

УДК 621.391

Шифр специальности ВАК: 2.2.13

А.С. Шинкевич, Д.А. Покаместов, Я.В. Крюков,
Г.Н. Шалин, С.А. Еремеев, Д.Е. Ильинский

Множественный доступ с разделением по скорости: современное состояние и перспективы развития

Актуальность. Множественный доступ с разделением по скорости (Rate Splitting Multiple Access, RSMA) рассматривается как перспективный метод организации множественного доступа в сетях сотовой связи, поскольку современные методы имеют ограничения при росте требований к спектральной эффективности и качеству обслуживания. **Цель исследования.** Целью исследования является обзор и анализ вышедших к настоящему времени работ по тематике RSMA, а также оценка эффективности RSMA в соответствии со схемами прекодирования, предложенными Европейским институтом телекоммуникационных стандартов. **Методы.** В работе использованы обзор и сравнительный анализ современных исследований, анализ математической модели системы с RSMA, численное моделирование, рассмотрение лабораторных экспериментов и имитационное моделирование. **Научная новизна.** Научная новизна заключается в систематизации актуальных направлений исследований в области RSMA и дополнительной оценке эффективности RSMA для схем прекодирования, предложенных европейским институтом телекоммуникационных стандартов. **Результаты.** Описаны базовые принципы работы RSMA, приведена математическая модель системы, проанализированы современные исследования и выделены перспективные направления, включая полнодуплексную связь, интеграцию связи и сенсорики, реконфигурируемые интеллектуальные поверхности, бессотовую архитектуру и массивные антенные решетки. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при анализе и выборе методов множественного доступа, а также при моделировании и проектировании перспективных систем сотовой связи с применением RSMA. **Ключевые слова:** 6G, многоантенные системы, множественный доступ, OMA, SDMA, NOMA, RSMA, управление интерференцией.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-1-53-67

Введение

Увеличение количества пользователей систем сотовой связи, а также появление новых услуг и сервисов приводит к увеличению объема передаваемого трафика. Следствием этого является качественный рост требований, предъявляемых к системам связи. Одной из ключевых технологий, определяющих основные характеристики систем связи (спектральная эффективность (СЭ), скорость передачи, помехоустойчивость, задержка и т.д.), является множественный доступ (Multiple Access, MA) [1]. Методы множественного доступа определяют принципы распределения ресурсов сети (время, частота, мощность, пространственные потоки, код) между пользователями [1]. Рассмотрим развитие систем сотовой связи и, в частности, множественного доступа.

Первое поколение сотовых сетей (1G) было ориентировано исключительно на аналоговую голосовую связь. Множественный доступ был организован в частотном домене (Frequency Division MA, FDMA). В данной технологии каждому пользователю выделялся свой частотный канал [2]. Во втором поколении (2G) произошел переход от аналоговой связи к цифровой. Следствием этого стало улучшение качества связи и появление новых сервисов, таких как передача текстовых и медиасообщений и мобильного интернета в поздних версиях стандарта [2]. Совместно с FDMA в 2G использовался множественный доступ во временном домене (Time Division MA, TDMA). В одном частотном канале отдельному пользователю выделялись временные интервалы (слоты), в которых

он обслуживался. Это позволило существенно увеличить скорость передачи и количество одновременно обслуживаемых пользователей [2].

В 3G использовался множественный доступ в кодовом домене (Code Division MA, CDMA). При его использовании все пользователи обслуживаются в одном частотно-временном ресурсе (ЧВР), а их разделение происходит благодаря расширению спектра с использованием набора ортогональных кодов [2]. Применение CDMA позволило улучшить качество связи ввиду хорошей помехоустойчивости и возможности перехода к «мягкому» хэндоверу (процесс переключения абонентского устройства между базовыми станциями (БС) в процессе перемещения). Также благодаря использованию всеми пользователями одного ЧВР значительно увеличилась емкость сети (количество одновременных подключений) и появились услуги, использующие широкополосный доступ [2].

В четвертом поколении сетей сотовой связи (4G) началось активное использование многоантенной связи (Multiple Input Multiple Output, MIMO). Основой физического уровня 4G стал множественный доступ с разделением по ортогональным поднесущим (Orthogonal Frequency Division MA, OFDMA) [2]. В отличие от предыдущих методов, OFDMA обеспечивает более гибкое распределение частотно-временных ресурсов между множеством пользователей, что приводит к улучшению качества связи. Общая полоса пропускания разбивается на множество ортогональных поднесущих, сгруппированных в ресурсные

блоки. Эти блоки динамически распределяются между пользователями в зависимости от качества канала и требуемых характеристик обслуживания. Применение OFDMA совместно с MIMO позволило существенно повысить качество связи, ввиду высокой устойчивости к сложным условиям среды распространения и динамическому распределению ресурсов сети [2].

В 5G произошел переход от однопользовательского MIMO к многопользовательскому (Multiuser MIMO, MU-MIMO) и появилась технология формирования луча (beamforming), что позволило совместно с OFDMA использовать множественный доступ в пространственном домене (Space Division MA, SDMA) [2]. Благодаря технологии формирования луча и использованию многоэлементных антенных решеток (massive MIMO, mMIMO) появилась возможность формирования узких лучей, предназначенных отдельному пользователю (или группе пользователей) [2]. Все это привело к кратному улучшению основных характеристик систем связи и появлению новых сервисов.

Сети 5G уже продемонстрировали значительный прогресс по сравнению с предыдущими поколениями, однако ожидается, что будущие сети шестого поколения (6G) достигнут еще более впечатляющих показателей. Ранее был проведен обширный обзор работ по тематике систем связи шестого поколения, представленный в [3]. На основании этих работ были сформированы сводные требования к основным характеристикам (спектральная эффективность, скорость передачи, помехоустойчивость и др.) будущего поколения систем связи, также приведенные в [3]. Эти требования подразумевают существенный прирост спектральной эффективности, скорости передачи и помехоустойчивости, что обусловлено развитием сервисов 5G. В то же время существующие схемы, основанные на ортогональном множественном доступе (Orthogonal MA, OMA), начинают всё отчетливее демонстрировать свои недостатки [4].

Одним из основных недостатков OMA является максимальное количество обслуживаемых пользователей, которое ограничено числом ортогональных ресурсов сети. Также стоит отметить, что увеличение количества устройств интернета вещей (Internet of Things, IoT) уменьшает общую спектральную эффективность [4]. Это обусловлено тем, что всем пользователям выделяется целый ресурсный блок, даже если его емкость для отдельного пользователя избыточна. Отдельно стоит отметить ограничения SDMA, в основе которого лежат алгоритмы многопользовательского прекодирования, описанные в [5–10]. Их производительность чувствительна к неточностям оценки канала, которых не избежать в реальных системах по ряду причин, а также условиям среды распространения (наличие пространственной корреляции, прямой видимости и др.) [10]. Еще одной существенной проблемой является подавление межпользовательской интерференции. Это возможно сделать только в незагруженных системах, т.е. когда число

пользователей не превышает количество передающих антенн [4]. Кроме того, возникает ряд сложностей при планировании (scheduling), так как для эффективной работы пользователи должны выбираться из условия ортогональности их каналов, иначе производительность системы деградирует [4, 10]. По этим причинам в научном сообществе обсуждаются новые подходы к организации множественного доступа.

Прямой альтернативой OMA является класс методов неортогонального множественного доступа (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA). При их использовании все пользователи обслуживаются в одном частотно-временном ресурсе, при этом каждому выделяется своя доля парциальной мощности. Сигналы, предназначенные другим пользователям, являются интерференцией, с которой борются с помощью последовательного подавления помех (Successive Interference Cancellation, SIC). В работах [11–19] показано, что методы NOMA эффективны в традиционных одноантенных системах (Single Input Single Output, SISO). Однако в последнее время вышел ряд работ, посвященных работе NOMA в системах MU-MIMO. В них показано, что NOMA малоэффективен в большинстве реальных сценариев многоантенной связи [20–22], это обусловлено принципиально разными подходами борьбы с интерференцией.

По причине наличия вышеописанных проблем в настоящее время в научном сообществе обсуждается новый подход к организации множественного доступа – разделение по скорости (Rate Splitting Multiple Access, RSMA) [1, 4, 21–29]. В основе работы RSMA лежат принципы OMA, NOMA и многопользовательского вещания (multicasting). Благодаря объединению подходов и перераспределению ресурсов сети появляется возможность гибкого управления интерференцией, что позволяет улучшить качество связи. Все это делает RSMA перспективной технологией-кандидатом на внедрение в будущие стандарты беспроводной связи. Подробное описание принципов работы RSMA приводится во втором разделе статьи. Несмотря на обширный интерес к RSMA, последние обзорные публикации, посвященные общим принципам работы и ключевым проблемам RSMA, вышли в 2022–2023 гг. [4, 23]. С тех пор исследования существенно продвинулись и вышел ряд важных фундаментальных и экспериментальных работ. Последние обзорные работы направлены на отдельные сценарии использования RSMA. Например, взаимодействие с реконфигурируемыми интеллектуальными поверхностями (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) [32], интеграции связи и сенсорики (Integrated Sensing And Communication, ISAC) [34].

Тем не менее обзорных публикаций, охватывающих последние достижения в области RSMA, недостаточно, особенно в русскоязычной научно-технической литературе, где тематика RSMA раскрыта слабо. В связи с этим цель настоящей работы – обобщить и систематизировать последние результаты исследований в области систем связи с разделением по скорости и выделить актуальные направления исследований.

В первом разделе представлена математическая модель базовой схемы RSMA и изложены общие принципы её функционирования. Во втором разделе обобщены результаты экспериментальных исследований – численного моделирования и лабораторных экспериментов, а также рассмотрены перспективы стандартизации. В третьем разделе сформулированы открытые задачи развития RSMA и обсуждается её интеграция с другими перспективными технологиями беспроводной связи. В четвертом разделе приведены полученные в ходе моделирования сравнительные результаты, показывающие преимущество RSMA. Пятый раздел завершает работу.

Множественный доступ с разделением по скорости

Ключевая идея RSMA – разделение передаваемой информации на общую часть, предназначенную для всех пользователей, и приватные части, индивидуальные для каждого абонента. Сигналы общего и частных каналов передаются одновременно посредством суперпозиционного кодирования. Благодаря такому подходу и адаптивному распределению ресурсов между каналами появляется возможность гибкого управления интерференцией. При этом крайними режимами работы RSMA выступают SDMA (общий канал отсутствует) и multicasting (частные каналы отсутствуют). Такой подход обеспечивает эффективную организацию множественного доступа в условиях различных пользовательских сценариев и уровней помех, а также гарантирует плавный переход между существующими схемами множественного доступа [4, 21–31].

