

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.396.41

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПО СКОРОСТИ

© 2025 г. Д. А. Покаместов*, А. В. Филатов, Я. В. Крюков,
А. С. Шинкевич, Г. Н. Шалин, Е. В. Рогожников

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
просп. Ленина, 40, Томск, 634050 Российская Федерация

*E-mail: dmaltomsk@mail.ru

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 06.12.2024 г.

Принята к публикации 09.12.2024 г.

Описан метод множественного доступа с разделением по скорости RSMA (Rate Split Multiple Access) для многоантенных систем связи. Приводится последовательность операций по формированию и обработке сигналов RSMA. Рассмотрены сценарии использования RSMA в системах связи и обосновывается эффективность применения этого метода. Получены оценки пропускной способности метода RSMA в сравнении с другими методами множественного доступа. Проведено численное моделирование оценки средней пропускной способности одного абонента с помощью инструмента QuaDRiGa. Показано, что RSMA позволяет добиться большей пропускной способности по сравнению с другими методами множественного доступа, применяемыми в многоантенных системах связи.

Ключевые слова: RSMA, множественный доступ, 6G, QuaDRiGa, пропускная способность

DOI: 10.31857/S0033849425010102, **EDN:** HIRHUM

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие новых приложений, таких как виртуальная реальность, искусственный интеллект, интернет вещей, облачные вычисления и др. ведет к колоссальному росту объема передаваемого трафика [1]. На сегодняшний день существующие сети передачи информации не способны обеспечить растущие требования к пропускной способности, высокой мобильности, низкой сетевой задержки. Поэтому уже сейчас началось обсуждение концепции систем связи шестого поколения, внедрение которых прогнозируется к 2030 г [2]. В основе любых систем передачи информации лежат технологии физического уровня, определяющие ряд ключевых параметров, в том числе спектральную эффективность и пропускную способность. Одной из важнейших технологий физического уровня является метод множественного доступа. Множественный доступ определяет способ совместного использования канала передачи абонентами системы связи. Эволюция поколений систем связи сопряжена с развитием методов множественного доступа.

В настоящее время в системах связи 5G применяется комбинация ортогонального частотного

OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) и пространственного SDMA (Space Division Multiple Access) множественного доступа. OFDMA основан на формировании банка ортогональных частотно-временных ресурсов (поднесущих) с применением быстрого преобразования Фурье. SDMA подразумевает использование многопользовательских многоантенных систем MU-MIMO (Multiple User Multiple Input Multiple Output) с образованием диаграммы направленности (beamforming). Оба метода основаны на формировании ортогональных ресурсных элементов (в пространстве, по частоте и по времени), доступных для передачи абонентских сигналов, и поэтому входят в группу методов ортогонального множественного доступа OMA (Orthogonal Multiple Access). Сигналы абонентов OMA в случае интерференции считаются неустранимой системной помехой, которая должна быть сведена к минимуму. В противовес такому подходу, еще при обсуждении систем мобильной связи пятого поколения 5G, была предложена группа методов неортогонального множественного доступа NOMA (Non Orthogonal Multiple Access) [3–5]. NOMA подразумевает одновременную передачу сигналов несколькими абонентами в одной полосе частот. Возникающая в результате этого интерференция

считается устранимой и контролируется. В работе [6] рассмотрен такой подход с точки зрения теории информации, который показал выигрыш над системами OMA. Методы NOMA можно разделить на мультиплексирование в домене мощности PD-NOMA (Power Domain NOMA) и в домене кода CD-NOMA (Code Domain NOMA). В [3, 8] показано, что различные методы NOMA превосходят OMA в помехоустойчивости, спектральной эффективности, количестве доступных подключений

Вместе с тем, NOMA имеет ряд нерешенных проблем – высокая вычислительная сложность алгоритмов обработки сигналов, сложность планирования и распределения ресурсов. По этим причинам, а также из-за конкуренции между компаниями, приводящими различные методы NOMA, этот подход не вошел в стандарт 5G [9], но имеет высокий потенциал для включения в 6G [10]. Предполагается, что NOMA будет работать совместно с SDMA/OFDMA, за счет чего появляется дополнительный домен для распределения ресурсов и увеличивается суммарная пропускная способность сети [11]. Реализация NOMA в многоантенных системах связи (MIMO-NOMA) имеет ряд проблем, на которые обращено внимание в работе [12]. Так, демонстрируется, что несмотря на то, что в случае одноантенных систем SISO (Single Input Single Output) NOMA превосходит OMA в пропускной способности, для многоантенных систем MU-MIMO это выполняется не всегда. Например, если число антенн базовой станции превосходит число мультиплексируемых абонентов, а канальная матрица не коррелирована, при использовании многопользовательского линейного преодолевания MU-LP (Multi User Linear Precoding) для каждого пользователя может быть создан независимый пространственный канал. Такая стратегия позволит обеспечить большую пропускную способность, чем MIMO-NOMA, согласно которой в рамках одного пространственного канала мультиплексируется несколько абонентов, вносящих системную межпользовательскую интерференцию [13]. Однако, в случае коррелированных канальных матриц, или при малом числе антенн, применение MIMO-NOMA позволяет получить больший выигрыш в пропускной способности по сравнению с ортогональным методом SDMA на основе MU-LP [11].

