

СХЕМЫ NOMA С ОБРАБОТКОЙ НА УРОВНЕ СИМВОЛОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-5-4-14

Бакулин Михаил Германович,
 Московский технический университет связи и информатики,
 Москва, Россия, m.g.bakulin@gmail.com

Бен Режеб Тауфик Бен Камель,
 Московский технический университет связи и информатики,
 Москва, Россия, benrejebt@yandex.ru

Крейнделин Виталий Борисович,
 Московский технический университет связи и информатики,
 Москва, Россия, vitkrend@gmail.com

Панкратов Денис Юрьевич,
 Московский технический университет связи и информатики,
 Москва, Россия, dpankr@mail.ru

Смирнов Алексей Эдуардович,
 Московский технический университет связи и информатики,
 Москва, Россия, smirnov.al.ed@gmail.com

Manuscript received 07 April 2022;

Accepted 28 April 2022

Ключевые слова: схемы NOMA, неортогональный множественный доступ, системы 5G, системы 6G, разделение по мощности, MUST, SCMA, PDMA, MUSA

Требования к ключевым показателям в будущих сетях беспроводной связи 6G существенно выше, чем в сетях 5G. В качестве решения для выполнения требований к сетям 6G и была предложена технология неортогонального множественного доступа (NOMA). Технология NOMA направлена на повышение спектральной эффективности систем беспроводной связи и обеспечения одновременной работы большого числа абонентов (особенно в сценариях mMTC) и обеспечения гибкого использования ресурсов. В статье рассматриваются недавно предложенные в рамках стандартизации 3GPP популярные схемы NOMA с обработкой на уровне символов, такие как SCMA, PDMA, WSMA, MUSA и другие разновидности NOMA. Иллюстрируются основные преимущества и принципы технологии неортогонального доступа на примере системы NOMA с разделением по мощности для восходящей и нисходящей линий связи. Анализируются характеристики различных схем NOMA с обработкой на уровне символов, их достоинства и недостатки, а также проблемы на пути их внедрения в будущих сетях беспроводной связи. Кроме того, в данной статье рассматриваются структурные схемы систем NOMA и математические модели, иллюстрирующие формирование групповых сигналов в таких системах. В заключение приводятся характеристики помехоустойчивости наиболее популярных схем NOMA с обработкой на уровне символов для разных коэффициентов загрузки системы. Из проведенного анализа следует, что еще не предложена схема NOMA, эффективная в разных сценариях будущих систем беспроводной связи и имеющая приемлемую сложностью обработки в сочетании с гибким распределением ресурсов для массового подключения абонентских устройств.

Информация об авторах:

Бакулин Михаил Германович, доцент, к.т.н., Московский технический университет связи и информатики, Москва, Москва, Россия
Бен Режеб Тауфик Бен Камель, доцент, к.т.н., Московский технический университет связи и информатики, Москва, Москва, Россия
Крейнделин Виталий Борисович, профессор, д.т.н., Московский технический университет связи и информатики, Москва, Москва, Россия
Панкратов Денис Юрьевич, доцент, к.т.н., Московский технический университет связи и информатики, Москва, Москва, Россия
Смирнов Алексей Эдуардович, доцент, к.т.н., Московский технический университет связи и информатики, Москва, Москва, Россия

Для цитирования:

Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Схемы NOMA с обработкой на уровне символов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №5. С. 4-14.

For citation:

Bakulin M.G., Ben Rejeb T.B.C., Kreyndelin V.B., Pankratov D.Y., Smirnov A.E. (2022) NOMA schemes with symbol level processing. T-Comm, vol. 16, no.5, pp. 4-14. (in Russian)

Введение

Технологии множественного доступа на протяжении всей истории развития систем радиосвязи являются их основой [1, 2, 3, 4]. Как известно, режим Интернета вещей (Internet of Things, IoT), в котором планируется подключение огромного количества абонентских устройств, уже является ключевым в последних версиях стандартов 3GPP, в будущих сетях 6G ожидается еще более масштабное применение этого режима [5, 6]. Поэтому решения, в основном, опирающиеся на технологии физического уровня, унаследованные от 4G LTE и использующие ортогональный множественный доступ (Orthogonal Multiple Access, OMA), являются неприемлемыми [4]. В сетях 6G в режиме IoT потребуется поддержка огромного количества соединений для различных услуг, что побуждает разработчиков к фундаментальным исследованиям, направленным на улучшение спектральной эффективности таких систем. Одной из ключевых технологий в этом направлении является неортогональный множественный доступ (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) [6].