Идея RSMA берет свое начало с работ по теории информации 70-х гг. прошлого века. В работах [35–38] была доказана её эффективность в SISO-системах по сравнению с классическими схемами множественного доступа с точки зрения степеней свободы и области достижимых скоростей. Новый виток развития RSMA получила во второй половине прошлого десятилетия. Так, в работе [21] была впервые предложена схема RSMA для MIMO-систем, а в [22] доказано превосходство RSMA над NOMA и SDMA.

Стоит упомянуть, что существует множество схем организации разделения по скорости [23–31], однако в данном разделе описывается только базовая

архитектура 1-Layer RS с применением линейного прекодирования и одним уровнем SIC на приемной стороне. На рис. 1 представлена классификация схем RSMA. На рис. 2 приведена структурная схема системы связи с одним передатчиком и K приемниками, мультиплексируемыми по методу RSMA [4].

Примем следующее упрощение: у каждого из K приемников 1 антенна. Передатчик оборудован M антеннами. Передача ведется на одной поднесущей, но система может быть расширена на случай множества поднесущих путем расширения всех векторов в частотной области.

На вход передатчика поступают битовые сообщения $\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K$, предназначенные K абонентам. В блоке «RS-разделитель» происходит разделение сообщения $\mathbf{w}_k$ на приватную $\mathbf{w}_{p,k}$ и общую $\mathbf{w}_{c,k}$ части, так, что $\mathbf{w}_k = [\mathbf{w}_{p,k} \mathbf{w}_{c,k}]$, $k = 1, \dots, K$. В блоке «объединение» общие части K абонентов объединяются в одно сообщение $\mathbf{w}_c = [\mathbf{w}_{c,1} \dots \mathbf{w}_{c,K}]$ [4].

В блоке «RS-кодер» происходит отображение сообщений в QAM-символы. Примем следующее упрощение: пусть размеры векторов $\mathbf{w}_c$ и $\mathbf{w}_{p,k}$, $k = 1, \dots, K$ подобраны таким образом, чтобы каждый из векторов отображался в один символ модуляции, т.е. $\mathbf{w}_c \rightarrow s_c \in \mathbf{a}_c$, $\mathbf{w}_{p,k} \rightarrow s_{p,k} \in \mathbf{a}_p$, где $\mathbf{a}_c$ и $\mathbf{a}_p$ – множества, содержащие всевозможные символы модуляции (например, алфавиты M-QAM) для общего и частных каналов. Каждый элемент множества представляет собой комплексное число (далее множество комплексных чисел обозначается как $\mathbf{C}$).

В общем виде порядок модуляции приватного и общего канала может не совпадать. В векторной форме $\mathbf{s}_p = [s_{p,1}, \dots, s_{p,K}] \in \mathbf{a}_p^{K \times 1}$ [4].

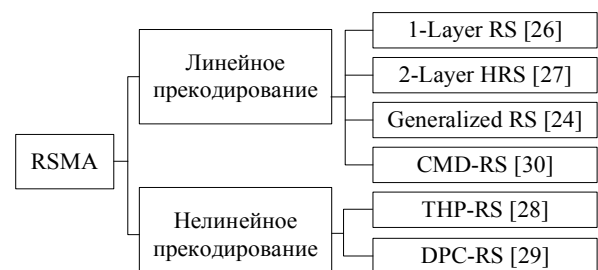


Рис. 1. Классификация схем RSMA

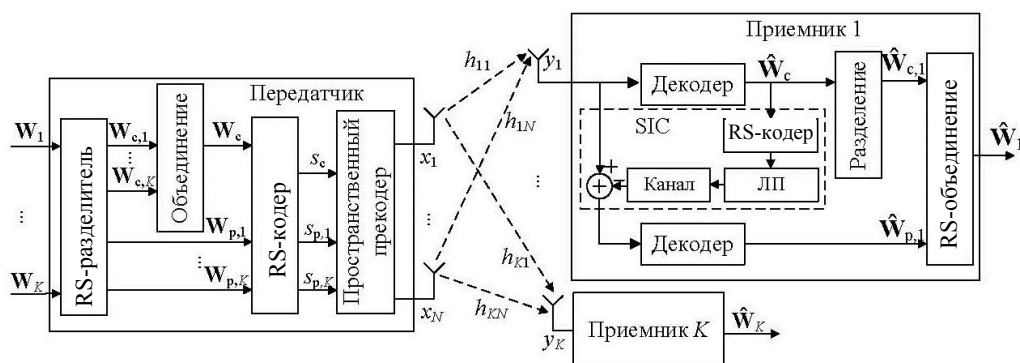


Рис. 2. Структурная схема системы связи с RSMA

Сигнал на выходе передатчика будет описываться следующим выражением:

$$\mathbf{X} = \sqrt{P_c} \mathbf{v}_c s_c + \sqrt{P_p} \sum_{k=1}^K \mathbf{v}_{p,k} s_{p,k} = \sqrt{P_c} \mathbf{v}_c s_c + \sqrt{P_p} \mathbf{V}_p \mathbf{s}_p,$$

где $\mathbf{v}_{p,k} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ – вектор прекодирования приватного канала для k -го пользователя, общая матрица прекодирования приватных каналов описывается как $\mathbf{V}_p = [\mathbf{v}_{p,1}, \dots, \mathbf{v}_{p,K}] \in \mathbb{C}^{M \times K}$, $\mathbf{v}_c \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ – вектор прекодирования общего канала, а P_c и P_p – доли мощности общего и приватного канала соответственно. Алгоритмы прекодирования приватных каналов широко известны, они применяются в многопользовательских системах MIMO [5–10].

При этом должны выполняться следующие условия:

$$\|\mathbf{v}_c\|_F = \|\mathbf{V}_p\|_F = 1, \quad P_c + P_p \leq P_{\max},$$

где $P_{\max}$ – максимальная мощность излучения, $\|\cdot\|_F$ – норма Фробениуса [4].

Мультипликативные помехи описываются канальной матрицей $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{K \times M}$, каждый элемент которой h_{ij} – коэффициент передачи между i -й приемной и j -й передающей антенной. Также в канале присутствуют аддитивные шумы. Примем допущение, что мощность шума в каждом канале одинакова и равна σ^2 , тогда сигнал на входе k -го приемника будет описываться следующим выражением:

$$y_k = \mathbf{h}_k \mathbf{X} + n = \mathbf{h}_k (\sqrt{P_c} \mathbf{v}_c s_c) + \mathbf{h}_k (\sqrt{P_p} \mathbf{V}_p \mathbf{s}_p) + n,$$

где $n \sim CN(0, \sigma^2)$ – отсчеты белого гауссова шума, $\mathbf{h}_k$ – k -я строка канальной матрицы $\mathbf{H}$ [4].

Для RSMA СЭ общего канала для k -го пользователя будет определяться следующим выражением:

$$R_{c,k} = \log_2 \left(1 + \frac{P_c |\mathbf{h}_k \mathbf{v}_c|^2}{\sum_{i=1}^K P_p |\mathbf{h}_k \mathbf{v}_{p,i}|^2 + \sigma^2} \right),$$

при этом, чтобы гарантировать успешную демодуляцию сигнала s_c всеми пользователями, скорость не должна превышать $R_c = \min \{R_{c,1}, \dots, R_{c,K}\}$ [4]. СЭ приватного канала будет определяться следующим выражением [4]:

$$R_{p,k} = \log_2 \left(1 + \frac{P_p |\mathbf{h}_k \mathbf{v}_{p,k}|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K P_p |\mathbf{h}_k \mathbf{v}_{p,i}|^2 + \sigma^2} \right).$$

Суммарная СЭ системы будет описывается следующим выражением [4]:

$$R = \min \{R_{c,k}\} + \sum_{k=1}^K R_{p,k}.$$

Современное состояние RSMA и перспективы внедрения

Численное моделирование. Развитие концепции IoT, а в более широком смысле – интернета всего

(Internet of Everything, IoE) [38] приводит к стремительному росту числа подключённых устройств, большая часть которых обладает ограниченными энергетическими ресурсами. Датчики, носимая электроника и другие элементы среды IoE требуют минимального энергопотребления при сохранении надёжной связи. В этих условиях энергетическая эффективность (ЭЭ) становится критически важным параметром при проектировании современных беспроводных систем и является ключевым фактором в реализации устойчивых, масштабируемых и интеллектуальных сетей связи будущих поколений.

В работах [39–42] проводится анализ задачи максимизации ЭЭ и сравнение RSMA с SDMA и NOMA. Авторами работ был предложен ряд алгоритмов формирования прекодера общего канала и распределения мощности для максимизации ЭЭ. Результаты показывают, что энергетическая эффективность RSMA превосходит SDMA и NOMA в условиях идеальной и неидеальной оценки канала. Отдельно стоит выделить работу [43], в которой рассматривается RSMA в полнодуплексном режиме (Full-Duplex, FD). Авторами рассмотрена задача совместной максимизации спектральной и энергетической эффективности и предложен алгоритм для ее решения. Результаты моделирования показывают, что FD-RSMA обеспечивает лучшие значения ЭЭ в сравнении с FD-SDMA, FD-NOMA (выигрыш достигает 76 и 17% соответственно) и RSMA при работе в полудуплексном режиме.

В работе [44] впервые была реализована архитектура физического уровня для систем связи с RSMA. Авторы предложили базовую схему передатчика и приёмника, включающую полярное кодирование, квадратурную модуляцию, а также эквалайзирование и алгоритм SIC-декодирования на приёмной стороне. Отдельное внимание было уделено механизму адаптивной модуляции и кодирования, в котором, в отличие от классических решений, не используется заранее определённая таблица сигнально-кодовых конструкций (СКК). Вместо этого параметры подбираются на основе оценки средних скоростей передачи и с учётом гибкости полярных кодов. Моделирование на канальном уровне показало, что RSMA демонстрирует превосходство над SDMA и NOMA по суммарной спектральной эффективности во всём диапазоне отношений сигнал/шум (ОСШ), особенно в области высоких значений ОСШ (25 дБ и выше).