Для обобщения технологий SDMA и MIMO-NOMA с целью работы в различных сценариях был предложен метод множественного доступа с разделением по скорости RSMA (Rate Splitting Multiple Access) [14–18]. Как и в случае NOMA, базовые работы, обосновывающие эффективность с точки зрения теории информации, появились десятилетия назад [15]. Новый интерес к RSMA возник в связи с развитием многоантенных систем и выбором множественного доступа для применения в 6G [17]. Метод RSMA основан на использовании

прекодирования MU-LP и гибким управлением интерференцией между пользователями за счет разделения сообщений абонентов на общую и приватную части. В зависимости от конфигурации системы и состояния канала передачи, RSMA может сводиться как к методу NOMA, так и к методу SDMA, и в некоторых случаях отличаться от них [18].

Несмотря на то, что вышло достаточно большое число работ, посвященных тематике RSMA, в большинстве из них рассматриваются идеализированные модели сигналов и каналов передачи [14–18]. Вышли публикации, рассматривающие специфические применения RSMA, например, в системах спутниковой связи [19], а также обзоры, рассматривающие широкий перечень проблем [14–16, 20]. В данной работе оценивается эффективность применения RSMA в наиболее реалистичных моделях каналов, соответствующих сценариям работы 6G, которые эмулируются с помощью инструмента QuaDRiGa (QUAsi Deterministic RadIo channel GenerAtor) [21]. QuDRiGA – стохастический эмулятор трехмерных MIMO каналов, учитывающий множество параметров распространения радиоволн и среды передачи сигналов. В [21] показано, что QuaDRiGa позволяет получать модели с характеристиками, близкими к реальным, измеренным в условиях городских макросотов. В последние годы появились работы, в которых рассматривается применение этого инструмента для оценки работы систем связи следующих поколений [22].

В данной статье описывается технология RSMA и ее математическая модель, приводятся схемы формирования и обработки сигналов на основе работ [14, 16–18]. Оценивается пропускная способность систем связи с RSMA в сравнении с системами на основе NOMA и SDMA в ходе анализа идеализированной схемы. Показаны сценарии, в которых RSMA сводится к NOMA и SDMA, а в каких имеет преимущество. Приводится оценка пропускной способности каналов связи с RSMA в сценарии, приближенном к 6G. Показано, что пропускная способность систем связи с RSMA превосходит описанные решения на основе NOMA и SDMA.

1. МНОЖЕСТВЕННЫЙ ДОСТУП С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПО СКОРОСТИ (RSMA)

Метод RSMA основан на идеи управления межпользовательской интерференцией в многоантенных многопользовательских системах MU-MIMO [16]. На рис. 1 приведена структурная схема системы связи с одним передатчиком и K приемниками, мультиплексируемыми по методу RSMA [18].

Для упрощения рассматривается система, в которой передатчик имеет M антенн, а каждый из приемников по одной антенне, что соответствует сценарию MISO (Multiple Input Single Output).

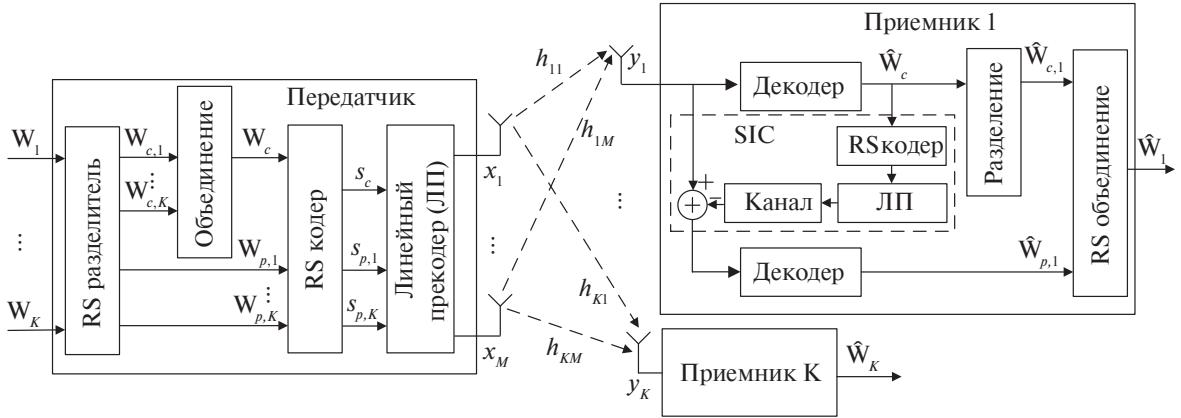


Рис. 1. Структурная схема системы связи с RSMA с одним передатчиком и K приемниками.