В данной работе рассматриваются схемы NOMA с обработкой на уровне символов, предложенные в рамках Партнерского проекта 3GPP, их структурные схемы и характеристики, а также проблемы на пути к внедрению этих схем [7, 8, 9]. Технология NOMA имеет множество разновидностей, которые были предложены и развивались в рамках стандартизации 3GPP для систем 4G и 5G. Основной мотивацией развития NOMA являлось то, что в будущих системах беспроводной связи помимо использования новых частотных диапазонов (диапазоны миллиметровых волн), требовалось значительно увеличить скорость передачи данных до 10 Гбит/с и выше, а также обеспечить более эффективное использование спектра (десятки бит/с/Гц) [8, 9, 10].

В сетях 6G продолжится переход на более высокие частоты с более широкой полосой частот, учитывая, что спектр на более низких частотах почти исчерпан, планируется увеличить скорость передачи данных более чем в 10 раз по сравнению с 5G. Когда еще только начиналось развертывание сетей 5G, уже активно велись исследования по сетям 6G: несколько стран, в первую очередь, Финляндия, а также Китай и Южная Корея, взяли на себя эту инициативу, запустив программы по разработке сетей 6G [6].

В стандарте Международного Союза Электросвязи 2020 года (IMT 2020) предложены следующие три основных сценария использования сетей 5G: улучшенная мобильная широкополосная связь (eMBB), сверхнадежная связь с низкой задержкой (URLLC) и массовая машинная связь (mMTC) [4]. Теперь, когда сети 5G активно развертываются по всему миру, научные исследования фокусируются на сетях 6G, которые ожидаются к 2030 году [11]. В сетях 6G будут в полной мере реализованы сценарии сетей 5G, а также расширены их возможности и, соответственно, повышены требования.

Важным режимом в будущих сетях 6G будет так называемая «свободная» передача (Grant-free) [12], в котором сети 6G не будут строго ограничены количеством доступных ресурсов, а также детализацией их планирования. Режим передачи Grant-free станет более распространенным в 6G, в отличие от прошлых поколений сотовых сетей, в которых передача данных, в основном, основывалась на жестком

централизованном управлении. Поэтому для систем 6G потребуются усовершенствованные протоколы и подходы для обеспечения режима Grant-free. В этом аспекте технология NOMA является весьма привлекательной благодаря потенциальным возможностям смягчать влияние конфликтов при выделении ресурсов –одновременно обслуживать большое количество абонентских устройств и обеспечивать передачу данных с малыми задержками [8].

1. Концепция NOMA и преимущества неортогонального разделения абонентов

Технология неортогонального множественного доступа (NOMA) направлена на повышение спектральной эффективности систем беспроводной связи и обеспечения работы большого числа абонентских устройств, а также гибкого использования ресурсов [5, 13]. На протяжении десятков лет применяются системы радиосвязи с ортогональным разделением сигналов [1, 2, 3], при котором каждому абоненту выделяется свой ресурс в частотной или временной области. Однако ортогональный множественный доступ не позволяет выполнить требования будущих беспроводных сетей (после 5G), особенно для сценария mMTC, когда необходимо обеспечить массовое подключение абонентских устройств с высокой плотностью подключений на квадратный километр [6].

Принципы множественного доступа с временным (TDMA) и с частотным разделением (FDMA), а также неортогонального доступа с разделением по мощности (Power Domain NOMA, PD-NOMA) иллюстрируются на рисунке 1, где сигналы разных абонентов выделены разными цветами. Неортогональное распределение ресурсов позволяет существенно повысить емкость сетей беспроводной связи по сравнению с ортогональным доступом с фиксированным набором ресурсов, выделяемым конкретным абонентам. При использовании технологии NOMA система связи работает с повышенной загрузкой – одни и те же частотно-временные ресурсы назначаются разным абонентам. В результате спектральная эффективность такой системы оказывается намного выше, чем у системы с ортогональным распределением ресурсов, а помехоустойчивость ухудшается незначительно.