В этих условиях RSMA обеспечивает производительность, превышающую теоретические пределы, достижимые для SDMA и NOMA в рассмотренных сценариях. Кроме того, RSMA не склонна к переходу в однопользовательский режим в отличие от SDMA и сохраняет честное распределение ресурсов между пользователями. Также было показано, что при наличии ограничений по качеству обслуживания (например, минимальная скорость передачи на пользователя) SDMA зачастую оказывается неприменимой, тогда как RSMA продолжает функционировать стабильно. Таким образом, предложенная реализация

физического уровня продемонстрировала, что RSMA не только теоретически универсальна, но и практически реализуема, превосходя альтернативные схемы как в условиях идеального канала, так и при наличии ошибок оценки.

В сетях 4G и 5G активно используют антенные решетки с кросс-поляризацией ($\pm 45^\circ$ к горизонтальной оси) [44, 46]. В сетях 6G планируется переход от mMIMO к Extremely Large-Scale MIMO (XL-MIMO), что предполагает использование решеток с сотнями и даже тысячами антенных элементов [47]. Кросс-поляризация позволяет сделать такие решетки компактнее, дешевле, а также улучшить качество связи [48]. Это делает актуальным вопрос эффективности RSMA в системах с такой антенной конфигурацией. В работе [49] было предложено 3 схемы работы RSMA в таких системах:

- мультиплексирование в домене поляризации, в этой схеме общий и приватные сигналы передаются с разной поляризацией, что позволяет проектировать приемники без использования SIC;
- поляризационное разнесение, в котором на антеннах с разной поляризацией передаются копии сигналов общего и приватных каналов, что повышает общую производительность системы;
- поляризационное мультиплексирование с использованием SIC, в данной схеме последовательное подавление помех используется отдельно для каждой поляризации, что позволяет значительно увеличить качество связи в условиях отсутствия ошибок компенсации.

Работа показала перспективы использования RSMA в таких конфигурациях.

Прототипы и экспериментальные исследования.

Бурный интерес к RSMA начался в конце прошлого десятилетия, в настоящее время данная технология еще не применяется в реальных системах связи, так как не решен ряд теоретических и практических вопросов. Однако первые лабораторные эксперименты уже проводятся. Исследовательские группы из Имперского колледжа Лондона [50] и VIAVI Solutions [51] независимо создали два прототипа системы связи с RSMA на базе программно-определяемых радиосистем.

Так, в работе [50] проводится экспериментальное сравнение RSMA, NOMA и SDMA, все методы были реализованы на программно-определяемых радиосистемах. В эксперименте использовался предложенный авторами формат кадра, а также 10 СКК, в качестве помехоустойчивого кода использовались полярные коды. В работе было рассмотрено 6 сценариев, в каждом из которых передатчик, оборудованный двумя антеннами, обслуживает двух одноантенных абонентов. Для каждого сценария эксперимент проводился при квантованной и неквантованной информации о состоянии канала. Основываясь на результатах, можно сделать вывод, что в некоторых сценариях производительность RSMA сравнима с NOMA или SDMA (крайние режимы работы RSMA),

а в некоторых существенно увеличивается (выигрыш в пропускной способности составляет до 31%).

В работе [52] рассмотрен сценарий многогрупповой многоадресной рассылки – частный случай многопользовательской беспроводной связи, при которой многоантенный передатчик совместно взаимодействует с несколькими группами пользователей одновременно. В каждой группе может быть один или несколько пользователей. В данной работе рассматривается производительность «перегруженной» (overloaded) системы, т.е. когда количество одноантенных пользователей превышает количество передающих антенн. В работе было рассмотрено 9 сценариев, в каждом из которых передатчик, оборудованный двумя антеннами, обслуживает две группы абонентов, в каждой из которых два одноантенных приемника. Различия между сценариями характеризуются распределением межгрупповых затуханий и межгрупповой пространственной корреляции, которые зависят от расположения обслуживаемых групп, положение передатчика не изменяется. Результаты показывают, что RSMA в отличие от SDMA и NOMA обеспечивает «честное» распределение ресурсов во всех сценариях, при этом в 8 сценариях RSMA также показывает выигрыш в суммарной пропускной способности.

В работе [53] представлен первый экспериментальный прототип RSMA для интегрированных систем связи и радиолокации (ISAC). Авторы исследуют, как распределение ресурсов между передачей данных и радиолокационными функциями влияет на эффективность системы, сравнивая RSMA и SDMA в сценариях с использованием и без использования выделенного радарного сигнала. Результаты экспериментов показали, что RSMA без выделенного сигнала обеспечивает более высокую суммарную пропускную способность, чем SDMA с выделенным сигналом, при этом сохраняется сопоставимое качество радиолокационных измерений. Отмечается, что RSMA демонстрирует гибкость в управлении интерференцией и может давать значительный прирост производительности, однако при недостаточной точности обработки сигналов его эффективность может снижаться.

Перспективы внедрения. В январе 2025 г. Европейский институт телекоммуникационных стандартов (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) объявил о создании группы по разработке отраслевых спецификаций, посвященной методам множественного доступа. Новая рабочая группа сосредоточена на исследовании и сравнении техник множественного доступа, включая OMA, SDMA, NOMA и RSMA, с точки зрения спектральной и энергетической эффективности, задержки и честности распределения ресурсов. В сферу её задач входит изучение сценариев развертывания, исследование процедур физического уровня, а также разработка прототипов и проведение полевых испытаний. Итоговые отчеты группы будут учитываться в деятельности 3GPP и других организаций при формировании стандартов 6G, что подкрепляет актуальность RSMA как одного

из ключевых кандидатов для будущих поколений беспроводных систем.

В январе 2026 г. ETSI опубликовал отчет [54], в нём рассматриваются базовые алгоритмы OMA, SDMA, NOMA и RSMA, а также используются каналные модели, ориентированные на типовые сценарии развертывания. Вместе с тем в отчёте не проводится детальный анализ режимов, в которых преимущества RSMA проявляются наиболее выражено. В частности, отдельно не рассматриваются совместное влияние пространственной корреляции каналов пользователей и различия между ними по коэффициенту передачи канала. Поэтому в настоящей работе выполнено дополнительное моделирование, основанное на близкой к ETSI модели, но направленное на выявление указанных зависимостей, оно представлено в пятом разделе.

Актуальные проблемы

Прекодирование общего канала. Одной из ключевых нерешённых задач в развитии RSMA остаётся разработка эффективных алгоритмов формирования прекодеров общего канала. На текущий момент большинство представленных в литературе решений основано на методах численной оптимизации, что ставит под сомнение их применимость в реальных системах с большим количеством антенн из-за высокой вычислительной сложности.

В ряде работ [55–57] для этих целей применяются методы выпуклой оптимизации. В частности, в [58] сделано предположение о том, что для двух пользователей оптимальное решение заключается в выравнивании коэффициентов передачи общего канала, и предложен алгоритм масштабирования, основанный на аппроксимации метода множителей Лагранжа. Однако данное предположение не всегда обеспечивает глобальный максимум, так как не учитывает поведение всего семейства функций. Авторы [58] предложили алгоритм, основанный на градиентном спуске, способный работать в системах с произвольной антенной конфигурацией.

В работе [59] подробно рассматривается применимость методов дробного программирования к задачам оптимизации в телекоммуникациях, в частности, к задачам, где целевая функция имеет дробно-рациональную структуру (например, при анализе энергетической и спектральной эффективности). Развивая эти идеи, авторы [60] формулируют задачу проектирования прекодеров общего канала как задачу дробного программирования, что позволяет использовать развитый математический аппарат для её решения. Такой подход обеспечивает более гибкую постановку задачи и открывает возможности для нахождения решений, близких к оптимальным.

В [61] предложен алгоритм оптимизации прекодеров, также основанный на численной оптимизации. Однако сами авторы указывают, что при большом числе антенн его применение в реальных системах затруднено из-за неприемлемой вычислительной сложности. При этом численные методы в принципе подвержены проблеме локальных максимумов, что

делает результат сильно зависимым от выбора начальных условий. Для произвольных антенных конфигураций в литературе часто используются упрощённые решения на основе взвешенного согласованного формирования луча [26, 62]. Несмотря на низкую вычислительную сложность, такие алгоритмы далеки от оптимальности.

Существующие решения всё ещё не позволяют достичь компромисса между эффективностью и практической реализуемостью. Высокая вычислительная сложность и ограниченная применимость предложенных алгоритмов создают серьёзные препятствия для их внедрения в реальные системы. Поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку методов, которые при сохранении высокой эффективности смогут обеспечивать масштабируемость и устойчивость работы в условиях произвольных антенных конфигураций и неполной информации о канале.

Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности. В последние годы активно обсуждается концепция реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (RIS) [3, 63, 64]. RIS – это двумерная поверхность, состоящая из большого числа пассивных настраиваемых элементов, которые могут управлять фазой отражённого сигнала. В отличие от традиционных активных ретрансляторов, RIS практически не потребляет энергию, так как элементы реализуются на базе простых устройств (например, p-i-n-диодов или варикапов, подключенных к антеннам), и при этом RIS позволяет адаптивно изменять радиосреду: усиливать полезный сигнал, подавлять интерференцию и улучшать покрытие. Благодаря низкой стоимости, энергоэффективности и гибкости управления каналом, RIS рассматривается как ключевая технология 6G, позволяющая создавать «умные» среды распространения и значительно повышать спектральную и энергетическую эффективность беспроводных сетей [3, 63, 64].

В работах [65–70] рассмотрена возможность применения RIS совместно с RSMA. Так, в работе [65] были обобщены различные сценарии и модели каналов RSMA-RIS. Кроме того, были описаны возможные критерии оптимизации и было предложено решение для максимизации взвешенной суммарной скорости. В работах [67–69] показано, что RSMA в связке с RIS обеспечивает выигрыш в спектральной эффективности относительно других методов МД и RSMA без RIS в условиях идеальной и неидеальной оценки канала. В работах [70, 71] показано, что использование RIS позволяет уменьшить вычислительную сложность и упростить конструкцию приемопередаточного оборудования.

Несмотря на достигнутые результаты, вопрос совместного проектирования прекодеров и формирования диаграммы направленности RIS остается открытым. Также в литературе слабо освещены вопросы работы восходящей связи RIS-RSMA и её интеграции с другими технологиями, например, ISAC и беспроводной передачей энергии.