Подразумевается, что передача ведется на одной поднесущей, однако система может быть расширена для многочастотного сценария OFDM путем расширения всех рассматриваемых векторов в частотную область.

В передатчик поступают векторы (строки) битов сообщений $\mathbf{W}_1 \dots \mathbf{W}_K$, предназначенные K абонентам. Сообщения подразделяются на две части: общую $\mathbf{W}_{c,k}$ и приватную $\mathbf{W}_{p,k}$, $\mathbf{W}_k = [\mathbf{W}_{c,k} \ \mathbf{W}_{p,k}]$, $k = 1, \dots, K$. Приватная часть k -го сообщения на стороне приема декодируется только k -ым абонентом, в то время как общие части декодируются всеми абонентами. Общие части объединяются $\mathbf{W}_c = [\mathbf{W}_{c,1}, \dots, \mathbf{W}_{c,K}]$, однако возможно построение RSMA без их объединения [18]. В блоке RS кодера осуществляется отображение векторов сообщения в символы модуляции: $\mathbf{W}_c \rightarrow s_c$, $\mathbf{W}_{p,k} \rightarrow s_{p,k}$, $\mathbf{s} = [s_c, s_{p,1}, \dots, s_{p,K}]^T$, где T – знак транспонирования. В работе RS кодера может быть использована любая цифровая модуляция, например, QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Следующий за RS кодером линейный преокодер осуществляет пространственное разделение и управление мощностью потоков, используя любой метод MU LP, например, преокодирование с форсированием нуля ZF (Zero Forcing) [23]. Для этого, на основе информации о состоянии канала выбираются преокодирующие векторы $\mathbf{V}_1, \dots, \mathbf{V}_K, \mathbf{V}_c$. Для нормировки выполняются условия:

$$\mathbb{E}[\mathbf{s}^H \mathbf{s}] = \mathbf{I}, \quad (1)$$

$$P_c + \sum_{k=1}^K P_{p,k} \leq P_{\max}, \quad (2)$$

где \mathbb{E} – математическое ожидание, символ H обозначает операцию эрмитового сопряжения, \mathbf{I} – единичная диагональная матрица, $P_c = \|\mathbf{V}_c\|$, $P_{p,k} = \|\mathbf{V}_k\|$ – парциальные доли мощности общей и приватной составляющих сигнала, P_{\max} – максимальная излучаемая передатчиком мощность, тогда

отправляемый вектор $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_M]^T$ формируется следующим образом:

$$\mathbf{X} = \mathbf{V}_c s_c + \sum_{k=1}^K \mathbf{V}_k s_{p,k}. \quad (3)$$

Пусть $\mathbf{h}_k = [h_{k1}, \dots, h_{kM}]$ – матрица канальных коэффициентов, тогда сигнал в k -ом приемнике равен:

$$y_k = \mathbf{h}_k \mathbf{X} + n_k, \quad (4)$$

где n_k – отсчеты аддитивного шума, подчиненного комплексному нормальному распределению с нулевым средним и дисперсией σ^2 ($n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$).

Во всех K приемниках выполняется одинаковая последовательность операций обработки сигналов. На первом этапе декодируется общий символ модуляции и формируется оценка $\hat{\mathbf{W}}_c$, из которой выделяется предназначенная абоненту часть $\hat{\mathbf{W}}_{c,k}$. После этого реализуется алгоритм последовательного устранения помех SIC (Successive Interference Cancellation), который заключается в последовательном устранении интерференционных составляющих из принятого сигнала. Для этого RS кодер формирует восстановленный символ \hat{s}_c , который умножается на преокодирующий вектор \mathbf{V}_c , и далее, на оценку канальной матрицы $\hat{\mathbf{h}}_k$. Соответственно, сигнал на выходе блока SIC после вычитания примет значение:

$$\tilde{y}_k = y_k - \hat{\mathbf{h}}_k \mathbf{V}_c \hat{s}_c. \quad (5)$$

После этого оценка приватного сообщения k -го абонента $\hat{\mathbf{W}}_{p,k}$ формируется путем декодирования \tilde{y}_k . Полное сообщение k -го абонента получается путем объединения $\hat{\mathbf{W}}_k = [\hat{\mathbf{W}}_{c,k} \ \hat{\mathbf{W}}_{p,k}]$ в выходном блоке приемника.

Отметим, что последовательность операций формирования и обработки сигналов RSMA близка к схемам по методам SDMA и MU-MIMO-NOMA. Схема, приведенная на рис. 1, является

обобщением этих двух методов и соответствует им при следующих условиях.

1. В сценарии SDMA сообщения пользователей отображаются только в приватные символы, а общая часть отсутствует: $\mathbf{W}_k \rightarrow s_{p,k}$, $\mathbf{W}_{c,k} = \mathbf{W}_c = \emptyset$. Это приводит к тому, что в приемниках отсутствует блок SIC, а оценки $\hat{\mathbf{W}}_k$ получаются прямым путем после декодирования y_k .