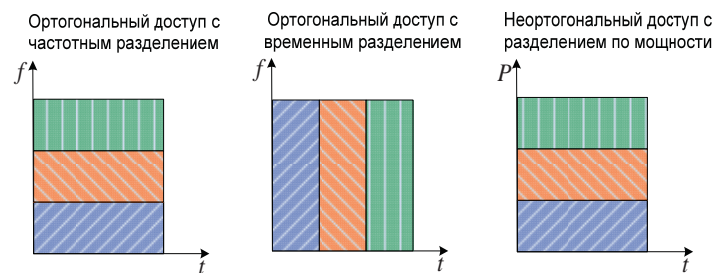


Рис. 1. Методы доступа с ортогональным частотным, ортогональным временным и неортогональным разделением ресурсов

Поясним принцип неортогонального распределения ресурсов на примере системы NOMA с разделением по мощности [12, 14]. В такой системе разделение сигналов абонентов осуществляется благодаря разной мощности, с которой эти сигналы K абонентов передаются по нисходящей линии связи (от базовой станции к абонентским станциям).

Распределение мощности осуществляется после помехоустойчивого кодирования и модуляции, затем сигналы суммируются и передаются по радиоканалу. Структурная схема такой системы NOMA иллюстрируется на рисунке 2.

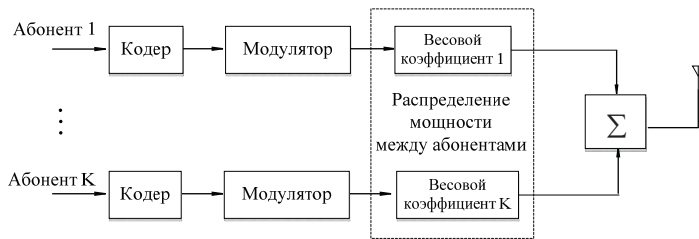


Рис. 2. Структурная схема передачи на нисходящей линии в схеме NOMA с разделением по мощности

Таким образом, в рассматриваемой системе NOMA все абоненты используют один и тот же частотно-временной ресурс, базовая станция передает сумму сигналов всех абонентов с разной мощностью, и каждый абонент принимает суммарный групповой сигнал. Математически сигнал на входе демодулятора первого абонента можно записать в следующем виде:

$$y_1 = (\sqrt{P_1}s_1 + \sqrt{P_2}s_2)h_1 + n_1, \quad (1)$$

где s_1 и s_2 – информационные символы двух абонентов, n_1 – шум в радиоканале для первого абонента, h_1 – комплексный коэффициент передачи по радиоканалу для первого абонента. Для рассматриваемого случая двух абонентов мощности передаваемых ими сигналов обозначены как P_1 и P_2 . Следует отметить, что для каждого абонента условия передачи по радиоканалу будут отличаться. Например, если второй абонент находится дальше от базовой станции, то для него выполняется неравенство $|h_2|^2 < |h_1|^2$.

Рассмотрим теперь передачу по восходящей линии связи, когда две абонентские станции передают сигналы одной базовой станции. Тогда сигнал на входе демодулятора базовой станции можно записать в следующем виде:

$$y_{BC} = \sqrt{P_1}s_1h_1 + \sqrt{P_2}s_2h_2 + n, \quad (2)$$

где n – шум в радиоканале для базовой станции, где s_1 и s_2 – информационные символы двух абонентов, h_1 и h_2 – комплексные коэффициенты передачи по радиоканалу для первого и второго абонента, соответственно. Поскольку используются одни и те же частотно-временные ресурсы, коэффициенты будут те же, что и для нисходящей линии (принцип взаимности). Предполагая, что $|h_2|^2 < |h_1|^2$, осуществляется естественное, за счет свойств радиоканала, разделение сигналов абонентов. Дополнительно мощность сигналов абонентов можно регулировать с помощью коэффициентов P_1 и P_2 [14].

На рисунке 3 приведен график зависимостей отношения сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) от параметра $\alpha = P_2 / P_1$ для коэффициента ошибок на кадр (Frame Error

Ration, FER) порядка 1% в системах NOMA и OMA. Значения этого параметра зависят от расстояния первого и второго абонентов от базовой станции. Близкие к 0,1 значения параметра α говорят о существенной разнице между мощностями абонентов, что соответствует сценарию, когда один абонент NOMA удален от базовой станции на такое же расстояние, что и абонент OMA, а другой абонент NOMA находится рядом с базовой станцией. Близкие к 1 значения параметра α говорят о небольшой разнице между мощностями абонентов, когда они примерно одинаково удалены от базовой станции, причем в этом сценарии для абонентов NOMA необходимы более высокие значения SNR для обеспечения требуемого значения FER. В результате в рассмотренной системе NOMA с разделением сигналов абонентов по мощности они используют один ресурсный блок как и в системе OMA, что позволяет увеличить суммарную скорость передачи системы в два раза.

