

КОМБИНИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МНОГОАНТЕННЫХ СИСТЕМ MIMO И НЕОРТОГОНАЛЬНОГО ДОСТУПА НА ОСНОВЕ РАЗРЕЖЕННЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ SCMA

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-7-37-43

Manuscript received 02 June 2024;

Accepted 07 July 2024

Бен Режеб Тауфик Бен Камель,
Московский Технический Университет Связи и Информатики,
Москва, Россия, t.benrejeb@mtuci.ru

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

Одной из фундаментальных технологий, лежащих в основе современных стандартов является технология многоантенных систем MIMO. Очевидно, что стремительное развитие технологии MIMO привело к включению ее в качестве технологии-кандидата и в новые системы 6-го поколения (6G). Технология MIMO продолжает свое развитие и существует большое количество разновидностей многоантенных систем, которые легли в основу и новых систем связи, таких как 5G-New Radio, где реализуется весь потенциал технологий MIMO. Появление технологии NOMA влечет за собой введение термина "перегруженных систем" или систем, работающих в режиме перегрузки (overload systems). Огромный интерес со стороны исследователей, разработчиков и крупных производителей оборудования к технологии NOMA как к технологии-кандидату для включения в будущие стандарты мобильной связи привел к появлению нескольких ее разновидностей. Все разновидности технологии NOMA нацелены на работу системы в режиме перегрузки, т.е. использовании ограниченного количества ресурсов для обслуживания значительно превышающего количества абонентов. Очевидная тенденция использования технологии MIMO и технологии NOMA в будущем стандарте мобильной связи 6-го поколения порождает актуальную задачу комбинирования этих технологий. В условиях ограниченных частотных ресурсов большой интерес исследователей и разработчиков получили технология неортогонального множественного доступа NOMA и ее разновидности, которая также является технологией-кандидатом для включения в будущие мировые стандарты систем беспроводной связи. Целью данной статьи является анализ известных в литературе и источниках вариантов комбинирования технологии MIMO с одной из наиболее перспективных разновидностей технологии NOMA – технологией неортогонального множественного доступа на основе разреженных последовательностей SCMA.

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 многоантенных систем MIMO и неортогонального доступа на основе разреженных последовательностей SCMA // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №7. С. 37-43.

For citation:

Ben Rejeb T.B.K. (2024). Combining of multi-antenna MIMO systems and non-orthogonal multiple access SCMA. T-Comm, vol. 18, no.7, pp. 37-43. (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 сопровождалась 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.

Одной из таких фундаментальных технологий является технология Multiple-Input Multiple Output – базовая технология стандартов LTE, LTE-Advanced, IEEE 802.11 b/g/n/ac/ad/ax/be. Доказательством уникальности технологии MIMO является ее широкое освещение в литературе, статьях, большое количество изобретений, патентов и диссертации. Такой широкий интерес исследователей и разработчиков алгоритмов к технологии MIMO обусловлен в достаточно «сложное» время для прорывного развития новых стандартов подвижной связи. Именно благодаря технологии MIMO и ее разновидностям стал возможен очевидный прорыв в производительности систем сотовой связи, например, системы LTE по сравнению с ранее распространенными стандартами систем мобильной связи третьего поколения.

Технология MIMO продолжает свое развитие и существует большое количество разновидностей многоантенных систем, которые легли в основу и новых систем связи, таких как 5G-New Radio, где реализуется весь потенциал технологий MIMO.

Появление технологии NOMA влечет за собой введение термина «перегруженных систем» или систем, работающих в режиме перегрузки (overload systems). Огромный интерес со стороны исследователей, разработчиков и крупных производителей оборудования к технологии NOMA как к технологии-кандидату для включения в будущие стандарты мобильной связи привел к появлению нескольких ее разновидностей. Все разновидности технологии NOMA нацелены на работу системы в режиме перегрузки, т.е. использовании ограниченного количества ресурсов для обслуживания значительно превышающего количества абонентов.

Очевидная тенденция использования технологии MIMO и технологии NOMA в будущем стандарте мобильной связи 6-го поколения порождает актуальную задачу комбинирования этих технологий.

Технология многоантенных систем MIMO

Использование пространственного разнесения сигналов получило широкое применение в стандартах систем связи [1]:

- **Стандарты Wi-Fi (IEEE 802.11).** Стандарты 802.11n, 802.11ac, 802.11ad и 802.11ax поддерживают технологию

MIMO для достижения более высокой пропускной способности и лучшей производительности Wi-Fi сетей. Эти стандарты могут использовать различные конфигурации антенн MIMO, такие как 2x2, 3x3 или 4x4, чтобы обеспечить передачу множества потоков данных одновременно.