Бессотовая архитектура. В условиях стремительного роста числа подключений и освоения новых частотных диапазонов ограничения сотовых сетей проявляются всё острее. Снижение качества связи на границах сот, проблемы масштабирования и неравномерное использование ресурсов затрудняют достижение высокой спектральной и энергетической эффективности. Это стимулируют интерес к новым архитектурным решениям, среди которых одной из наиболее перспективных считается бессотовая (Cell-Free, CF) архитектура [3, 72, 73]. В такой архитектуре множество процессорных блоков (CPUs) подключены к ядру сети. К каждому CPU может быть подключено несколько точек доступа (APs), при этом несколько APs может одновременно обслуживать одного пользователя (UE). Топология CF-сетей представлена на рис. 3.

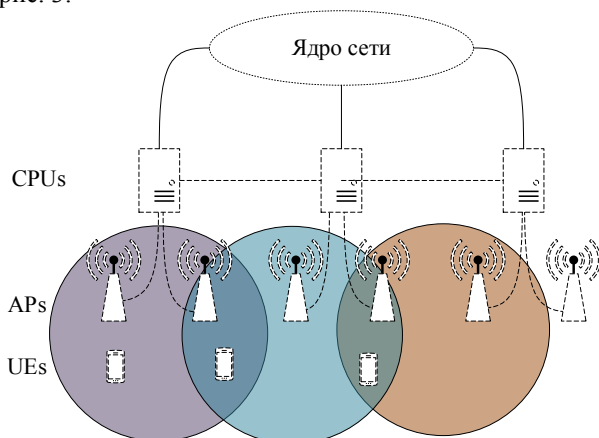


Рис. 3. Топология CF-сетей

В работах [72–76] обсуждается применение технологии RSMA в сетях с архитектурой Cell-Free. Так, в работе [72] проводится оптимизация прекодирования и распределения мощности для нисходящего канала, было рассмотрено влияние расположения точек доступа на производительность системы. В [74] рассматривается задача выбора точек доступа для максимизации минимальной скорости передачи. Для ее решения был предложен алгоритм глубокого обучения. Далее анализируется влияние ошибок оценки канала на производительность систем CF-RSMA и предлагается архитектура для устойчивой связи.

Авторы [75] рассматривают сценарий высокондежной связи с низкими задержками и предлагают алгоритм для максимизации минимальной скорости передачи.

Основываясь на результатах работ, можно сказать, что в большинстве рассмотренных сценариев RSMA превосходит традиционные системы CF-mMIMO и сотовую архитектуру. Но несмотря на большой интерес, работы по данной тематике сугубо теоретические, и ряд задач остается открытым. К ним можно отнести разработку физического и канального уровня (алгоритмы синхронизации и оценки канала, организация обратной связи и разработка схем адаптивной модуляции и кодирования). Все эти задачи должны согласованно решаться на множестве точек

доступа в режиме реального времени, что требует разработки вычислительно-эффективных алгоритмов.

Эффективность схемы RSMA, предложенной ETSI

В данном разделе описано выполненное авторами статьи имитационное моделирование RSMA с целью эффективности в соответствии с предложенными в [54] схемами прекодирования. В качестве базового для сравнения метода был выбран SDMA, поскольку он наиболее близок к RSMA по принципам организации пространственного разделения пользователей: оба подхода основаны на многопользовательском прекодировании и обслуживают абонентов в одном частотно-временном ресурсе. При этом RSMA может рассматриваться как развитие SDMA за счёт введения дополнительного общего потока.

Рассматривается двухпользовательский MISO-канал с линейной антенной решёткой из $M = 4$ передающих антенн. Канальная матрица задаётся как $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2]$, где $\mathbf{h}_1$ и $\mathbf{h}_2$ – канальные векторы пользователей. В соответствии с ETSI, векторы задаются следующим образом [54]:

$$\mathbf{h}_1 = \frac{1}{\sqrt{M}} [1, \dots, 1]^T, \quad \mathbf{h}_2 = \frac{\gamma}{\sqrt{M}} [1, e^{j\theta}, \dots, e^{j(M-1)\theta}]^T.$$

Здесь θ задает угловое разнесение, а γ определяет дисбаланс пользовательских каналов, причем $\|\mathbf{h}_1\|/\|\mathbf{h}_2\| = \gamma$. Пространственная корреляция определяется по следующей формуле [54]:

$$\rho = \frac{|\mathbf{h}_1^H \mathbf{h}_2|^2}{\|\mathbf{h}_1\|^2 \|\mathbf{h}_2\|^2} = \left| \frac{\sin\left(M \frac{\theta}{2}\right)}{M \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right|^2.$$

Такая модель позволяет независимо задавать корреляцию каналов и дисбаланс их коэффициентов передачи. В соответствии с ETSI, для SDMA и частных потоков RSMA использовалось MMSE-прекодирование. Прекодеры рассчитывались по нормированной канальной матрице [54]

$$\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{h}_1}{\|\mathbf{h}_1\|}, \frac{\mathbf{h}_2}{\|\mathbf{h}_2\|} \end{bmatrix}.$$

Схема SDMA подразумевает формирование только частных пользовательских потоков (доля мощности общего канала $t = 0$). Матрица прекодирования задавалась следующим образом [54]:

$$\mathbf{V}_p = \tilde{\mathbf{H}}^H \left(\tilde{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{H}}^H + \frac{K\sigma^2}{P} \mathbf{I} \right)^{-1}.$$

После нормировки столбцов матрицы мощность распределялась между пользователями равномерно: каждому пользователю выделялась мощность P/K .

Если $t \in [0, 1]$ – доля мощности общего потока, $P_c = tP$, то на частные потоки суммарно выделяется $P_p = (1 - t)P$ на каждый частный поток $(1 - t)P/K$. Для частных потоков использовалась аналогичная SDMA-матрица прекодирования, но с параметром регуляризации, рассчитанным по мощности частных каналов. Прекодер общего потока в RSMA выбирался

по доминирующему правому сингулярному вектору нормированной канальной матрицы.

Первый рассмотренный сценарий соответствовал стратегии максимизации суммарной спектральной эффективности (SR). В этом случае для каждого набора параметров канала выбиралось такое значение t , при котором достигалась максимальная сумма пользовательских скоростей. Такая стратегия ориентирована на повышение общей пропускной способности системы и не требует равномерного распределения скоростей. Вторая стратегия соответствовала критерию max-min fairness (MMF), который подразумевает максимизацию минимальной пользовательской скорости. Для этой стратегии, помимо доли мощности общего потока t , оптимизировалось распределение общего сообщения между пользователями, что позволяло выравнивать их скорости.

$$R_1 = R_{p,1} + \beta R_c, \quad R_2 = R_{p,2} + (1 - \beta) R_c,$$

где $\beta \in [0, 1]$ – доля общего сообщения, выделенная первому пользователю. При максимизации по критерию MMF параметр β выбирался так, чтобы увеличить минимальную пользовательскую СЭ.

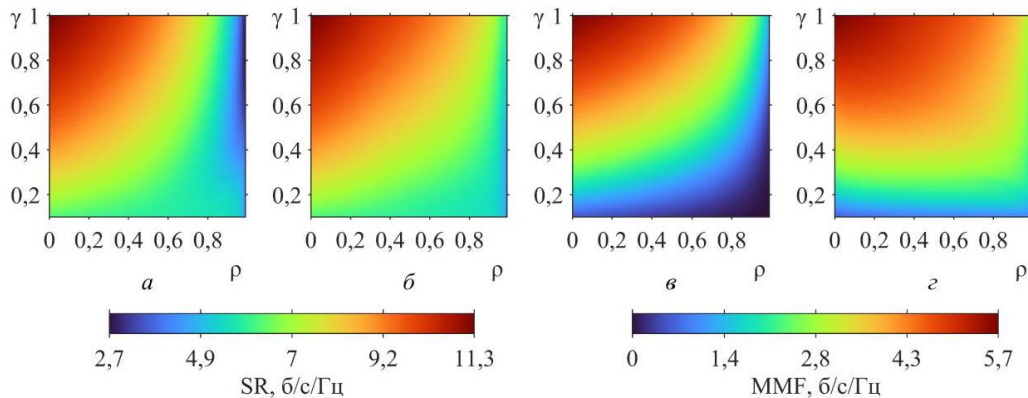


Рис. 4. Тепловые карты спектральной эффективности RSMA и SDMA: SDMA, SR – а, RSMA, SR – б, SDMA, MMF – в, RSMA, MMF – г

При $t = 0$ RSMA вырождается в SDMA, поскольку общий поток отсутствует. При $t > 0$ часть мощности выделяется на общий поток, что позволяет RSMA эффективнее учитывать межпользовательскую интерференцию и обеспечивать более высокие значения спектральной эффективности по сравнению с SDMA. Более заметное различие между схемами наблюдается при использовании стратегии MMF. В случае SDMA минимальная пользовательская спектральная эффективность существенно уменьшается при росте коэффициента корреляции, особенно в области малых значений γ . Это указывает на ограниченные возможности SDMA по поддержанию сбалансированных пользовательских скоростей при ухудшении условий пространственного разделения.

Для RSMA зависимость MMF от коэффициента пространственной корреляции выражена слабее: значения минимальной пользовательской спектральной эффективности остаются более равномерными в рассматриваемой области параметров. Такой результат связан с наличием общего потока, который позволяет перераспределять часть передаваемой мощности пользователю с худшими условиями приёма (см. рис. 5).

Полученные результаты представлены на рис. 4 и 5. Из рис. 4 видно, что при росте корреляции каналов эффективность SDMA снижается, в то время как RSMA демонстрирует более устойчивое поведение за счёт общего потока. При максимизации суммарной спектральной эффективности общий поток используется в тех областях, где он повышает общую скорость передачи (как это видно из рис. 5). При значительном различии норм каналов возрастает доля мощности, выделяемая на общий поток. Это позволяет компенсировать ухудшение условий приёма для более слабого пользователя и повысить минимальную пользовательскую спектральную эффективность.

Сравнение результатов для SDMA и RSMA показывает, что при максимизации суммарной спектральной эффективности различие между схемами выражено умеренно. Это объясняется тем, что общий поток в RSMA задействуется только в тех областях, где его использование приводит к увеличению целевой функции.