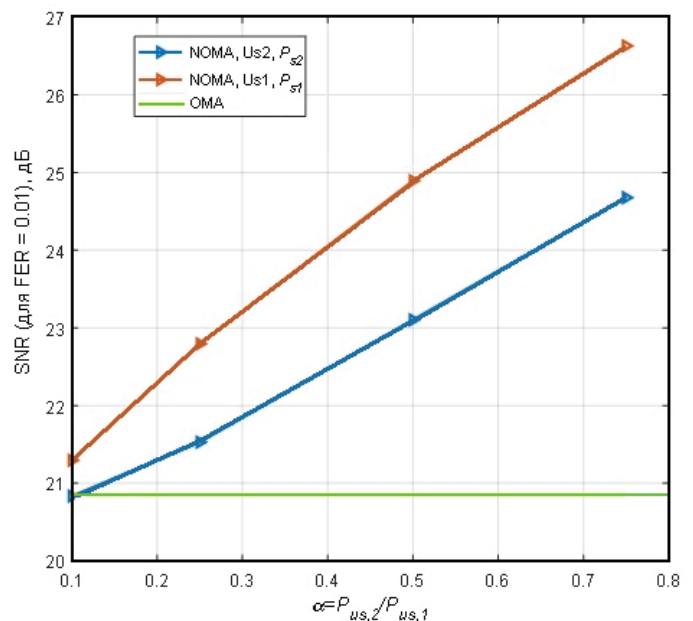


Рис. 3. Характеристики системы NOMA с разделением по мощности

2. Схемы NOMA в рамках стандартизации 3GPP

В рамках стандартизации 3GPP рассматривались и были включены в стандарты схемы неортогонального множественного доступа (NOMA), основанные на принципе суперпозиционного кодирования – так называемый совместный многопользовательский доступ (Multiuser Shared Access, MUST), Схема MUST фактически представляет собой схему разделения сигналов абонентов по мощности на уровне информационных символов, предназначенную для передачи по нисходящей линии связи (от базовой станции к абонентским станциям) [14, 15]. Передача по нисходящей линии связи с помощью схемы MUST иллюстрируется на рисунке 4.

Для восходящей линии связи рассмотрение технологии NOMA продолжается в рамках стандартизации 3GPP для систем 5G и 6G [9, 16]. Множество зарубежных компаний предложили свои разновидности NOMA, в том числе с обработкой на уровне символов.

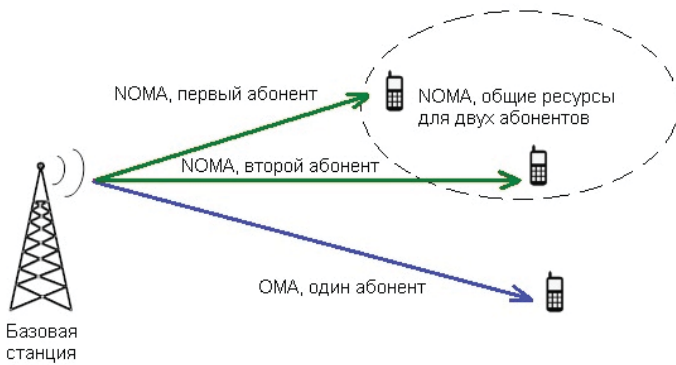


Рис. 4. Передача по нисходящей линии связи с помощью схемы MUST (для двух абонентов) и классическая однопользовательская передача

К таким схемам можно отнести многопользовательский совместный доступ (Multi-User Shared Access, MUSA) компании ZTE [18], множественный доступ с разреженными кодами (Sparse Code Multiple Access, SCMA) компании Huawei [19], множественный доступ с разделением по шаблонам (Pattern Division Multiple Access, PDMA) компании CATТ [17], множественный доступ с расширением ресурсов (Resource Spreading Multiple Access, RSMA) компании Qualcomm [20], Множественный доступ на основе последовательностей Велча (Welch Spreading Multiple Access, WSMA) компании Ericsson [21] и другие схемы. Отметим, что схема SCMA использует квадратурную амплитудную модуляцию с многомерными созвездиями, а схема PDMA является развитием SCMA и хорошо согласуется с другими схемами множественного доступа [17]. Схема MUSA предназначена прежде всего для поддержки масштабного подключения абонентских устройств в сценарии mMTC [12, 17].