- **Стандарты LTE (3GPP Long-Term Evolution).** Стандарт LTE, который используется для мобильной связи, также поддерживает технологию MIMO. Например, LTE-A (LTE Advanced) предоставляет различные конфигурации MIMO, включая 2x2 и 4x4. При использовании MIMO в LTE, разные антенны используются для передачи различных потоков данных, что улучшает емкость и производительность сети.

- **Стандарт 5G (3GPP New Radio u Advanced).** 5G, новый стандарт мобильной связи, также широко использует технологию MIMO. 5G NR включает различные конфигурации MIMO, включая 4x4, 8x8 и даже выше. MIMO в 5G позволяет достигать очень высоких скоростей передачи данных и одновременно обслуживать большое количество устройств.

На рисунке 1 приведена иллюстрация системы MIMO с N_{tx} передающими и N_{rx} приёмными антеннами.

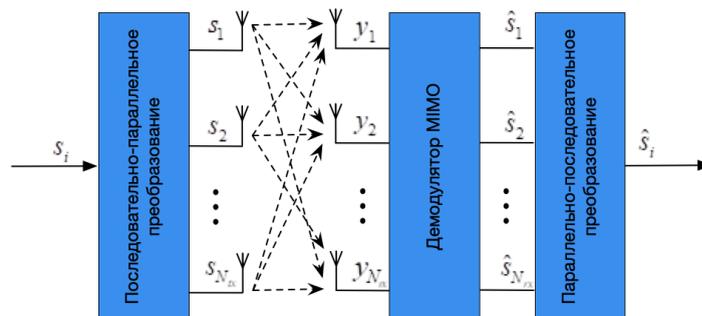


Рис. 1. Упрощенная модель многоантенной системы

На рисунке 1 видно, что каждый символ излучается индивидуальной антенной. Для описания канала в системах MIMO наиболее удобно использовать матрицу, размерность которой будет зависеть от количества передающих и приёмных антенн ($N_{tx} \times N_{rx}$). Коэффициенты такой матрицы будут представлять собой передаточные коэффициенты h_{ij} от j -й передающей антенны к i -й приёмной антенне [1]:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_{rx}} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_{rx}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_{rx}1} & h_{N_{rx}2} & \dots & h_{N_{rx}N_{rx}} \end{bmatrix}. \tag{1}$$

В системах MIMO мощность излучаемого сигнала E_s распределяется между всеми антеннами. Для простоты описания примем, что мощности сигнала E_s распределяется между антеннами равномерно.

В упрощенной форме модель наблюдаемого сигнала в входе приёмника может записана в следующей форме:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \boldsymbol{\eta}, \tag{2}$$

где η – вектор шума в канале размерности $N_{rx} \times 1$, элементы которого имеют нулевое математическое ожидание и суммарную дисперсию реальной и мнимой части $2\sigma_{\eta}^2$ [1].

Отношением сигнал/шум (ОСШ) в такой системе может быть представлено следующим образом:

$$SNR = \frac{E_s}{2\sigma_{\eta}^2} \quad (3)$$

Неортогональный множественный доступ на основе прореженных последовательностей SCMA

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 [2, 3], т.е.:

$$K > N_{res}, \quad (4)$$

Именно условие (4) характеризует перегруженный режим системы. В ситуации, когда количество ресурсов ограничено, необходимо правило распределения доступных N_{res} ресурсов между K абонентами системы. Также правило определяется кодовой книгой, состоящей из матриц, содержащих кодовые слова (столбцы матрицы), определяющий право абонента использовать той 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, а точнее количеством столбцов $N_{codewords}$. Использование SCMA кодирования вместо традиционной модуляции приводит к одному из недостатков таких систем: изменение кратности модуляции $N_{codewords}$, количества ресурсов N_{res} или количества одновременно работающих абонентов K требует использования другой кодовой книги [2, 3].

В таблице 1 приведена наиболее популярная в литературе кодовая книга с конфигурацией $N_{res} = 4$, $N_{codewords} = 4$, $K = 6$ [2, 3].