2. В сценарии MIMO-NOMA пользователи группируются в кластеры с учетом степени коррелированности канальных матриц абонентов [13]. Если рассмотреть кластер из двух абонентов, то они получат порядковые номера исходя из условия $\|\hat{\mathbf{h}}_1\| \geq \|\hat{\mathbf{h}}_2\|$. Сообщение первого абонента отображается в приватную часть $\mathbf{W}_1 \rightarrow s_{p,1}$, сообщение второго в общую $\mathbf{W}_2 \rightarrow s_c$, а векторы $\mathbf{W}_{p,2} = \mathbf{W}_{c,1} = \emptyset$. В этом случае первый абонент выполняет описанную выше последовательность обработки сигналов с SIC, а второй декодирует только общее сообщение [13].

Таким образом, схема RSMA может сводиться к MU-MIMO и MU-MIMO-NOMA на этапе

разделения, кодирования сообщений и адаптивного управления мощностью общего и приватного потоков.

2. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМ СВЯЗИ С RSMA

Оценим пропускную способность системы связи с RSMA и сравним ее с SDMA, OMA и NOMA. Для этого рассмотрим упрощенный вариант реализации схемы RSMA, приведенной на рис. 2.

В этом сценарии рассматривается система связи, в которой одновременно мультиплексируется два абонента, $K = 2$, и передатчик имеет две антенны, $M = 2$, каждая из которых передает символ x_k , предназначенный k -му абоненту, где $k = 1, 2$.

Пусть абонентские каналы симметричны. В этом случае, согласно (3) и (4), коэффициент передачи прямого канала будет равен $h_d = \mathbf{H}_k \mathbf{V}_k$, а интерференционного канала $h_c = \mathbf{H}_k \mathbf{V}_c = \mathbf{H}_j \mathbf{V}_c$, $j = 1, 2, j \neq k$.

Тогда, с учетом (3) и (4), сигналы в приемниках будут равны:

$$\begin{cases} y_1 = h_d x_1 + h_c x_2 + n_1 = h_d P_p s_{p,1} + h_c P_p s_{p,2} + (h_d + h_c) P_c s_c + n_1, \\ y_2 = h_d x_2 + h_c x_1 + n_2 = h_d P_p s_{p,2} + h_c P_p s_{p,1} + (h_d + h_c) P_c s_c + n_2. \end{cases} \quad (6)$$

Формула Шеннона для оценки пропускной способности каналов передачи, нормированной на полосу используемых частот (спектральная эффективность), для одного абонента OMA примет вид:

$$R^{\text{OMA}} \leq 0.5 \log_2 \left(1 + \frac{|h_d|^2 P}{\sigma^2} \right), \quad (7)$$

где P – излучаемая мощность сигнала, σ^2 – мощность шума. Метод OMA подразумевает передачу сигналов через одну антенну одному абоненту, поэтому используется только прямой канал с коэффициентом h_d . В (7) перед логарифмом стоит множитель 0,5, обеспечивающий распределение временного (или частотного) ресурса между парой абонентов.

Пропускная способность абонента системы связи с RSMA состоит из половины пропускной способности общего R_c потока данных (поскольку в нем передаются данные обоих абонентов) и приватного R_p :

$$R^{\text{RSMA}} = \frac{R_c}{2} + R_p. \quad (8)$$

Примем допущения симметрии шумов в приемниках и излучаемой мощности: $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$, $P_{p,1} = P_{p,2} = P_p$. Тогда, учитывая, что символы поступают в приемник как через прямой, так и через

интерференционный каналы, и $s_{p,k}$ выступает в качестве помехи при декодировании s_c , для пропускной способности общего потока данных R_c справедливо выражение [18]:

$$R_c^{\text{RSMA}} \leq \log_2 \left[1 + \frac{(|h_c|^2 + |h_d|^2) P_c}{\sigma^2 + (|h_c|^2 + |h_d|^2) P_p} \right]. \quad (9)$$

Будем считать, что операция декодирования общего потока (алгоритм SIC) происходит без ошибок, тогда пропускная способность приватного канала определяется выражением [18]:

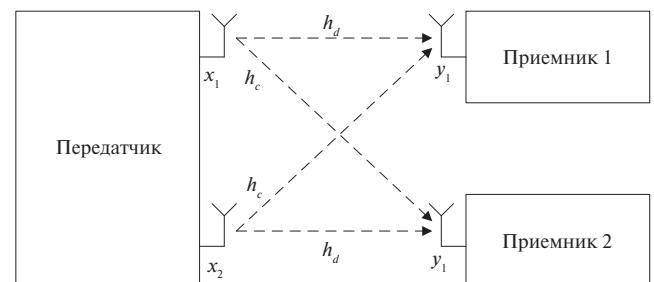


Рис. 2. Упрощенная схема системы связи на основе RSMA с двумя абонентами.

$$R_p^{\text{RSMA}} \leq \log_2 \left[1 + \frac{|\mathbf{h}_d|^2 P_p}{\sigma^2 + |\mathbf{h}_c|^2 P_p} \right]. \quad (10)$$