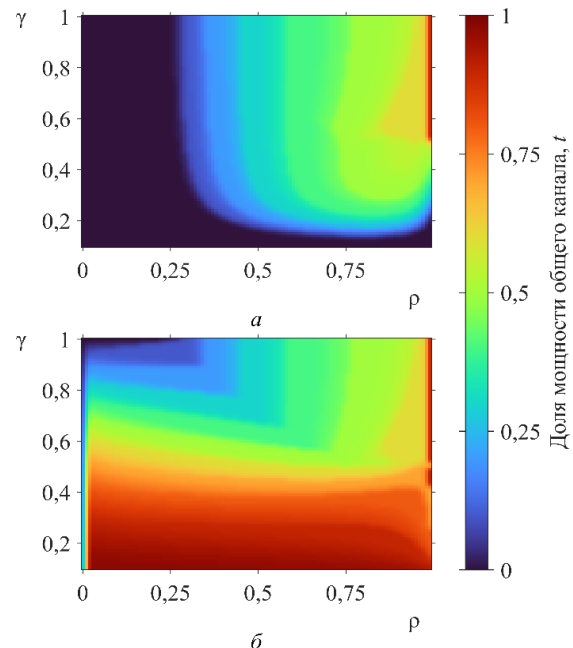


Рис. 5. Тепловые карты распределения доли мощности общего канала RSMA, t : RSMA SR – а; RSMA MMF – б

Следовательно, при $t > 0$ RSMA превосходит SDMA не только по эффективности использования радиоресурса, но и по критерию минимальной пользовательской скорости.

Заключение

В работе представлен обзор последних достижений в области систем связи с разделением по скорости. Рассмотрены базовые принципы работы и математическая модель RSMA, проведён анализ лабораторных и численных исследований, а также обсуждены перспективы внедрения и стандартизации технологии. Отдельное внимание уделено открытым научно-техническим проблемам.

Полученные различными коллективами результаты свидетельствуют о высоком потенциале RSMA для сетей связи следующего поколения. Эта технология способна обеспечить значительный рост спектральной и энергетической эффективности, повысить устойчивость к неточному знанию канала и обеспечить более гибкое управление межпользовательской интерференцией. Дополнительно было проведено моделирование эффективности RSMA в сравнении с SDMA с учётом подходов, представленных в отчёте ETSI. Несмотря на достигнутый прогресс, остаётся ряд задач, требующих решения: развитие методов оптимизации для многопользовательских сценариев, интеграция RSMA с другими перспективными направлениями (RIS, ISAC, машинное обучение), а также разработка эффективных алгоритмов для практических систем с ограниченными вычислительными ресурсами. Не менее актуальна задача верификации новых подходов в прототипах и опытных образцах оборудования.

Таким образом, RSMA можно рассматривать как одну из ключевых технологий, определяющих технический облик систем связи следующих поколений. Мировой опыт показывает, что современные технологии способны быстро проходить путь от теоретических концепций до практического внедрения в реальные системы связи. Достаточно вспомнить примеры MIMO или полярных кодов, которые относительно недавно представляли собой преимущественно академические разработки. Можно ожидать, что аналогичный путь предстоит и RSMA.

Литература

1. Comparative analysis of multiple access techniques for 6G communication systems / D. Pokamestov, Y. Kryukov, E. Rogozhnikov, G. Shalin, A. Shinkevich, R. Litvinov // *Telecommunication Systems: Modelling, Analysis, Design and Management*. – 2025. – Vol. 88, No. 3. – P. 1–14.
2. Evolution of mobile wireless communication to 5G revolution. / A.A. Salih, S.R. Zeebaree, A.S. Abdulaheem, R.R. Zebari, M.A. Sadeeq, O.M. Ahmed // *Technology Reports of Kansai University*. – 2020. – Vol. 62, No. 5. – P. 2139–2151.
3. Системы связи 6G: концепция, тренды, технологии физического уровня / Д.А. Покаместов, Я.В. Крюков, Р.Р. Абенов, А.А. Бровкин, А.С. Шинкевич, Г. Н. Шалин // *Радиотехника и электроника*. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 3–33.
4. Rate-Splitting Multiple Access: Fundamentals, Survey, and Future Research Trends / Y. Mao, O. Dizdar, B. Clerckx, R. Schober, P. Popovski and H.V. Poor // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2022. – Vol. 24, No. 4. – P. 2073–2126.
5. Spencer Q.H. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels / Q.H. Spencer, A.L. Swindlehurst, M. Haardt // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2004. – Vol. 52, No. 2. – P. 461–471.
6. Peel C.B. A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna multiuser communication-part I: channel inversion and regularization / C.B. Peel, B.M. Hochwald, A.L. Swindlehurst // *IEEE Transactions on Communications*. – 2005. – Vol. 53, No. 1. – P. 195–202.
7. Tomlinson-Harashima precoding in space-time transmission for low-rate backward channel / R.F.H. Fischer, C. Windpassinger, A. Lampe and J.B. Huber // *International Zurich Seminar on Broadband Communications Access-Transmission*. – Networking, Zurich, Switzerland: IEEE, 2002. DOI: 10.1109/IZSBC.2002.991747.
8. Sadek M. A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels / M. Sadek, A. Tarighat, A.H. Sayed // *IEEE transactions on Wireless Communications*. – 2007. – Vol. 6, No. 5. – P. 1711–1721.
9. Linear pre-coding performance in measured very-large MIMO channels / X. Gao, O. Edfors, F. Rusek, F. Tufvesson // *IEEE vehicular technology conference (VTC Fall)*. – San Francisco, United States: IEEE, 2011. – P. 1–5.
10. Помехоустойчивость многопользовательских систем MIMO при неидеальной оценке канала и других искажениях / А. Шинкевич, Д.А. Покаместов, Я.В. Крюков, Е.В. Рогожников, Г.Н. Шалин, А.А. Бровкин // *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 441–452.
11. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access / Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, K. Higuchi // *IEEE 77th vehicular technology conference (VTC Spring)*. – Dresden, Germany: IEEE, 2013. – P. 1–5.
12. Nikopour H. Sparse code multiple access / H. Nikopour, H. Baligh // *IEEE 24th annual international symposium on personal, indoor, and mobile radio communications (PIMRC)*. – London, United Kingdom: IEEE, 2013. – P. 332–336.
13. Evolution of NOMA toward next generation multiple access (NGMA) for 6G / Y. Liu, S. Zhang, X. Mu, Z. Ding, R. Schober, N. Al-Dhahir, E. Hossain, X. Shen // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2022. – Vol. 40, No. 4. – P. 1037–1071.
14. Mu X. NOMA for integrating sensing and communications toward 6G: A multiple access perspective. / X. Mu, Z. Wang, Y. Liu // *IEEE Wireless Communications*. – 2023. – Vol. 31, No. 3. – P. 316–323.
15. Shahan Shah A.F.M. A survey from 1G to 5G including the advent of 6G: Architectures, multiple access techniques, and emerging technologies // *IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. – Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2022. – P. 1117–1123.
16. Sparse code multiple access for 6G wireless communication networks: Recent advances and future directions / L. Yu, Z. Liu, M. Wen, D. Cai, S. Dang, Y. Wang, P. Xiao // *IEEE Communications Standards Magazine*. – 2021. – Vol. 5, No. 2. – P. 92–99.
17. On the capacity comparison between MIMO-NOMA and MIMO-OMA / Y. Liu, G. Pan, H. Zhang, M. Song // *IEEE Access*. – 2016. – Vol. 4. – P. 2123–2129.
18. Signal processing for MIMO-NOMA: Present and future challenges / Y. Huang, C. Zhang, J. Wang, Y. Jing, L. Yang, X. You // *IEEE Wireless Communications*. – 2018. – Vol. 25, No. 2. – P. 32–38.
19. A power allocation scheme for MIMO-NOMA and D2D vehicular edge computing based on decentralized DRL /