Таблица 1

Набор матриц для системы с конфигурацией 4x4x6

№ абонента	Кодовая книга
1	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,1815 - 0,1318i & -0,6351 - 0,4615i & 0,6351 + 0,4615i & 0,1815 + 0,1318i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,7851 & -0,2243 & 0,2243 & -0,7851 \end{bmatrix}$
2	$\begin{bmatrix} 0,7851 & -0,2243 & 0,2243 & -0,7851 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,1815 - 0,1318i & -0,6351 - 0,4615i & 0,6351 + 0,4615i & 0,1815 + 0,1318i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
3	$\begin{bmatrix} -0,6351 + 0,4615i & 0,1815 - 0,1318i & -0,1815 + 0,1318i & 0,6351 - 0,4615i \\ 0,1392 - 0,1759i & 0,4873 - 0,6156i & -0,4873 + 0,6156i & -0,1392 + 0,1759i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

4	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,7851 & -0,2243 & 0,2243 & -0,7851 \\ -0,0055 - 0,2242i & -0,0193 - 0,7848i & 0,0193 + 0,7848i & 0,0055 + 0,2242i \end{bmatrix}$
5	$\begin{bmatrix} -0,0055 - 0,2242i & -0,0193 - 0,7848i & 0,0193 + 0,7848i & 0,0055 + 0,2242i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,6351 + 0,4615i & 0,1815 - 0,1318i & -0,1815 + 0,1318i & 0,6351 - 0,4615i \end{bmatrix}$
6	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,7851 & -0,2243 & 0,2243 & -0,7851 \\ 0,1392 - 0,1759i & 0,4873 - 0,6156i & -0,4873 + 0,6156i & -0,1392 + 0,1759i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

На рисунке 2 проиллюстрирован процесс формирования группового сигнала в системах SCMA, где наглядно изображен процесс применения комплексных информационных символов абонентами, исходя из правил, регламентируемых кодовыми книгами. В случае рассматриваемой конфигурации 4x4x6, используемая кодовая книга (табл. 1) соответствует двухбитовой модуляции [2, 3].

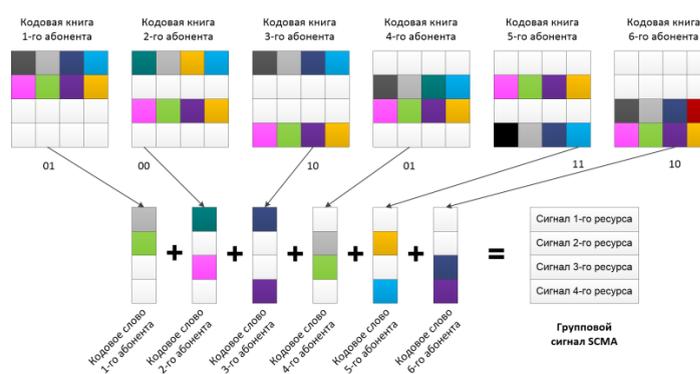


Рис. 2. Формирование группового сигнала SCMA

Матрицы в кодовой книге, приведенной в таблице 1, содержат нулевые элементы. Именно этой причиной обусловлено название таких систем NOMA. Использование прореженных последовательностей позволяет обеспечивать невысокую вычислительную сложность алгоритмов приёма в таких системах.

Каждый абонент использует свою кодовую матрицу из заданной книги, для передачи разных комбинаций бит. Определение значений ненулевых элементов кодовых книг и их расположение является сложной оптимизационной задачей, стоящей перед разработчиками алгоритмов обработки сигналов перед масштабным внедрением систем SCMA в будущие стандарты систем связи.

Матрица каждого абонента \mathbf{X}_k имеет размерность $N_{res} \times N_{codewords}$ и может быть представлена следующим образом [2]:

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k1} & \mathbf{x}_{k2} & \dots & \mathbf{x}_{kN_{codewords}} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{N_{res} \times N_{codeword}} \quad (5)$$

Столбцы матрицы \mathbf{X}_k соответствуют значениям информационных символов. Для описанного случая двухбитовой модуляции используются матрицы с 4 столбцами, которые в зависимости от входной последовательности информационных бит.

Комбинирование технологий MIMO и SCMA

Определенно важная и перспективная задача – совместное использование технологий MIMO и SCMA. При этом важным нюансом является требование сохранить преимущества каждой из технологий при их совместном использовании. Наиболее амбициозной целью является получение выигрыша именно от совместного использования технологий MIMO и SCMA (или других разновидностей систем NOMA), т.е. умножения преимуществ каждой из технологий при их совместном

В [4] авторы предлагают последовательную схему применения технологий SCMA и MIMO (

Рис. 3), при этом система MIMO работает в режиме пространственного мультиплексирования с прекодированием, а технология SCMA используется в качестве модулятора.