Работа над NOMA в 3GPP для 5G была утверждена марте 2015 года и основывалась на предыдущих исследованиях для системы LTE-Advanced [22]. В рамках стандартизации 3GPP релиза 15 первой фазы стандарта NR (New Radio) было предложено порядка 15 схем NOMA, которые соответствуют общей структурной схеме NOMA, утвержденной еще в рамках стандартизации релиза 14 (см. рис. 5). Причем в этих схемах используется обработка на уровне битов и/или на уровне символов, включая кодовые книги, кодовые последовательности, перемежение, отображение с помощью шаблонов, разделение сигналов в пространственной области и в области мощности, а также другие особенности [23].

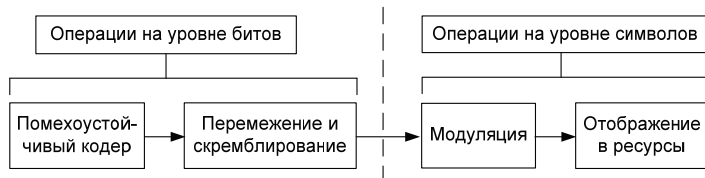


Рис. 5. Общая структурная схема передающей стороны различных схем NOMA для восходящей линии связи [22]

Предложения компании CATТ [24] содержат более подробную унифицированную структуру обработки на передающей стороне системы NOMA, а также схему PDMA с обработкой на уровне символов с различным порядком разнесения (diversity order).

В этом предложении указано, что схема NOMA при оптимизации шаблонов позволит обеспечить компромисс между загрузкой системы NOMA и сложностью обработки сигналов. В этом разделе остановимся кратко на особенностях обработки в общей схеме NOMA.

Согласно общей схеме NOMA, приведенной на рисунке 5, после помехоустойчивого кодирования с прямым исправлением ошибок данные сначала обрабатываются перемежителем и скремблером на уровне битов. Полученная битовая последовательность поступает на вход модулятора, после чего последовательность символов отображается в ресурсы и проходит процедуру модуляции с помощью технологии OFDM. Для всех предложенных схем NOMA операции помехоустойчивого кодирования и OFDM одинаковы. Как показано на рисунке 5, основные различия между схемами NOMA заключаются в следующих элементах: алгоритмы перемежения и скремблирования; формирование информационных символов; отображение символов в ресурсные элементы. В различных схемах NOMA могут настраиваться несколько или все из этих блоков. Таким образом, конкретные схемы NOMA описываются с помощью унифицированной структуры, которая представляет собой общую платформу для более детального понимания каждой схемы NOMA и ее преимуществ, что способствует дальнейшему развитию NOMA.

На приемной стороне в системе NOMA применяются различные алгоритмы многопользовательского приема, например, различные разновидности алгоритмов последовательного (Serial Interference Cancellation, SIC) и параллельного (Parallel Interference Cancellation, PIC) подавления помех, демодулятор, оптимальный по критерию минимума среднеквадратической ошибки (MMSE), и другие алгоритмы [10, 25, 26, 27]. В некоторых случаях возможно применение демодулятора, оптимального по критерию максимального правдоподобия, и его модификаций. Следует отметить, что сложность обработки во многом определяется структурой групповых сигналов NOMA и кодовых последовательностей. Применение так называемых разреженных сигналов позволяет упростить алгоритмы их приема [12].

3. Схемы NOMA с обработкой на уровне символов

В Отчете Рабочей группы по NOMA в рамках стандартизации 3GPP [16] многие разновидности NOMA включают в себя обработку на уровне информационных символов. Остановимся подробнее на этих разновидностях, которые отличаются способом формирования групповых сигналов NOMA после модулятора.

Рассмотрим схему NOMA с расширением и скремблированием на уровне символов, к которым относятся схема множественного доступа с расширением ресурсов (Resource Spreading Multiple Access, RSMA) компании Qualcomm [20]. Общая структура этих разновидностей NOMA представлена на рисунке 6.

