant-Free Multiple Access Systems // IEEE Communications Letters, vol. 27, no. 12, pp. 3345-3349, Dec. 2023, doi: 10.1109/LCOMM.2023.3328902.
- Pappa M., Sridevi S. Analysis of MIMO NOMA using Iterative ML and LMMSE Detection // 2023 World Conference on Communication & Computing (WCONF), RAIPUR, India, 2023, pp. 1-8, doi: 10.1109/WCONF58270.2023.10235106.
- Hai N.T., Vi V.T., Uyen N.T.X., Khanh D.B.C., Le Khoa D. BER Performance of Downlink MIMO-NOMA with Combination of SFBC and Joint Maximum-Likelihood Detector // 2024 Tenth International Conference on Communications and Electronics (ICCE), Danang, Vietnam, 2024, pp. 30-35, doi: 10.1109/ICCE62051.2024.10634711.
- Thanh D.Q., Tin T.H., Nghia N.M., Khoa D.L. Performance Analysis of Suboptimal Multiuser Detection Algorithms Based on MPA in Uplink SM-SCMA System // 2022 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF), Ho Chi Minh City, Vietnam, 2022, pp. 600-605, doi: 10.1109/RIVF55975.2022.10013893.
- Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б. Проблема повышения спектральной эффективности и емкости в перспективных системах связи 6G // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 2. С. 25-31
- Бакулин М.Г., Бен Р.Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Смирнов А.Э. Снижение вычислительной сложности детектирования сигнала в системах MIMO // Электросвязь. 2021. № 3. С. 22-27.
- Крейнделин В.Б., Старовойтов М.Ю. Предсказание параметров радиоканала и выбор антенн на приеме в системах mimo, работающих в стандарте LTE // Электросвязь. 2017. № 12. С. 22-27.

OPTICAL DIGITAL-ANALOG COMPUTER

Ben Rejeb T.B.K., Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, t.benreheb@mtuci.ru

Abstract

Non-orthogonal multiple access is a key technology for implementation in next generation mobile communication standards. The implementation of NOMA technology requires coordination with already used and well-proven technologies, such as the technology of multi-antenna systems. The combination of MIMO and NOMA technologies provides to ensure efficient use of the radio frequency spectrum through spatial signal processing and high network capacity due users' signal processing in overload mode. There are several types of NOMA technology, each of them can be combined with MIMO technology, taking into account the special features of both technologies. Sparse code multiple access is one of the most promising type of NOMA technology. The main goal of this article is to analyze the possibility of combining SCMA technology with MIMO technology in the antenna selection mode to organize spatial orthogonal resources as one of the possible options for combination of these technologies for next-generation mobile communication systems. The results of computer modeling confirm the effectiveness of the joint use of SCMA and MIMO in antenna selection mode.

Keywords: combination, non-orthogonal multiple access, SCMA, NOMA, Multiple antenna systems, MIMO, SCMA-MIMO, antenna selection

References

- [1] I. Y. -P. Zhang, Q. -Y. Yu, Z. -J. Liu, Y. -K. Zhou and W. -X. Meng, "Antenna-Resource-Based SCMA in Downlink Multiuser Transmission Systems," *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, Antwerp, Belgium, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128639.
- [2] Ben Rezheb Taufik Ben Kamel, "Kombinirovaniye tekhnologiy mnogoanten-nyh sistem MIMO i neortogonal'nogo dostupa na osnove razrezhennykh posledovatel'nostej SCMA," *T-Comm*. 2024. Tom 18, no. 7, pp. 37-43. (in Russian)
- [3] M. B. Dadi and B. C. Rehami, "Performance of downlink MIMO-NOMA system in 5G Networks," *2023 IEEE International Workshop on Mechatronic Systems Supervision (IW_MSS)*, Hammamet, Tunisia, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/IW_MSS59200.2023.10368947.
- [4] M.G. Bakulin, V.B. Kreyndelin, M.L. Hazov, "Kriterii avtovyboro antenn v sistemah MIMO," *Elektrosvyaz'*, 2018, no. 10, pp. 78-81. (in Russian)
- [5] B. Demiral and O. Ertug, "Transmitter Receiver Antenna Selection for MIMO-NOMA System," *2021 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, Split, Hvar, Croatia, 2021, pp. 1-4, doi: 10.23919/SoftCOM52868.2021.9559104
- [6] M. Can and I. Altunbas, "Joint Transmit and Receive Antenna Selection in MIMO-NOMA-Based Uplink Satellite Networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 15, pp. 24841-24850, 1 Aug. 1, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3415113.
- [7] Y. Yu, H. Chen, Y. Li, Z. Ding, L. Song and B. Vucetic, "Antenna Selection for MIMO Nonorthogonal Multiple Access Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 4, pp. 3158-3171, April 2018, doi: 10.1109/TVT.2017.2777540
- [8] K. He, T.X. Vu, S. Chatzinotas, B.E. Ottersten, "Fast Optimal Antenna Selection for Massive MIMO," *2023 IEEE 24th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2023, pp. 186-190.
- [9] S. Bae and J. Choi, "Joint Precoding and Antenna Selection for Sum Spectral Efficiency Maximization," *2024 15th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju Island, Korea, Republic of, 2024, pp. 940-945, doi: 10.1109/ICTC62082.2024.10827353
- [10] W. B. Abbas, S. Khalid, Q. Z. Ahmed, F. Khalid, T. T. Alade and P. Sureephong, "Heuristic Antenna Selection and Precoding for a Massive MIMO System," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 5, pp. 83-96, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2023.3339402
- [11] T. Lei, Q. Luo, S. Ni, S. Chen, L. Yu and P. Xiao, "Novel Sparse Codebook Design for MIMO-SCMA," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, doi: 10.1109/TVT.2025.3527996
- [12] C. -Y. Yang, Q. -Y. Yu and Y. -P. Zhang, "Pilot Sequences Aided Spatial Modulation for Grant-Free Multiple Access Systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 27, no. 12, pp. 3345-3349, Dec. 2023, doi: 10.1109/LCOMM.2023.3328902
- [13] M. Pappa and S. Sridevi, "Analysis of MIMO NOMA using Iterative ML and LMMSE Detection," *2023 World Conference on Communication & Computing (WCONF)*, RAIPUR, India, 2023, pp. 1-8, doi: 10.1109/WCONF58270.2023.10235106
- [14] N. T. Hai, V. T. Vi, N. T. X. Uyen, D. B. C. Khanh and D. Le Khoa, "BER Performance of Downlink MIMO-NOMA with Combination of SFBC and Joint Maximum-Likelihood Detector," *2024 Tenth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, Danang, Vietnam, 2024, pp. 30-35, doi: 10.1109/ICCE62051.2024.10634711
- [15] D. Q. Thanh, T. H. Tin, N. M. Nghia and D. L. Khoa, "Performance Analysis of Suboptimal Multiuser Detection Algorithms Based on MPA in Uplink SM-SCMA System," *2022 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF)*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2022, pp. 600-605, doi: 10.1109/RIVF55975.2022.10013893