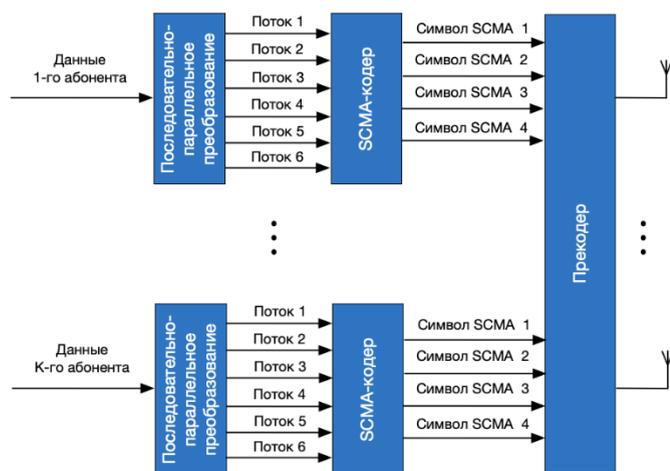


Рис. 3. Система SCMA-MIMO с прекодированием Zero-Forcing [4]

Авторами рассматривается система с конфигурацией с несколькими передающими антеннами N_t и несколькими пользователями K , при этом информационные потоки бит каждого пользователя индивидуально проходят процедуру кодирования SCMA с помощью кодовой книги, представленной в таблице 1. Информационный поток символов каждого пользователя разбивается на отдельные потоки для дальнейшего SCMA-кодирования:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{q}_1 &\rightarrow [s_{11} \ s_{12} \ s_{13} \ s_{14} \ s_{15} \ s_{16}]^T \\
 \mathbf{q}_2 &\rightarrow [s_{21} \ s_{22} \ s_{23} \ s_{24} \ s_{25} \ s_{26}]^T \\
 \mathbf{q}_3 &\rightarrow [s_{31} \ s_{32} \ s_{33} \ s_{34} \ s_{35} \ s_{36}]^T \\
 \mathbf{q}_4 &\rightarrow [s_{41} \ s_{42} \ s_{43} \ s_{44} \ s_{45} \ s_{46}]^T
 \end{aligned} \tag{6}$$

где \mathbf{q}_k – информационная поток символов k -го пользователя, s_{ki} – порядковый номер символа в информационном потоке k -го пользователя.

После SCMA-кодера количество потоков данных каждого пользователя возвращается к исходному:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{q}_1^{12} &\rightarrow [x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{14}]^T \\
 \mathbf{q}_2^{12} &\rightarrow [x_{21} \ x_{22} \ x_{23} \ x_{24}]^T \\
 \mathbf{q}_3^{12} &\rightarrow [x_{31} \ x_{32} \ x_{33} \ x_{34}]^T \\
 \mathbf{q}_4^{12} &\rightarrow [x_{41} \ x_{42} \ x_{43} \ x_{44}]^T
 \end{aligned} \tag{7}$$

где \mathbf{q}_k^{12} представляет собой $L \times \log_2(M) = 12$ кодированных бит в последовательности k -го пользователя, а x_{kj} – символ последовательности k -го пользователя на j -ой поднесущей.

Дальнейшие преобразования сигналов осуществляются также, как и в классических система MIMO.

Похожая схема также предложена в [5], где авторами предлагается комбинированная система, называемая Multi-antenna SCMA (рис. 6).

Модель наблюдаемого сигнала на входе приёмника может быть записана в виде:

$$y_j = \sum_{n_r=1}^{N_r} \text{diag}(\mathbf{h}_j^{(n_r)}) \mathbf{x}^{(n_r)} = \sum_{n_r=1}^{N_r} \text{diag}(\mathbf{h}_j^{(n_r)}) \sum_{k=1}^K s_k^{(n_r)} + n_j \tag{8}$$

При таком сценарии последовательного использования абсолютно справедливо сохраняются преимущества обеих технологий. При этом сохраняются отдельные задачи для каждой из технологий: для системы SCMA необходим выбор соответствующей кодовой книги в зависимости от количества потоков используемых для обработки данных каждого абонента.

Однако, есть и наглядные недостатки такой схемы. Очевидно, что в таких системах сложность реализации приемника заметно вырастет, если пользователи будут использовать разные кодовые книги SCMA по аналогии с использованием разных методов модуляции для передачи информационных потоков разных пользователей в классических системах MIMO.

При этом в [5] для этой схемы «Multi-antenna SCMA» авторы предполагают ее использование только с одной антенной на приёмной стороне, что не позволяет реализовать основные преимущества систем MIMO. Для реализации преимуществ пространственной обработки сигналов в [5] авторы предлагают комбинировать технологию SCMA с технологией MIMO в режиме пространственно-временного блочного кодирования на примере известной схемы Аламути.

На приёмной стороне авторы предлагают двухступенчатую обработку: последовательное комбинирование приёмников для систем SCMA и MIMO, первоначально требуется STBC (Space-Time Block Codes) демодулятор, после чего информация поступает на вход декодера MPA (Message Passing Algorithm) [12, 14].