Для систем связи с SDMA отсутствует общий поток ($s_c = 0$, $P_p = P$), а пропускная способность одного канала определяется выражением [12]:

$$R^{\text{SDMA}} \leq \log_2 \left[1 + \frac{|\mathbf{h}_d|^2 P}{\sigma^2 + |\mathbf{h}_c|^2 P} \right]. \quad (11)$$

Наконец, для систем с NOMA поток первого абонента представляет приватную, а второго общую часть. Оба абонента мультиплексируются в рамках одного пространственного луча, то есть:

$$x^{\text{NOMA}} = P_p s_p + P_c s_c. \quad (12)$$

Тогда пропускная способность может быть оценена следующим образом [3]:

$$R^{\text{NOMA}} = R_1 + R_2, \quad (13)$$

$$R_1 \leq \log_2 \left[1 + \frac{|\mathbf{h}_d|^2 P_p}{\sigma^2} \right], \quad (14)$$

$$R_2 \leq \log_2 \left[1 + \frac{|\mathbf{h}_c|^2 P_c}{\sigma^2 + |\mathbf{h}_c|^2 P_p} \right]. \quad (15)$$

Как и в случае с RSMA, для NOMA принимается допущение о безошибочном выполнении алгоритма SIC.

На рис. 3 приведены графики зависимостей оценок среднего значения пропускных способностей R^{MD} для одного абонента систем связи с различными методами множественного доступа, построенные на основе выражений (7)–(15).

Распределение мощностей P_c^{MD} , P_d^{MD} для каждого из методов выполняется из условия максимизации пропускной способности:

$$[P_c^{\text{MD}}, P_d^{\text{MD}}] = \text{argmax} [R^{\text{MD}}(P_c^{\text{MD}}, P_d^{\text{MD}})]. \quad (16)$$

Оценки R^{MD} получены в зависимости от $|\mathbf{h}_c|^2$, $|\mathbf{h}_d|^2$ и P , что демонстрирует эффективность методов множественного доступа при работе в различных режимах интерференции между абонентскими каналами. В рассмотренных сценариях принимаются значения: $\sigma^2 = 1$, $P = 1000$, что соответствует случаю, когда отношение сигнал/шум составляет 30 дБ. Единицы измерения σ^2 и P намерено опущены.

На рис. 3 приводятся зависимости R^{MD} от $|\mathbf{h}_c|^2$ при $|\mathbf{h}_d|^2 = 1$, которые демонстрируют важные свойства RSMA, заключающиеся в следующем. В крайних режимах при малых ($< 10^{-3}$) и больших ($> 10^2$) значениях $|\mathbf{h}_c|^2$ пропускная способность R^{RSMA}

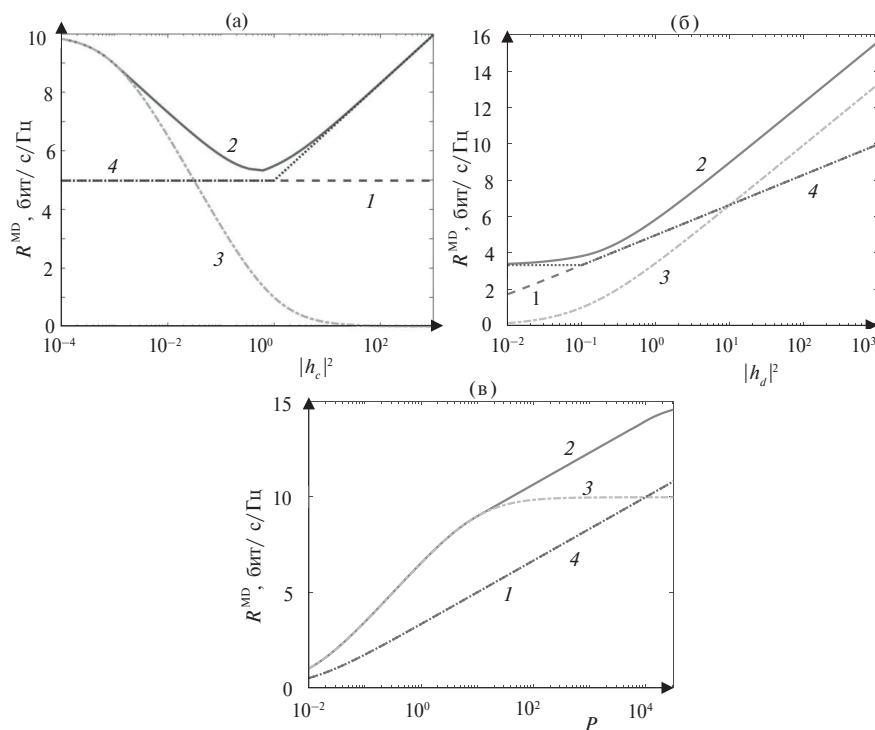


Рис. 3. Зависимости средних значений R^{MD} абонентов: а – от $|\mathbf{h}_c|^2$; б – от $|\mathbf{h}_d|^2$; в – от P для методов: OMA (1), RSMA (2), SDMA (3), NOMA (4).