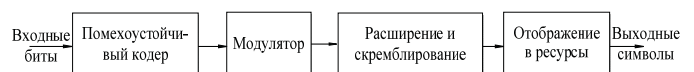


Рис. 6. Структура схем NOMA с использованием расширения и скремблирования на уровне символов

Особенностью схемы RSMA является то, что при расширении после модулятора для каждого символа используется индивидуальная короткая кодовая последовательность. Совместно с короткими расширяющими последовательностями для скремблирования используются длинные кодовые последовательности, построенные, например, на основе последовательностей Голда или Задова-Чу [12].

Похожей разновидностью NOMA является схема множественного доступа с последовательностями Велча (Welch Spreading Multiple Access, WSMA) компании Ericsson. В схеме WSMA после блока помехоустойчивого кодера может опционально осуществляться скремблирование на уровне битов. После квадратурной амплитудной модуляции (QAM) осуществляется расширение с помощью кодовых последовательностей и перемежение. Схема WSMA основана на применении коротких неортогональных кодовых последовательностей с низким уровнем взаимной корреляции, которые строятся с использованием границы Велча [21]:

$$B_{Welch} = K^2/N. \quad (3)$$

где K – максимальное число абонентов, N – длина кодовых последовательностей (число элементов), B_{Welch} – граница Велча. Формула (3) ограничивает суммарную корреляцию последовательностей абонентов в данном наборе последовательностей [30]. Суммарный групповой сигнал WSMA формируется на уровне символов – каждому абоненту назначается конкретная последовательность $\mathbf{s}_k, k=1, \dots, K$ из набора заранее сгенерированных последовательностей длины N , которые записываются в матрицу $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_K]$ размерности $N \times K$. При этом для суммы векторов в наборе и для каждого вектора по отдельности выполняется неравенство [30]:

$$\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K |\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_j|^2 \geq K^2/N, \quad \|\mathbf{s}_k\|^2 = \sum_{n=1}^N s_{k,n}^2 = 1. \quad (4)$$

Таким образом, векторы $\mathbf{s}_k, k=1, \dots, K$ из матрицы \mathbf{S} обладают определенными корреляционными свойствами. Векторы \mathbf{s}_k удовлетворяют формуле (3) не отдельно каждый, а все вместе, при этом множество таких кодовых последовательностей соответствует границе Велча.

Модель системы WSMA, в которой каждый из K абонентов одновременно передает QAM-модулированные символы $b_k, k=1, \dots, K$, базовой станции, можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \mathbf{s}_k \odot \mathbf{h}_k b_k + \mathbf{n}, \quad (5)$$

где \mathbf{y} – сигнал на входе демодулятора базовой станции размера N , $\{\mathbf{s}_k\}$ – множество кодовых последовательностей абонентов, \mathbf{h}_k – вектор коэффициентов передачи по радиоканалу между k -м абонентом и базовой станцией (зависит от числа ресурсных элементов), \mathbf{n} – вектор шума в канале связи размера N , N – число элементов принимаемого сигнала, символ « \odot » обозначает операцию поэлементного произведения векторов. С точки зрения производительности

системы NOMA предлагается совместно оптимизировать передачи для всех абонентских станций, а затем использовать совместный многопользовательский приемник [27, 28].

Следует также отметить, что возможно существование нескольких вариантов матрицы последовательностей \mathbf{S} , удовлетворяющих границе (3) и соответствующих выбранному критерию оптимизации. Обычно для оптимизации используют минимизацию суммарной корреляции между векторами множества \mathbf{S} , а также число абонентов WSMA. Число абонентов определяется коэффициентом загрузки, равном K/N . Для поддержки большого числа абонентов, существенно большего, чем в обычной системе OMA, этот коэффициент должен быть больше 100%.

В Приложении документа 3GPP [16] приведены способы формирования, а также примеры последовательностей WSMA с параметрами $N \times K$ для случаев 4×8 , 4×12 и 6×12 с коэффициентами загрузки K/N , равными 200%, 300% и 200%, соответственно. Благодаря хорошим характеристикам, схема WSMA является весьма привлекательной, если не учитывать сложности при использовании кодовых последовательностей Велча, которые не являются разреженными.