Такой же подход комбинирования именно режима STBC с технологией SCMA используется при масштабировании систему до четырех передающих антенн и четырех приёмных антенн за счет использования матрицы QOSTBC.

Несмотря на то, что в режиме STBC реализуются основные преимущества система MIMO, заключающиеся в пространственном разнесении сигналов, наиболее интересным является именно комбинирования технологии SCMA с технологией MIMO в режим пространственного мультиплексиро-

вания или же в режиме формирования диаграммы направленности Beamforming, так как именно эти режимы могут заметно преумножить индивидуальные преимущества технологий NOMA и MIMO.

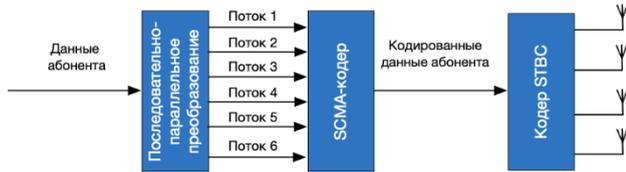


Рис. 4. Комбинирование системы SCMA и системы MIMO в режиме STBC

В работе [6] авторы также как и в [4] предлагают комбинировать технологию SCMA с технологией MIMO в режиме пространственного мультиплексирования как показано на рисунке 8. На первый взгляд, предложенный подход к комбинированию является идентичным, но это не так. Основная идея варианта комбинирования обозначена в названии. Предложенная схема именуется авторами AR-SCMA (Antenna-Resource-Based SCMA).

Такой вариант комбинирования предполагает использование отдельных антенн решетки вместо частотных ресурсов как принято в известных системах SCMA. На приёмной стороне подразумевается использование двухступенчатой обработки сигналов: последовательное применение алгоритмов демодуляции ZF или MMSE для систем MIMO и дальнейшее применение декодера MPA [10, 12].

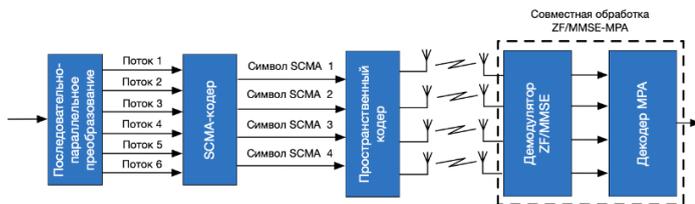


Рис. 5. Система AR-SCMA из [6]

Основной идеей, предложенной в [6] является использование нескольких антенн, а именно пространственных каналов в качестве доступных ресурсов для системы SCMA, в отличие от традиционных систем SCMA, где ресурсами выступают поднесущие частоты. В работе [6] приведен выигрыш таких систем AR-SCMA по сравнению традиционными системами SCMA (FR-SCMA – Frequency resources SCMA) на примере расчета спектральной эффективности системы. Предложенный вариант комбинирования AR-SCMA обладает выигрышем: в среднем 8 дБ по сравнению с традиционной системой SCMA и в среднем 2 дБ по сравнению с традиционной системой MIMO.

В работе [8] предлагается абсолютно иной подход к комбинированию технологий в «восходящем» канале на стороне абонентов [9, 13]. Авторы предлагают комбинированную схему SCMA с пространственной модуляцией под названием SM-SCMA (Spatial modulation SCMA) [8, 15].

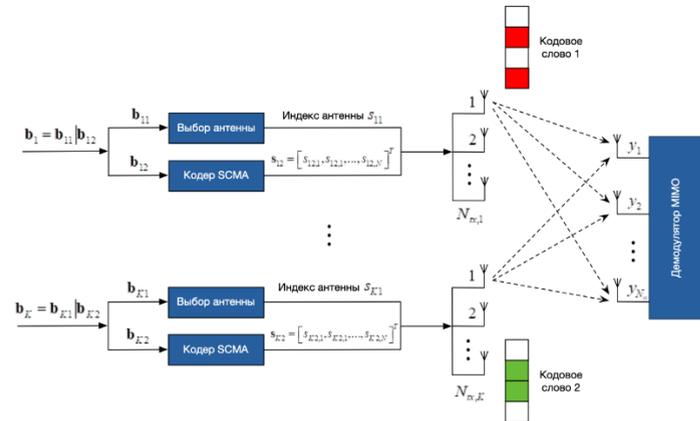


Рис. 6. Иллюстрация схемы SCMA с пространственной модуляцией

В предложенной схеме каждый абонентский терминал оснащен несколькими антеннами $N_{tx,k}$. На передающей стороне информационный поток бит \mathbf{b}_k каждого пользователя разбивается на две части \mathbf{b}_{k1} и \mathbf{b}_{k2} . Первая часть \mathbf{b}_{k1} используется в качестве индекса пространственной модуляции, т.е. $s_{k1} = g_1(\mathbf{b}_{k1})$, где s_{k1} – порядковый номер передающей антенны, g_1 – функция выбора антенны, $1 \leq s_{k1} \leq N_{tx,k}$.