сводится к R^{SDMA} и R^{NOMA} соответственно. Это достигается за счет адаптивного управления долями мощности P_c и P_p , выделяемых общему и приватному потокам данных. В результате, SDMA имеет преимущество над OMA и NOMA при малых $|h_c|^2$, что соответствует режиму низкой межпользовательской интерференции. NOMA напротив, способен превзойти SDMA и OMA при появлении интерференции. Этот сценарий соответствует коррелированным каналам MIMO и любым каналам SISO. OMA, который может быть реализован, например, с помощью SISO-OFDMA, предоставляет каждому абоненту лишь часть частотно-временных ресурсов и использует только прямой канал, за счет чего R^{OMA} не зависит от изменения h_c . Как следует из графиков рис. 3а, R^{RSMA} не уступает другим методам и способен превзойти их при значениях $10^{-3} < |h_c|^2 < 10$. Причина этого кроется в возможностях адаптивного управления интерференцией между абонентскими сигналами за счет перераспределения информации между общими и приватными потоками и выделения соответствующих доляй мощности.

На рис. 3б приводятся зависимости R^{MD} от $|h_d|^2$ при $|h_c|^2 = 0.1$. Из рисунка следует, что при малых значениях $|h_d|^2 < 10^{-1}$ SDMA проигрывает NOMA. RSMA за счет адаптивного перераспределения мощности между общим и приватным потоками превосходит NOMA даже при малых значениях $|h_d|^2$. Кроме того, RSMA при любых $|h_d|^2$ превосходит SDMA, а R^{RSMA} растет пропорционально R^{SDMA} . Это достигается благодаря использованию интерференционного канала, который для SDMA выступает в качестве неустранимой и неиспользуемой системной помехи.

На рис. 3в приводятся зависимости R^{MD} от P при $\sigma^2 = 1$, $|h_d|^2 = 10^2$, $|h_c|^2 = 0.1$. Видно, что при малых значениях $P < 10^4$ SDMA превосходит NOMA, однако при значении $P = 10^2$ рост R^{SDMA} прекращается, что связано с неустранимой интерференционной помехой общего канала. Начиная со значения $P = 10^4$ R^{NOMA} превосходит RSMA и продолжает увеличиваться с ростом P . Отметим, что R^{RSMA} при малых значениях P совпадает с R^{SDMA} , однако при увеличении P не прекращает свой рост, поскольку использует и детектирует интерференционный сигнал, распространяемый в общем канале.

Таким образом, как демонстрирует рис. 3, в зависимости от соотношения P , $|h_d|^2$ и $|h_c|^2$ R^{RSMA} не уступает другим R^{MD} и может их превосходить. Это достигается за счет совместного использования прямого и интерференционного канала и передачи по нему приватного и общего потоков. В зависимости от условий передачи RSMA адаптивно перераспределяет мощность между потоками и в предельных случаях может сводиться к сценариям NOMA и SDMA. Иными словами, можно считать, что

RSMA является надмножеством рассмотренных методов множественного доступа [14, 17, 18].

3. ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ В СЦЕНАРИЯХ 6G

Полученные выше теоретические границы пропускной способности не позволяют в полной мере оценить эффективность применения RSMA в сценариях реальной работы перспективных систем беспроводной мобильной связи. В этом разделе приведены результаты численного моделирования оценки пропускной способности с помощью инструмента QuaDRiGa – генератора импульсных характеристик MIMO каналов, основанного на стохастическом подходе и трехмерной геометрии [21]. Распространение сигнала через беспроводную среду моделируется с помощью взаимодействия электромагнитной волны с рассеивателями.

Параметры моделирования выбраны на основе анализа публикаций, посвященных концепции применения систем связи шестого поколения [1, 2], разработанных для них моделей каналов [25, 26], а также спецификации 3GPP 38.901 [27], описывающей каналы с частотами до 100 ГГц. В этой работе рассматривается сценарий работы городской макросоты, обслуживающей устройства, равномерно распределенные в радиусе 100 м. Это соответствует модели Urban Macro спецификации [27] и реализовано в соответствующем сценарии 3GPP_38.901_UMa QuaDRiGa. Пользователи разделены на кластеры по два абонента и мультиплексируются независимыми пространственными лучами. Каждое абонентское устройство имеет по одной антенне, что соответствует сценарию MISO. Последовательность формирования и обработки сигналов в каждом кластере выполняется по схеме, приведенной на рис. 1. Несущая частота составляет 100 ГГц, что соответствует субтерагерцовому диапазону и поддерживается QuaDRiGa. Полоса используемых частот составляет 400 МГц. Формирование прекодеров общих каналов \mathbf{V}_k выполняется согласно методу ZF [23]. Прекодер общего канала \mathbf{V}_c формируется на основе [28] и выполнения условия:

$$\max_{\mathbf{V}_c} \min \left(|\mathbf{h}_1 \mathbf{V}_c|^2, |\mathbf{h}_2 \mathbf{V}_c|^2 \right). \quad (17)$$

Распределение мощности между общим и приватным потоками осуществляется на основе выражения (16).