- D. Long, Q. Wu, Q. Fan, P. Fan, Z. Li, J. Fan // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, No. 7. – P. 3449.
20. 3GPP 38.812. Technical report Study on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for NR, 2018 [Электронный ресурс]. – URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3236> (дата обращения: 19.05.2025).
21. Joudeh H. Sum-rate maximization for linearly precoded downlink multiuser MISO systems with partial CSIT: A rate-splitting approach / H. Joudeh, B. Clerckx // *IEEE Transactions on Communications*. – 2016. – Vol. 64, No. 11. – P. 4847–4861.
22. Is NOMA Efficient in Multi-Antenna Networks? A Critical Look at Next Generation Multiple Access Techniques / B. Clerckx, Y. Mao, R. Schober, E. Jorswieck, D.J. Love, J. Yuan, L. Hanzo, G.Y. Li, E.G. Larsson, G. Caire // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. – 2021. – Vol. 2. – P. 1310–1343.
23. Mao Y. Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: Bridging, generalizing, and outperforming SDMA and NOMA / Y. Mao, B. Clerckx, V.O.K. Li // *EURASIP journal on wireless communications and networking*. – 2018. – Vol. 2018, No. 1. – Art. 133.
24. A primer on rate-splitting multiple access: Tutorial, myths, and frequently asked questions/ B. Clerckx, Y. Mao, E.A. Jorswieck, J. Yuan, D.J. Love, E. Erkip, D. Niyato // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2023. – Vol. 41, No. 5. – P. 1265–1308.
25. Hao C. Rate analysis of two-receiver MISO broadcast channel with finite rate feedback: A rate-splitting approach / C. Hao, Y. Wu, B. Clerckx // *IEEE Transactions on Communications*. – 2015. – Vol. 63, No. 9. – P. 3232–3246.
26. A Rate Splitting Strategy for Massive MIMO With Imperfect CSIT / M. Dai, B. Clerckx, D. Gesbert, G. Caire // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2016. – Vol. 15, No. 7. – P. 4611–4624.
27. Flores A.R. Tomlinson-harashima precoded rate-splitting for multiuser multiple-antenna systems / A.R. Flores, B. Clerckx, R.C. De Lamare // 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). – Lisbon, Portugal: IEEE, 2018. – P. 1–6.
28. Mao Y. Beyond dirty paper coding for multi-antenna broadcast channel with partial CSIT: A rate-splitting approach / Y. Mao, B. Clerckx // *IEEE Transactions on Communications*. – 2020. – Vol. 68, No. 11. – P. 6775–6791.
29. Interference Mitigation via Rate-Splitting and Common Message Decoding in Cloud Radio Access Networks / A. Alameer Ahmad, H. Dahrouj, A. Chaaban, A. Sezgin, M.-S. Alouini // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 80350–80365.
30. Оценка пропускной способности систем связи на основе множественного доступа с разделением по скорости / Д.А. Покаместов, А.В. Филатов, Я.В. Крюков, А.С. Шинкевич, Г.Н. Шалин, Е.В. Рогожников // *Радиотехника и электроника*. – 2025. – Т. 70, №1. – С. 88–95.
31. Evaluation of the Efficiency of Rate-Splitting Multiple Access in Next-Generation Communication Systems Scenarios / D. Pokamestov, A. Shinkevich, Y. Kryukov, E. Rogozhnikov, G. Shalin, S. Zemlyanukhin // *IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC)*. – Moscow, Russian Federation: IEEE, 2024. – P. 161–165.
32. Aboumahmoud I. Resource Management in RIS-Assisted Rate Splitting Multiple Access for Next Generation (xG) Wireless Communications: Models, State-of-the-Art, and Future Directions / I. Aboumahmoud, E. Hossain, A. Mezghani // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2025. – Vol. 27, No. 3. – P. 1618–1655.
33. Recent Trend of Rate-Splitting Multiple Access-Assisted Integrated Sensing and Communication Systems / S. Jang, N. Kim, G. Kim, B. Lee // *Electronics*. – 2024. – Vol. 13, No. 23. – Art. 4579.
34. Carleial A.B. Interference channels // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 1978. – Vol. 24. – P. 60–70.
35. Han T. A new achievable rate region for the interference channel / T. Han, K. Kobayashi // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 1981. – Vol. 27, No. 1. – P. 49–60.
36. Rimoldi B. A rate-splitting approach to the Gaussian multiple-access channel / B. Rimoldi, R. Urbanke // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 1996. – Vol. 42, No. 2. – P. 364–375.
37. Etkin R.H. Gaussian interference channel capacity to within one bit / R.H. Etkin, N.C. David, H. Wang // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 2008. – Vol. 54, No.12. – P. 5534–5562.
38. A review on Internet of Things (IoT), Internet of Everything (IoE) and Internet of Nano Things (IoNT) / M.H. Miraz, M. Ali, P.S. Excell, R. Picking // 2015 Conference on Internet Technologies and Applications (ITA). – Wrexham, UK: IEEE, 2015. – P. 219–224.
39. Mao Y. Energy efficiency of rate-splitting multiple access, and performance benefits over SDMA and NOMA / Y. Mao, B. Clerckx, V.O.K. Li // 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Lisbon, Portugal: IEEE, 2018. – P. 1–5.
40. Zhou G. Rate-splitting multiple access for multi-antenna downlink communication systems: Spectral and energy efficiency tradeoff / G. Zhou, Y. Mao, B. Clerckx // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2021. – Vol. 21, No. 7. – P. 4816–4828.
41. Energy-Efficient RSMA for Multigroup Multicast and Multibeam Satellite Communications / H. Cui, L. Zhu, Z. Xiao, B. Clerckx, R. Zhang // *IEEE Wireless Communications Letters*. – 2023. – Vol. 12, No. 5. – P. 838–842.
42. Sivadevuni S. Optimizing energy efficiency with RSMA: Balancing low and high QoS requirements / S. Sivadevuni, K. Weinberger, A. Sezgin // *IEEE 25th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. – Lucca, Italy: IEEE, 2024. – P. 716–720.
43. Robust Beamforming Design for RSMA-Integrated Full-Duplex Communications: Energy and Spectral Efficiency Trade-Off / R. Allu, M. Katwe, K. Singh, S.L. Cotton, C.-P. Li, T.Q. Duong // *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. – 2025. – Vol. 9, No. 3. – P. 948–961.
44. Rate-Splitting Multiple Access for Downlink Multi-Antenna Communications: Physical Layer Design and Link-level Simulations / O. Dizdar, Y. Mao, W. Han, B. Clerckx // *IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. – London, UK: IEEE, 2020. – P. 1–6.
45. 3GPP TR 36.873. «Study on 3D-channel model for LTE». 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) [Электронный ресурс]. – URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2574> (дата обращения: 19.05.2025).
46. 3GPP TR 38.901. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network [Электронный ресурс]. – URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3173> (дата обращения: 19.05.2025).
47. A tutorial on extremely large-scale MIMO for 6G: Fundamentals, signal processing, and applications / Z. Wang,

- J. Zhang, H. Du, D. Niyato, S. Cui, B. Ai, M. Debbah, K.B. Letaief, H.V. Poor // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2024. – Vol. 26, No. 3. – P. 1560–1605.
48. Özdoğan Ö. Massive MIMO with dual-polarized antennas / Ö. Özdoğan, E. Björnson // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2022. – Vol. 22, No. 2. – P. 1448–1463.
49. Dual-polarized massive MIMO-RSMA networks: Tackling imperfect SIC. / A.S. de Sena, P.H. Nardelli, D.B. da Costa, P. Popovski, C.B. Papadias, M. Debbah // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2022. – Vol. 22, No. 5. – P. 3194–3215.
50. Rate-splitting multiple access: The first prototype and experimental validation of its superiority over SDMA and NOMA/ X. Lyu, S. Aditya, J. Kim, B. Clerckx // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2024. – Vol. 23, No. 8. – P. 9986–10000.
51. Rate Splitting Multiple Access (RSMA) Demo [Электронный ресурс]. – URL: <https://video.viavisolutions.com/en-us/detail/videos/6g/video/1783212949596089324/6g-research---rate-splitting-multiple-access-rsma-demo---inter-view-style> (дата обращения: 19.05.2025).
52. Lyu X. Rate-Splitting Multiple Access for Overloaded Multi-Group Multicast: A First Experimental Study / X. Lyu, S. Aditya, B. Clerckx // IEEE Transactions on Broadcasting. – 2025. – Vol. 71, No. 1. – p. 30–41.
53. Lyu X. Rate-Splitting Multiple Access for Integrated Sensing and Communications: A First Experimental Study / X. Lyu, S. Aditya, B. Clerckx // arXiv preprint arXiv:2412.12037. – 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2412.12037.
54. ETSI GR MAT 001 V1.1.1 (2026-01). Multiple Access Techniques (MAT): Classification of Candidate Multiple Access Techniques for 6G and their comparison with specified 3GPP features [Электронный ресурс]. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/MAT/001_099/001/01.01.01_60/gr_MAT001v010101p.pdf (дата обращения: 19.01.2026).
55. A two-user approximation-based transmit beamforming for physical-layer multicasting in mobile cellular downlink systems / C.L. Hsiao, J.C. Guey, W.H. Sheen, R.J. Chen // Journal of the Chinese Institute of Engineers. – 2015. – Vol. 38, No. 6. – P. 742–750.
56. Rate-splitting multiple access: Finite constellations, receiver design, and SIC-free implementation / S. Zhang, B. Clerckx, D. Vargas, O. Haffenden, A. Murphy // IEEE Transactions on Communications. – 2024. – Vol. 72, No. 9. – P. 5319–5333.
57. Rate-splitting unifying SDMA, OMA, NO-MA, and multicasting in MISO broadcast channel: A simple two-user rate analysis/ B. Clerckx, Y. Mao, R. Schober, H.V. Poor // IEEE Wireless Communications Letters. – 2019. – Vol. 9, No. 3. – P. 349–353.
58. Analysis and Design of Common Channel Precoding Algorithms for RSMA / A. Shinkevich, D. Pokamestov, Y. Kryukov, G. Shalin and E. Rogozhnikov // IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – Altai, Russia: IEEE, 2025. – P. 440–444.
59. Shen K. Fractional programming for communication systems. – Part I: Power control and beamforming / K. Shen, W. Yu // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2018. – Vol. 66, No. 10. – P. 2616–2630.
60. Fang T. Rate splitting multiple access: Optimal beamforming structure and efficient optimization algorithms / T. Fang, Y. Mao // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2024. – Vol. 23, No. 10. – P. 15642–15657.
61. Globally optimal spectrum-and energy-efficient beamforming for rate splitting multiple access / B. Matthiesen, Y. Mao, A. Dekorsy, P. Popovski, B. Clerckx // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2022. – Vol. 70. – P. 5025–5040.
62. Dong M. Multi-group multicast beamforming: Optimal structure and efficient algorithms / M. Dong, Q. Wang // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2020. – Vol. 68. – P. 3738–3753.
63. Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities / Y. Liu, X. Liu, X. Mu, T. Hou, J. Xu, M. Di Renzo, N. Al-Dhahir // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2021. – Vol. 23, No. 3. – P. 1546–1577.
64. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces / E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M.S. Alouini, R. Zhang // IEEE access. – 2019. – Vol. 7. – P. 116753–116773.
65. Simulation of RIS-Assisted OFDM Multipath Channel / S.A. Ereemeev, D.E. Ilinskiy, Y.V. Kryukov, D.A. Pokamestov, G.N. Shalin, A.S. Shinkevich // IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – Altai, Russia: IEEE, 2024. – P. 660–663.
66. Aboumahmoud I. Resource management in RIS-assisted rate splitting multiple access for next generation (xG) wireless communications: Models, state-of-the-art, and future directions / I. Aboumahmoud, E. Hossain, A. Mezghani // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2025. – Vol. 27, No. 3. – P. 1618–1655.
67. Rate-splitting multiple access for 6G. – Part III: Interplay with reconfigurable intelligent surfaces / H. Li, Y. Mao, O. Dizzar, B. Clerckx // IEEE Communications Letters. – 2022. – Vol. 26, No. 10. – P. 2242–2246.
68. Fully connected reconfigurable intelligent surface aided rate-splitting multiple access for multi-user multi-antenna transmission / T. Fang, Y. Mao, S. Shen, Z. Zhu, B. Clerckx // IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). – Seoul, Korea: IEEE, 2022. – P. 675–680.
69. Jolly A. An analysis on rate-splitting multiple access for IRS aided 6G communication / A. Jolly, S. Biswas, K. Singh // arXiv preprint arXiv:2106.04418. – 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2106.04418.
70. Rate-splitting multiple access and its interplay with intelligent reflecting surfaces / A.S. De Sena, P.H. Nardelli, D.B. Da Costa, P. Popovski, C.B. Papadias // IEEE Communications Magazine. – 2022. – Vol. 60, No. 7. – P. 52–57.
71. Rate-splitting multiple access for intelligent reflecting surface aided multi-user communications / A. Bansal, K. Singh, B. Clerckx, C.P. Li, M.S. Alouini // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – Vol. 70, No. 9. – P. 9217–9229.
72. User-centric cell-free massive MIMO networks: A survey of opportunities, challenges and solutions / H.A. Ammar, R. Adve, S. Shahbazpanahi, G. Boudreau, K.V. Srinivas // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2021. – Vol. 24, No. 1. – P. 611–652.
73. Elhoushy S. Cell-free massive MIMO: A survey/ S. El-houshy, M. Ibrahim, W. Hamouda // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2021. – Vol. 24, No. 1. – P. 492–523.
74. Rate-splitting assisted massive machine-type communications in cell-free massive MIMO / A. Mishra, Y. Mao, L. Sanguinetti, B. Clerckx // IEEE Communications Letters. – 2022. – Vol. 26, No. 6. – P. 1358–1362.
75. A Federated Deep Learning Framework for Cell-Free RSMA Networks / S.A. Mousavi, M. Monemi, R. Mohseni, M. Latvaaho // arXiv preprint arXiv:2501.07126. – 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2501.07126.
76. Robust design of rate-splitting multiple access with imperfect CSI for cell-free MIMO systems / D. Yu, S.H. Park,

O. Simeone, S. S. Shitz // IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). – Seoul, Korea: IEEE, 2022. – P. 604–609.