Вторая часть \mathbf{b}_{k2} используется для передачи информационного потока бит, с помощью кодера SCMA, т.е. с помощью вектора $\mathbf{s}_{k2} = [s_{k2,1}, s_{k2,2}, \dots, s_{k2,N}]^T$, где \mathbf{s}_{k2} выбирается из соответствующие кодовой книги SCMA, например, кодовой книги из таблицы 1. Выбранный вектор кодовой книги \mathbf{s}_{k2} передается с помощью s_{k1} -й антенны абонентского терминала.

Модель наблюдаемого сигнала на входе n_{rx} приёмника базовой станции может быть записана в следующем виде:

$$\mathbf{y}_{n_{rx}} = \sum_{k=1}^K \text{diag}(\mathbf{h}_{s_{k1}, n_{rx}, k}) \mathbf{s}_{k2} + \mathbf{n}_{n_{rx}}, \quad (9)$$

где $\mathbf{h}_{s_{k1}, n_{rx}, k} = [h_{1, s_{k1}, n_{rx}, k}, h_{2, s_{k1}, n_{rx}, k}, \dots, h_{N, s_{k1}, n_{rx}, k}]^T$, а $h_{n, s_{k1}, n_{rx}, k}$ – комплексный множитель канала на физическом ресурсе между s_{k1} -й передающей антенной k -го абонента и n_{rx} -й приёмной антенной базовой станции, N – общее количество ортогональных физических ресурсов.

Модель общего сигнала от всех пользователей системы на входе приёмника базовой станции можно представить следующим образом [12]:

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \text{diag}(\mathbf{h}_{s_{k1}, k}) \mathbf{s}'_{k2} + \mathbf{n}, \quad (10)$$

где $\mathbf{y} = [\mathbf{y}_1^T, \mathbf{y}_2^T, \dots, \mathbf{y}_{N_R}^T]^T$, $\mathbf{h}_{s_{k1}, k} = [\mathbf{h}_{s_{k1}, 1, k}^T, \mathbf{h}_{s_{k1}, 2, k}^T, \dots, \mathbf{h}_{s_{k1}, N_{rx}, k}^T]^T$, $\mathbf{s} = [\mathbf{s}_1^T, \mathbf{s}_2^T, \dots, \mathbf{s}_{N_R}^T]^T$ и $\mathbf{n} = [\mathbf{n}_1^T, \mathbf{n}_2^T, \dots, \mathbf{n}_{N_R}^T]^T$.

Выводы

В статье представлены наиболее распространенные в сподобы комбинирования технологий ММО и SCMA как одной из разновидностей технологии NOMA. Следует отметить, что совместное использование этих технологий является обязательным условием для будущих систем беспроводной связи. Главной целью исследователей и разработчиков при комбинировании этих систем является получение синергетического выигрыша от их применения. Наилучшим результатом комбинирования этих технологий является сохранение преимуществ каждой из технологий отдельно при их совместном использовании.

На пути к достижению положительного результата от комбинирования технологий ММО и SCMA стоит несколько глобальных и сложных для решения проблем. Первой и очень весомой проблемой является синтез кодовых книг для использования технологии SCMA совместно с ММО. Каждое изменение конфигурации системы SCMA: количества абонентов или количества доступных ортогональных ресурсов влечет за собой смену используемой кодовой книги. На сегодняшний день для конфигурации от двух до восьми абонентов известно достаточное количество кодовых книг в литературе и источниках, однако для большего количества абонентов кодовые книги в источниках отсутствуют.

Современные системы ММО, а точнее системы Massive ММО, оснащенные 16-ю и более антеннами потребуют кодовых книг большой размерности при совместном использовании с технологией SCMA. Кроме того, в системах ММО актуальным является режим переключения антенн Antenna selection, подразумевающий регулярную смену количества антенн на передающей и на приёмной стороне, при этом конфигурации могут быть несимметричны. Быстрые переключения антенных конфигураций большой размерности требуют обширного запаса кодовых книг SCMA, вычисленных заранее. Кроме того, пока не решена задача поиска оптимального алгоритма синтеза кодовых книг. Схожие проблемы актуальны и для режима пространственно-временного блочного кодирования STBC для систем ММО, где помимо синтеза STBC матриц и их масштабирования придется также производить и постоянную смену кодовых книг SCMA.