На рис. 4 приведены зависимости средних пропускных способностей одного абонента, мультиплексируемого SDMA и RSMA от отношения сигнал/шум (ОСШ = P/σ^2) в рамках описанного выше сценария.

Рисунок 4 подтверждает, что применение RSMA в сценарии работы макросоты субтерагерцового диапазона позволяет обеспечить большую пропускную способность абонентских каналов по сравнению с использованием SDMA. Выигрыш

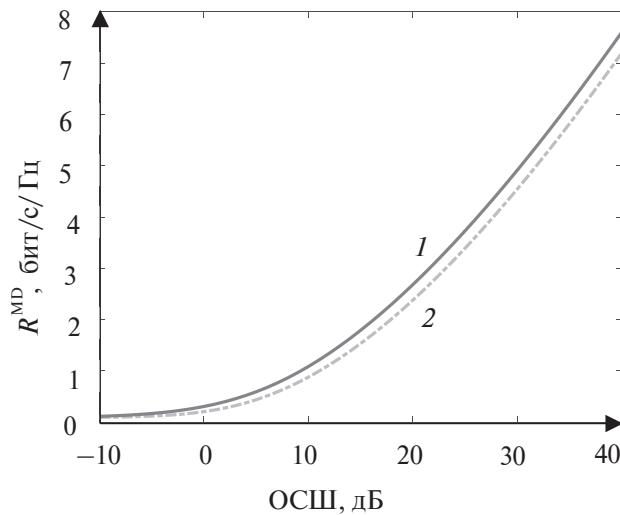


Рис. 4. Зависимости среднего значения R^MD от ОСШ для одного абонента системы связи с RSMA (1) и SDMA (2).

в нормированной пропускной способности (спектральной эффективности) в рассмотренном сценарии составляет до 0.4 бит/с/Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается метод множественного доступа с разделением абонентов по скорости RSMA. Метод основан на использовании подходов пространственного разделения абонентов с помощью цифрового преобразования и неортогонального множественного доступа с разделением по мощности. Идея RSMA заключается в разделении передаваемых сообщений на общую и приватную части. Приватная часть декодируется только тем абонентом, которому она предназначена. Общая часть декодируется всеми абонентами, каждому из которых предназначена ее доля. Общая и приватные части отображаются в отдельные символы, которые кодируются уникальными векторами и имеют свою долю излучаемой мощности, которая зависит от свойств пространственного канала. Таким образом, достигается адаптивное управление межабонентской интерференцией – в зависимости от свойств канальной матрицы она либо намерено вносится и декодируется в приемнике (подобно NOMA), либо минимизируется (подобно SDMA). Таким образом, RSMA является обобщением SDMA и NOMA, а его пропускная способность в некоторых условиях превосходит и никогда не уступает этим методам.

Полученные зависимости оценок пропускной способности от уровня излучаемой мощности, коэффициентов передачи прямого и интерференционного каналов для метода RSMA в сравнении с SDMA, NOMA и OMA демонстрируют сценарии,

в которых RSMA имеет выигрыш над указанными методами. Прежде всего это случай появления интерференционного пути распространения сигналов между абонентами, который возникает при корреляции канальных матриц. Используя это свойство и формируя прекодеры общего и приватных каналов и обеспечив оптимальное распределение мощности между ними, пропускная способность системы связи с RSMA превосходит SDMA, NOMA и OMA. Проведенное численное моделирование с помощью генератора канальных матриц QuaDRiGa в сценарии макросотов демонстрирует выигрыш в средней пропускной способности абонента RSMA до 0.4 бит/с/Гц над абонентом классического метода SDMA. Рассмотренный сценарий отражает характеристики каналов систем мобильной связи 6G. Таким образом, метод RSMA является перспективным для применения в системах связи следующих поколений.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10148, <https://rscf.ru/project/22-79-10148/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chowdhury M.Z., Shahjalal Md, Ahmed Sh., Jang Y.M. // IEEE Open J. Commun. Soc. 2020. V. 1. P. 957.
2. Покаместов Д.А., Крюков Я.В., Абенов Р.Р. и др. // РЭ. 2024. Т. 1. № 1. С. 33.
3. Saito Y., Kishiyama Y., Benjebbour A. et al. // Proc. 2013 IEEE77th Vehicular Technology Conf. (VTC Spring). Dresden. 2–5. Jun. N.Y.: IEEE, 2013. Paper No. 6692652.
4. Nikopour H., Baligh H. // Proc. 2013 IEEE24th Annual Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC). London. 8–11 Sept. N.Y.: IEEE, 2013. P. 332.
5. Chen S., Ren B., Gao Q. // IEEE Trans. 2016. V. VT-66. № 4. P. 3185.
6. Cover T. // IEEE Trans. 1972. V. IF-18. № 1. P. 2.
7. Kryukov Y.V., Pokamestov D.A., Rogozhnikov E.V. // Int. J. Commun. Systems. 2024. V. 37. № 2. P. 5642.
8. Pokamestov D.A., Kryukov Ya.V., Rogozhnikov E.V. et al. // Symmetry. 2022. V. 14. № 10. P. 2103.
9. Anwar A., Seet B.C., Hasan M.A., Li X.J. // Electronics. 2019. V. 8, № 11, P. 1355.
10. Liu Y., Zhang S., Mu X., Ding Z. et al. // IEEE J. Selected Areas in Commun. 2022. V. 40. № 4. P. 1037.