77. Rate Splitting Multiple Access Assisted Cell-Free Massive MIMO for URLLC Services in 5G and Beyond Networks / F. Tan, S. Si, H. Chen, S. Li, T. Lv // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2024. – Vol. 5. – P. 6018–6032.

Шинкевич Артём Сергеевич

Аспирант, ассистент каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР)
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-0174-9158
Тел.: +7-999-177-57-23
Эл. почта: a.shinkevich00@gmail.com

Покаместов Дмитрий Алексеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТОР ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-809-43-75
Эл. почта: dmaltomsk@mail.ru

Крюков Яков Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. ТОР ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-104-44-06
Эл. почта: kryukov.tusur@gmail.com

Шалин Георгий Николаевич

Аспирант, ассистент каф. ТОР ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5015-599X>
Тел.: +7-961-702-22-07
Эл. почта: shalingn1120@gmail.com

Еремеев Сергей Александрович

Ассистент каф. ТОР ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0570-5495>
Тел.: +7-913-112-48-13
Эл. почта: sergeyermeev@internet.ru

Ильинский Дмитрий Евгеньевич

Ассистент каф. ТОР ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8697-8945>
Тел.: +7-923-428-76-50
Эл. почта: dmitriyilinskiy02@gmail.com

Поступила в редакцию: 11.02.2026.

Принята к публикации: 23.05.2026.

Shinkevich A.S., Pokamestov D.A., Kryukov Y.V., Shalin G.N., Eremeev S.A., Ilinskiy D.E.

Rate Splitting Multiple Access: Current State and Development Prospects

Relevance. Rate Splitting Multiple Access (RSMA) is considered a promising multiple access technique for cellular networks, since existing methods have limitations under increasing

requirements for spectral efficiency and quality of service. **Purpose of the study** is to review and analyze the works on RSMA published to date, as well as to evaluate the efficiency of RSMA in accordance with the precoding schemes proposed by the European Telecommunications Standards Institute. **Methods.** The study employs a review and comparative analysis of current research, analysis of a mathematical model of an RSMA-based system, numerical modeling, consideration of laboratory experiments, and simulation modeling. **Novelty.** The scientific novelty lies in systematizing current research directions in the field of RSMA and providing an additional evaluation of RSMA efficiency for the precoding schemes proposed by the European Telecommunications Standards Institute. **Results.** The basic operating principles of RSMA are described, a mathematical model of the system is presented, recent studies are analyzed, and promising directions are identified, including full-duplex communication, integrated sensing and communications, reconfigurable intelligent surfaces, cell-free architecture, and massive antenna arrays. **Practical significance.** The obtained results can be used for analyzing and selecting multiple access methods, as well as for modeling and designing advanced cellular communication systems based on RSMA.

Keywords: 6G, MIMO, multiple access, OMA, SDMA, NOMA, RSMA, interference management.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-1-53-67

References

1. Pokamestov D., Kryukov Y., Rogozhnikov E., Shalin G., Shinkevich A., Litvinov R. Comparative analysis of multiple access techniques for 6G communication systems. *Telecommunication Systems: Modelling, Analysis, Design and Management*, 2025, vol. 88, no. 3, pp. 1–14.
2. Salih A.A., Zeebaree S.R., Abdulaheem A.S., Zebari R.R., Sadeeq M.A., Ahmed O.M. Evolution of mobile wireless communication to 5G revolution. *Technology Reports of Kansai University*, 2020, vol. 62, no. 5, pp. 2139–2151.
3. Pokamestov D., Kryukov Y., Abenov R., [Rogozhnikov E., Brovkin A., Shinkevich A., Shalin G. 6G communication systems: concept, trends, physical level technologies]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 3–33 (in Russ.).
4. Mao Y., Dizdar O., Clerckx B., Schober R., Popovski P., Poor H.V. Rate-Splitting Multiple Access: Fundamentals, survey, and future research trends. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 2073–2126.
5. Spencer Q.H., Swindlehurst A.L., Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, vol. 52, no. 2, pp. 461–471.
6. Peel C.B., Hochwald B.M., Swindlehurst A.L. A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna multiuser communication. Part I: Channel inversion and regularization. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, vol. 53, no. 1, pp. 195–202.
7. Fischer R.F.H., Windpassinger C., Lampe A., Huber J.B. Tomlinson-Harashima precoding in space-time transmission for low-rate backward channel. International Zurich Seminar on Broadband Communications Access – Transmission. – Networking, Zurich, Switzerland, IEEE, 2002. DOI: 10.1109/IZSBC.2002.991747.
8. Sadek M., Tarighat A., Sayed A.H. A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, vol. 6, no. 5, pp. 1711–1721.
9. Gao X., Edfors O., Rusek F., Tufvesson F. Linear precoding performance in measured very-large MIMO channels.

IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), San Francisco, United States, IEEE, 2011, pp. 1–5.

10. Shinkevich A., Pokamestov D.A., Kryukov Y.V., Rogozhnikov E.V., Shalin G.N., Brovkin A.A. [Evaluation of noise immunity of multi-user MIMO systems with imperfect channel estimation and other distortions]. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 441–452 (in Russ.).

11. Saito Y., Kishiyama Y., Benjebbour A., Nakamura T., Li A., Higuchi K. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access. *IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Dresden, Germany, IEEE, 2013, pp. 1–5.

12. Nikopour H., Baligh H. Sparse code multiple access. *IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, London, United Kingdom, IEEE, 2013, pp. 332–336.

13. Liu Y., Zhang S., Mu X., Ding Z., Schober R., Al-Dhahir N., Hossain E., Shen X. Evolution of NOMA toward next generation multiple access (NGMA) for 6G. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, vol. 40, no. 4, pp. 1037–1071.

14. Mu X., Wang Z., Liu Y. NOMA for integrating sensing and communications toward 6G: A multiple access perspective. *IEEE Wireless Communications*, 2024, vol. 31, no. 3, pp. 316–323.

15. Shahan Shah A.F.M. A survey from 1G to 5G including the advent of 6G: Architectures, multiple access techniques, and emerging technologies. *IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, Las Vegas, NV, USA, IEEE, 2022, pp. 1117–1123.

16. Yu L., Liu Z., Wen M., Cai D., Dang S., Wang Y., Xiao P. Sparse code multiple access for 6G wireless communication networks: Recent advances and future directions. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 92–99.

17. Liu Y., Pan G., Zhang H., Song M. On the capacity comparison between MIMO-NOMA and MIMO-OMA. *IEEE Access*, 2016, vol. 4, pp. 2123–2129.

18. Huang Y., Zhang C., Wang J., Jing Y., Yang L., You X. Signal processing for MIMO-NOMA: Present and future challenges. *IEEE Wireless Communications*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 32–38.

19. Long D., Wu Q., Fan Q., Fan P., Li Z., Fan J. A power allocation scheme for MIMO-NOMA and D2D vehicular edge computing based on decentralized DRL. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 7, art. 3449.

20. 3GPP TR 38.812. Study on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for NR. Technical report, 2018. Available at: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3236> (accessed: 19 May 2025).

21. Joudeh H., Clerckx B. Sum-rate maximization for linearly precoded downlink multiuser MISO systems with partial CSIT: A rate-splitting approach. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, vol. 64, no. 11, pp. 4847–4861.

22. Clerckx B., Mao Y., Schober R., Jorswieck E., Love D.J., Yuan J., Hanzo L., Li G.Y., Larsson E.G., Caire G. Is NOMA efficient in multi-antenna networks? A critical look at next generation multiple access techniques. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, vol. 2, pp. 1310–1343.

23. Mao Y., Clerckx B., Li V.O.K. Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: Bridging, generalizing, and outperforming SDMA and NOMA. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018, vol. 2018, no. 1, art. 133.

24. Clerckx B., Mao Y., Jorswieck E.A., Yuan J., Love D.J., Erkip E., Niyato D. A primer on rate-splitting multiple access: Tutorial, myths, and frequently asked questions. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, vol. 41, no. 5, pp. 1265–1308.

25. Hao C., Wu Y., Clerckx B. Rate analysis of two-receiver MISO broadcast channel with finite rate feedback: A rate-splitting approach. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, vol. 63, no. 9, pp. 3232–3246.

26. Dai M., Clerckx B., Gesbert D., Caire G. A rate splitting strategy for massive MIMO with imperfect CSIT. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, vol. 15, no. 7, pp. 4611–4624.

27. Flores A.R., Clerckx B., De Lamare R.C. Tomlinson-Harashima precoded rate-splitting for multiuser multiple-antenna systems. *15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Lisbon, Portugal, IEEE, 2018, pp. 1–6.

28. Mao Y., Clerckx B. Beyond dirty paper coding for multi-antenna broadcast channel with partial CSIT: A rate-splitting approach. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, vol. 68, no. 11, pp. 6775–6791.

29. Alameer Ahmad A., Dahrouj H., Chaaban A., Sezgin A., Alouini M.-S. Interference mitigation via rate-splitting and common message decoding in cloud radio access networks. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 80350–80365.

30. Pokamestov D.A., Filatov A.V., Kryukov Y.V., Shinkevich A.S., Shalin G.N., Rogozhnikov E.V. Evaluation of the capacity of Rate-Splitting Multiple Access communication systems. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 88–95.

31. Pokamestov D., Shinkevich A., Kryukov Y., Rogozhnikov E., Shalin G., Zemlyanukhin S. Evaluation of the efficiency of Rate-Splitting Multiple Access in next-generation communication systems scenarios. *IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC)*, Moscow, Russian Federation, IEEE, 2024, pp. 161–165.

32. Aboumahmoud I., Hossain E., Mezghani A. Resource management in RIS-assisted Rate Splitting Multiple Access for next generation (xG) wireless communications: Models, state-of-the-art, and future directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2025, vol. 27, no. 3, pp. 1618–1655.