Все эти локальные проблемы ведут к глобальной проблеме комбинирования технологий ММО и SCMA – резкому повышению вычислительной сложности алгоритмов обработки сигналов. Причем эта проблема актуальна при объединении технологии ММО с любой из разновидностей технологии NOMA. Наибольшей проблемой, связанной со сложностью алгоритмов, является сложность алгоритмов приёма. Алгоритмы демодуляции, используемые в системах ММО, обладают высокой сложностью, возрастающей нелинейно с ростом количества используемых антенн.

В системах SCMA вопрос сложности алгоритмов приёма стоит еще острее. Известный алгоритм демодуляции сигналов SCMA, известный как МРА (Message Passing Algorithm) обладает крайне высокой вычислительной сложностью [2, 10, 14]. Очевидно, что совместное использование технологий ММО и SCMA потребует последовательного применения вышеуказанного алгоритма МРА и алгоритмов демодуляции для систем ММО, что значительно повлияет на сложность реализации приёмника таких комбинированных систем. Ситуация также усугубляется и потенциальными диапазонами

частот для будущих систем беспроводной связи. В случае перехода к миллиметровым диапазонам частот проблема повышенной вычислительной сложности усугубляется еще больше. Формирование совместного или последовательного алгоритма приема для таких комбинированных систем проблематично уже для текущих актуальных диапазонов частот, а в случае перехода на новые диапазоны частот, упоминаемые в актуальных стандартах, становится просто необходимым резкое снижение вычислительной сложности, что достаточно проблематично.

Литература

1. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Миронов Ю.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Мобильная связь на пороге 6G. М.: Горячая линия – Телеком, 2024. 248 с.
2. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Неортогональный множественный доступ (NOMA) как основа систем связи 5G и 6G. М.: Горячая линия – Телеком, 2024. 264 с.
3. Bakulin M., Ben Rejeb T., Kreyndelin V., Pankratov D., Smirnov A. Problems of Combining NOMA with MIMO // 2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED), Moscow, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/TIRVED58506.2023.10332741.
4. Yang Y., Fang S., Zeng X., Wang H., Huang R. A Novel Framework in MIMO Downlink Transmission with Non-orthogonal Multiple Access // 2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2019, pp. 2060-2064, doi: 10.1109/ICCC47050.2019.9064452.
5. Wu J., Cheng C., Technology Q.Z., Technology H.U. University R. CIAMA: A Multiple Access Scheme with High Diversity and Multiplexing Gains for Next-gen Wireless Networks. 2023.
6. 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.
7. Zhu Cuitao et al. Two Stage Detection for Uplink Massive MIMO MU-SCMA Systems // International ICST Conference on Communications and Networking in China. 2018.
8. Pan Z., Luo J., Lei J., Wen L., Tang C. Uplink Spatial Modulation SCMA System // IEEE Communications Letters, vol. 23, no. 1, pp. 184-187, Jan. 2019, doi: 10.1109/LCOMM.2018.2882813.
9. Bakulin M., Ben Rejeb T., Kreyndelin V., Pankratov D., Smirnov A. Uplink NOMA-MIMO Systems with Rayleigh Power Distribution // 2022 Sensors 22, no. 11: 4002. [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/S22114002](https://doi.org/10.3390/s22114002)
10. Chen Y. -M., Hsu Y. -C., Wu M. -C., Singh R., Chang Y. -C. On Near-Optimal Codebook and Receiver Designs for MIMO-SCMA Schemes // IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 21, no. 12, pp. 10724-10738, Dec. 2022, doi: 10.1109/TWC.2022.3186973
11. Cheng H., Zhang C., Huang Y., Yang L. Efficient Message Passing Receivers for Downlink MIMO-SCMA Systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 71, no. 5, pp. 5073-5086, May 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3151936.
12. Mekhiche A., Cipriano A.M., Poulliat C. SCMA Detection in MIMO Systems with Low Complexity EP using QRD // 2023 12th International Symposium on Topics in Coding (ISTC), Brest, France, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISTC57237.2023.10273533.
13. Meng W., Gu Y., Bao J., Lian Z., Kong Z., Yin W. Spatially Modulated Sparse Code Multiple Access in Uplink Mine Communications // 2022 13th Asian Control Conference (ASCC), Jeju, Korea, Republic of, 2022, pp. 1660-1664, doi: 10.23919/ASCC56756.2022.9828286.
14. Chaturvedi S., Liu Z., Bohara V.A., Srivastava A., Xiao P. A Tutorial on Decoding Techniques of Sparse Code Multiple Access // IEEE Access, vol. 10, pp. 58503-58524, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3178127.
15. Mesleh R., Jibreel N., Younis A. Capacity analysis of index modulation multiple access system // Journal of Communications and Networks, vol. 25, no. 6, pp. 711-721, Dec. 2023, doi: 10.23919/JCN.2023.000048.