11. *Zeng M., Yada A., Dobre O.A., Tsiropoulos G.I., Poor H.V.* // IEEE Wireless Commun. Lett. 2017. V. 6. № 4. P. 534.
12. *Clerckx B., Mao Y., Schober R. et al.* // IEEE Open J. Commun. Soc. 2021. V. 2. P. 1310.
13. *Kimy B., Lim S., Kim H. et al.* // Proc. MILCOM 2013–2013 IEEE Military Commun. Conf. San Diego. 8–11 Nov. N.Y.: IEEE, 2013. P. 1278.
14. *Mao Y., Clerckx B., Li V.O.K.* // EURASIP J. Wireless Commun. and Networking. 2018. V. 2018. Article No. 133.
15. *Han T., Kobayashi K.* // IEEE Trans. 1981. V. IT-27. № 1. P. 49.
16. *Mao Y., Dizdar O., Clerckx B. et al.* // IEEE Commun. Surveys & Tutorials. 2022. V. 24. № 4. P. 2073.
17. *Dizdar O., Mao Y., Han W., Clerckx B.* // Proc. 2020 IEEE92nd Vehicular Technology Conf. (VTC2020-Fall). Victoria. 18 Nov.–16 Dec. N.Y.: IEEE, 2020. Paper No. 9348672.
18. *Clerckx B., Mao Y., Jorswieck E.A. et al.* // IEEE J. Selected Areas in Commun. 2023. V. 41. № 5. P. 1265.
19. *Schroeder A., Roeper M., Wuebben D. et al.* // Proc. 26th Int. ITG Workshop on Smart Antennas and 13th Conf. on Systems, Commun. and Coding). Braunschweig. 27 Feb. N.Y.: IEEE, 2023. P. 1.
20. *Chopra G.* // Proc. 2023 Int. Conf. on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI). Pune/ 0–03 Mar. N.Y.: IEEE, 2023. Paper No. 10100245
21. *Jaeckel S., Raschkowski L., Börner K., Thiele L.* // IEEE Trans. 2014. V. AP-62. № 6. P. 3242.
22. *Kumar J., Gupta A., Tanwar S., Khan M.K.* // Physical Commun. 2024. V. 67. Article No. 102488.
23. *Spencer Q.H., Swindlehurst A.L., Haardt M.* // IEEE Trans. 2004. V. SP-52. № 2. P. 461.
24. *Lee B., Shin W., Poor H.V.* // Proc. 2021 Int. Conf. on Information and Commun. Technology Convergence (ICTC). Jeju Island. 20–22 Oct. N.Y.: IEEE, 2021. P. 218.
25. *Jiang H., Mukherjee M., Zhou J., Lloret J.* // IEEE Network. 2020. V. 35. № 1. P. 296.
26. *Zhang J.H., Tang P., Yu L. et al.* // Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. 2020. V. 21. № 1. P. 39.
27. 5G. Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz. 3GPP Technical Report. 38.901 V. 17.1.0. 2024. Sophia Antipolis Cedex: ETSI, 2024. 99 p.
28. *Clerckx B., Mao Y., Schober R., Poor H.V.* // IEEE Wireless Commun. Lett. 2019. V. 9. № 3. P. 349.

EVALUATION OF THE CAPACITY OF RATE-SPLITTING MULTIPLE ACCESS COMMUNICATION SYSTEMS

© 2025 D. A. Pokamestov*, A. V. Filatov, Ya. V. Kryukov, A. S. Shinkevich,
G. N. Shalin, E. V. Rogozhnikov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
prosp. Lenina, 40, Tomsk, 634050 Russian Federation
*E-mail: dmaltomsk@mail.ru

Received March 13, 2024; revised December 6, 2024; accepted December 9, 2024

The Rate-Splitting Multiple Access (RSMA) method for multi-antenna communication systems is described. The sequence of operations for RSMA signal formation and processing is presented. RSMA usage scenarios in communication systems are considered, and the efficiency of this method is substantiated. Capacity estimates of the RSMA method are obtained in comparison with other multiple access methods. Numerical modeling of the average capacity per user is conducted using the QuaDRiGa tool. It is shown that RSMA achieves higher capacity compared to other multiple access methods used in multi-antenna communication systems.

Keywords: RSMA, multiple access, 6G, QuaDRiGa, capacity