33. Jang S., Kim N., Kim G., Lee B. Recent trend of Rate-Splitting Multiple Access-assisted Integrated Sensing and Communication systems. *Electronics*, 2024, vol. 13, no. 23, article 4579.

34. Carleial A.B. Interference channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1978, vol. 24, pp. 60–70.

35. Han T., Kobayashi K. A new achievable rate region for the interference channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1981, vol. 27, no. 1, pp. 49–60.

36. Rimoldi B., Urbanke R. A rate-splitting approach to the Gaussian multiple-access channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1996, vol. 42, no. 2, pp. 364–375.

37. Etkin R.H., Tse D.N.C., Wang H. Gaussian interference channel capacity to within one bit. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, vol. 54, no. 12, pp. 5534–5562.

38. Miraz M.H., Ali M., Excell P.S., Picking R. A review on Internet of Things (IoT), Internet of Everything (IoE) and Internet of Nano Things (IoNT). *2015 Conference on Internet Technologies and Applications (ITA)*, Wrexham, UK, IEEE, 2015, pp. 219–224.

39. Mao Y., Clerckx B., Li V.O.K. Energy efficiency of rate-splitting multiple access, and performance benefits over SDMA and NOMA. *15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Lisbon, Portugal, IEEE, 2018, pp. 1–5.

40. Zhou G., Mao Y., Clerckx B. Rate-splitting multiple access for multi-antenna downlink communication systems: Spectral and energy efficiency tradeoff. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, vol. 21, no. 7, pp. 4816–4828.
41. Cui H., Zhu L., Xiao Z., Clerckx B., Zhang R. Energy-efficient RSMA for multigroup multicast and multibeam satellite communications. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, vol. 12, no. 5, pp. 838–842.
42. Sivadevuni S., Weinberger K., Sezgin A. Optimizing energy efficiency with RSMA: Balancing low and high QoS requirements. *IEEE 25th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Lucca, Italy, IEEE, 2024, pp. 716–720.
43. Allu R., Katwe M., Singh K., Cotton S.L., Li C.-P., Duong T.Q. Robust beamforming design for RSMA-integrated full-duplex communications: Energy and spectral efficiency trade-off. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2025, vol. 9, no. 3, pp. 948–961.
44. Dizdar O., Mao Y., Han W., Clerckx B. Rate-Splitting Multiple Access for downlink multi-antenna communications: Physical layer design and link-level simulations. *IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, London, UK, IEEE, 2020, pp. 1–6.
45. 3GPP TR 36.873. Study on 3D-channel model for LTE. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Available at: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2574> (accessed: 19 May 2025).
46. 3GPP TR 38.901. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network. Available at: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3173> (accessed: 19 May 2025).
47. Wang Z., Zhang J., Du H., Niyato D., Cui S., Ai B., Debbah M., Letaief K.B., Poor H.V. A tutorial on extremely large-scale MIMO for 6G: Fundamentals, signal processing, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 1560–1605.
48. Özdogan Ö., Björnson E. Massive MIMO with dual-polarized antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 1448–1463.
49. de Sena A.S., Nardelli P.H., da Costa D.B., Popovski P., Papadias C.B., Debbah M. Dual-polarized massive MIMO-RSMA networks: Tackling imperfect SIC. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 3194–3215.
50. Lyu X., Aditya S., Kim J., Clerckx B. Rate-splitting multiple access: The first prototype and experimental validation of its superiority over SDMA and NOMA. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, vol. 23, no. 8, pp. 9986–10000.
51. Rate Splitting Multiple Access (RSMA) Demo. Available at: <https://video.viavisolutions.com/en-us/detail/videos/6g/video/1783212949596089324/6g-research---rate-splitting-multiple-access-rsma-demo---interview-style> (accessed: 19 May 2025).
52. Lyu X., Aditya S., Clerckx B. Rate-Splitting Multiple Access for overloaded multi-group multicast: A first experimental study. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2025, vol. 71, no. 1, pp. 30–41.
53. Lyu X., Aditya S., Clerckx B. Rate-Splitting Multiple Access for Integrated Sensing and Communications: A first experimental study. *arXiv preprint arXiv:2502.09283*, 2025, DOI: 10.48550/arXiv.2412.12037.
54. ETSI GR MAT 001 V1.1.1. Multiple Access Techniques (MAT); Classification of candidate multiple access techniques for 6G and their comparison with specified 3GPP features. ETSI, 2026. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/MAT/001_099/001/01.01.01_60/gr_MAT001v01_0101p.pdf (accessed: 19 January 2026).
55. Hsiao C.L., Guey J.C., Sheen W.H., Chen R.J. A two-user approximation-based transmit beamforming for physical-layer multicasting in mobile cellular downlink systems. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2015, vol. 38, no. 6, pp. 742–750.
56. Zhang S., Clerckx B., Vargas D., Haffenden O., Murphy A. Rate-splitting multiple access: Finite constellations, receiver design, and SIC-free implementation. *IEEE Transactions on Communications*, 2024, vol. 72, no. 9, pp. 5319–5333.
57. Clerckx B., Mao Y., Schober R., Poor H.V. Rate-splitting unifying SDMA, OMA, NOMA, and multicasting in MISO broadcast channel: A simple two-user rate analysis. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 349–353.
58. Shinkevich A., Pokamestov D., Kryukov Y., Shalin G., Rogozhnikov E. Analysis and design of common channel precoding algorithms for RSMA. *IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Altai, Russia, IEEE, 2025, pp. 440–444.
59. Shen K., Yu W. Fractional programming for communication systems. Part I: Power control and beamforming. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, vol. 66, no. 10, pp. 2616–2630.
60. Fang T., Mao Y. Rate splitting multiple access: Optimal beamforming structure and efficient optimization algorithms. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, vol. 23, no. 10, pp. 15642–15657.
61. Matthiesen B., Mao Y., Dekorsy A., Popovski P., Clerckx B. Globally optimal spectrum- and energy-efficient beamforming for rate splitting multiple access. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, vol. 70, pp. 5025–5040.
62. Dong M., Wang Q. Multi-group multicast beamforming: Optimal structure and efficient algorithms. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, vol. 68, pp. 3738–3753.
63. Liu Y., Liu X., Mu X., Hou T., Xu J., Di Renzo M., Al-Dhahir N. Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 1546–1577.
64. Basar E., Di Renzo M., De Rosny J., Debbah M., Alouini M.S., Zhang R. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 116753–116773.
65. Eremeev S.A., Ilinskiy D.E., Kryukov Y.V., Pokamestov D.A., Shalin G.N., Shinkevich A.S. Simulation of RIS-assisted OFDM multipath channel. *IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Altai, Russia, IEEE, 2024, pp. 660–663.
66. Aboumahmoud I., Hossain E., Mezghani A. Resource management in RIS-assisted rate splitting multiple access for next generation (xG) wireless communications: Models, state-of-the-art, and future directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2025, vol. 27, no. 3, pp. 1618–1655.
67. Li H., Mao Y., Dizdar O., Clerckx B. Rate-splitting multiple access for 6G. Part III: Interplay with reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Communications Letters*, 2022, vol. 26, no. 10, pp. 2242–2246.
68. Fang T., Mao Y., Shen S., Zhu Z., Clerckx B. Fully connected reconfigurable intelligent surface aided rate-splitting multiple access for multi-user multi-antenna transmission. *IEEE International Conference on Communications Work-*

shops (ICC Workshops), Seoul, Korea, IEEE, 2022, pp. 675–680.

69. Jolly A., Biswas S., Singh K. An analysis on rate-splitting multiple access for IRS aided 6G communication. arXiv preprint arXiv:2106.04418, 2021.

70. De Sena A.S., Nardelli P.H., Da Costa D.B., Popovski P., Papadias C.B. Rate-splitting multiple access and its interplay with intelligent reflecting surfaces. *IEEE Communications Magazine*, 2022, vol. 60, no. 7, pp. 52–57.

71. Bansal A., Singh K., Clerckx B., Li C.P., Alouini M.S. Rate-splitting multiple access for intelligent reflecting surface aided multi-user communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, vol. 70, no. 9, pp. 9217–9229.

72. Ammar H.A., Adve R., Shahbazpanahi S., Boudreau G., Srinivas K.V. User-centric cell-free massive MIMO networks: A survey of opportunities, challenges and solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 611–652.

73. Elhoushy S., Ibrahim M., Hamouda W. Cell-free massive MIMO: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 492–523.

74. Mishra A., Mao Y., Sanguinetti L., Clerckx B. Rate-splitting assisted massive machine-type communications in cell-free massive MIMO. *IEEE Communications Letters*, 2022, vol. 26, no. 6, pp. 1358–1362.

75. Mousavi S.A., Monemi M., Mohseni R., Latva-aho M. A federated deep learning framework for cell-free RSMA networks. arXiv preprint arXiv:2501.07126, 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2501.07126.

76. Yu D., Park S.H., Simeone O., Shitz S.S. Robust design of rate-splitting multiple access with imperfect CSI for cell-free MIMO systems. *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Seoul, Korea, IEEE, 2022, pp. 604–609.

77. Tan F., Si S., Chen H., Li S., Lv T. Rate Splitting Multiple Access assisted cell-free massive MIMO for URLLC services in 5G and beyond networks. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2024, vol. 5, pp. 6018–6032.

Artyom S. Shinkevich

Postgraduate student, Teaching Assistant,
Dept. of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering (TBPRe), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40 Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-0174-9158
Phone: +7-999-177-57-23
Email: a.shinkevich00@gmail.com

Dmitrii A. Pokamestov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Dept. of TBPRe, TUSUR
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-809-43-75
Email: dmaltomsk@mail.ru

Yakov V. Kryukov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Dept. of TBPRe, TUSUR
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-104-44-06
Email: kryukov.tusur@gmail.com

Georgy N. Shalin

Postgraduate student, Teaching Assistant,
Dept. of TBPRe, TUSUR
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-5015-599X
Phone: +7-961-702-22-07
Email: shalingn1120@gmail.com

Sergey A. Ereemeev

Teaching Assistant, Dept. of TBPRe, TUSUR
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0009-0008-0570-5495
Phone: +7-913-112-48-13
Email: sergeyeremeev@internet.ru

Dmitriy E. Ilinskiy

Teaching Assistant, Dept. of TBPRe, TUSUR
40 Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0009-0008-8697-8945
Phone: +7-923-428-76-50
Email: dmitriyilinskiy02@gmail.com

Received: 11.02.2026.

Accepted: 23.05.2026.