COMBINING OF MULTI-ANTENNA MIMO SYSTEMS AND NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS SCMA

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

Abstract

One of the fundamental technologies underlying modern standards is the technology of multi-antenna MIMO systems. Obviously, the rapid development of MIMO technology has led to its inclusion as a candidate technology in new 6th generation (6G) systems. In conditions of limited frequency resources, the NOMA non-orthogonal multiple access technology and its varieties, which is also a candidate technology for inclusion in future global standards of wireless communication systems, have received great interest from researchers and developers. The purpose of this article is to analyze the options for combining MIMO technology with one of the most promising varieties of NOMA technology – non-orthogonal multiple access technology based on sparse SCMA sequences.

Keywords: combining, non-orthogonal multiple access, NOMA, SCMA, multiple antenna systems, MIMO.

References

1. M.G. Bakulin, T.B.K. Ben Rezheb, V.B. Krejndelin, Yu.B. Mironov, D.Yu. Pankratov, A.E. Smirnov, Mobil'naya svyaz' na poroge 6G," Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2024. 248 p. (in Russian)
2. M.G. Bakulin, T.B.K. Ben Rezheb, V.B. Krejndelin, D.Yu. Pankratov, A.E. Smirnov, "Neortogonal'nyj mnozhestvennyj dostup (NOMA) kak osnova sistem svyazi 5G i 6G," Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2024. 264 p. (in Russian)
3. M. Bakulin, T. Ben Rejeb, V. Krejndelin, D. Pankratov, and A. Smirnov, "Problems of Combining NOMA with MIMO," *2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/TIRVED58506.2023.10332741.
4. Y. Yang, S. Fang, X. Zeng, H. Wang and R. Huang, "A Novel Framework in MIMO Downlink Transmission with Non-orthogonal Multiple Access," *2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, Chengdu, China, 2019, pp. 2060-2064, doi: 10.1109/ICCC47050.2019.9064452.
5. J. Wu, C. Cheng, Q.Z. Technology, H.U. Technology, R. University, "CIAMA: A Multiple Access Scheme with High Diversity and Multiplexing Gains for Next-gen Wireless Networks," 2023.
6. 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.
7. Zhu Cuitao et al. "Two Stage Detection for Uplink Massive MIMO MU-SCMA Systems," *International ICST Conference on Communications and Networking in China*, 2018.
8. Z. Pan, J. Luo, J. Lei, L. Wen and C. Tang, "Uplink Spatial Modulation SCMA System," *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 1, pp. 184-187, Jan. 2019, doi: 10.1109/LCOMM.2018.2882813.
9. M. Bakulin, T. Ben Rejeb, V. Krejndelin, D. Pankratov and A. Smirnov, "Uplink NOMA-MIMO Systems with Rayleigh Power Distribution", *2022 Sensors* 22, no. 11: 4002. [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/S22114002](https://doi.org/10.3390/S22114002)
10. Y. -M. Chen, Y. -C. Hsu, M. -C. Wu, R. Singh and Y. -C. Chang, "On Near-Optimal Codebook and Receiver Designs for MIMO-SCMA Schemes," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 12, pp. 10724-10738, Dec. 2022, doi: 10.1109/TWC.2022.3186973
11. H. Cheng, C. Zhang, Y. Huang and L. Yang, "Efficient Message Passing Receivers for Downlink MIMO-SCMA Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 5, pp. 5073-5086, May 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3151936.
12. A. Mekhiche, A. M. Cipriano and C. Poulliat, "SCMA Detection in MIMO Systems with Low Complexity EP using QRD," *2023 12th International Symposium on Topics in Coding (ISTC)*, Brest, France, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISTC57237.2023.10273533.
13. W. Meng, Y. Gu, J. Bao, Z. Lian, Z. Kong and W. Yin, "Spatially Modulated Sparse Code Multiple Access in Uplink Mine Communications," *2022 13th Asian Control Conference (ASCC)*, Jeju, Korea, Republic of, 2022, pp. 1660-1664, doi: 10.23919/ASCC56756.2022.9828286.
14. S. Chaturvedi, Z. Liu, V. A. Bohara, A. Srivastava and P. Xiao, "A Tutorial on Decoding Techniques of Sparse Code Multiple Access," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 58503-58524, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3178127.
15. R. Mesleh, N. Jibreel and A. Younis, "Capacity analysis of index modulation multiple access system," *Journal of Communications and Networks*, vol. 25, no. 6, pp. 711-721, Dec. 2023, doi: 10.23919/JCN.2023.000048.