Обработка на передающей стороне может содержать применение новых видов модуляции вместо QAM, а также применение разреженных кодовых последовательностей для расширения на уровне символов. Одной из таких схем является схема SCMA [16], особенностью которой является применение иерархической модуляции и кодовых книг, что повышает сложность обработки. Однако, в отличие схемы WSMA, в SCMA используются так называемые разреженные кодовые последовательности (с большим числом нулевых элементов), которые формируются с помощью специальных шаблонов. Особенностью кодовых последовательностей SCMA является то, что в них число нулей должно быть одинаково. Например, для случая $K=6$ и $N=4$ шаблон SCMA может иметь следующий вид:

$$\mathbf{G}_{SCMA} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & & \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Шаблон (6) представляет собой матрицу отображения символов абонентов в ортогональные ресурсы (1 означает, что данный ресурс используется данным абонентом, а 0 – не используется). В этой матрице число строк равно числу элементов последовательностей, а число столбцов равно числу абонентов, причем коэффициент загрузки для этого случая, как нетрудно увидеть, равен 150% (несколько абонентов используют одни и те же ресурсы) [12, 19].

Усовершенствованием схемы SCMA можно считать схему PDMA, в которой не накладывается такого жесткого ограничения на число нулевых элементов в матрице шаблонов, как в SCMA [12, 17]. В документе [29] предложены шаблоны PDMA для разных коэффициентов загрузки системы NOMA. Возможны следующие шаблоны PDMA для разного числа абонентов и длины последовательностей:

$$\mathbf{G}_{PDMA}^{2 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G}_{PDMA}^{3 \times 6} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Первый шаблон $\mathbf{G}_{PDMA}^{2 \times 3}$ соответствует случаю 3 абонентов и загрузке 150%, а в случае $\mathbf{G}_{PDMA}^{3 \times 6}$ в системе PDMA работает 6 абонентов при загрузке 200%. Для построения таких неортогональных шаблонов может использоваться критерий минимизации помех между сигналами абонентов при достижении максимальной спектральной эффективности системы NOMA [12].

В рассмотренных выше схемах NOMA с кодовым разделением символы QAM могут расширяться с использованием последовательностей, предназначенных для получения требуемых корреляционных свойств. Различия между этими схемами заключаются в том, как строятся кодовые последовательности [31]. Приведем еще один пример кодовых последовательностей – для схемы MUSA, предложенной для стандарта 3GPP, для коэффициента расширения $N = 2$ и $K = 6$ активных абонентов [16]:

$$\mathbf{G}_{MUSA}^{2 \times 6} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & j & -j & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Из структуры $\mathbf{G}_{MUSA}^{2 \times 6}$ видно, что элементы последовательностей могут быть комплексными числами, например, из сигнальных созвездий QAM. При использовании комплексных последовательностей достигается лучшая степень разнесения сигналов абонентов и увеличивается загрузка системы. В случае $\mathbf{G}_{MUSA}^{2 \times 6}$ коэффициент загрузки составляет 300%.

4. Структурная схема и модель системы PDMA

Схема PDMA является весьма перспективной разновидностью NOMA, которая, благодаря универсальности шаблонов, позволяет формировать групповые сигналы абонентов в пространственной области, а также в частотной и во временной областях, и легко совмещающаяся с другими технологиями множественного доступа [12]. Рассмотрим подробнее структурную схему и модель системы PDMA [24].

На рисунках 7 и 8 показаны упрощенные структурные схемы системы PDMA для восходящей и нисходящей линий связи, в которой на стороне базовой станции и каждой абонентской станции используется одна антенна [17]. В качестве вторичной модуляции как на восходящей линии связи, так и нисходящей линии связи может использоваться модуляция OFDM.

Данные активных абонентов после помехоустойчивого кодирования отображаются в информационные символы x_k , $k = 1, \dots, K$ с модуляцией QAM, которые затем поступают на кодер PDMA.

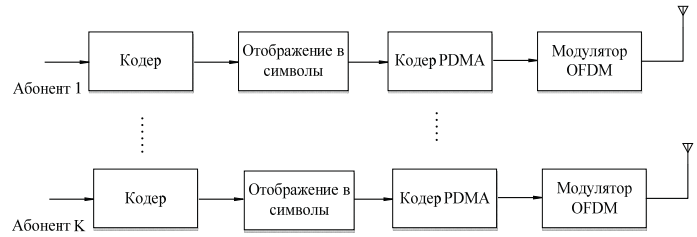


Рис. 7. Передатчик PDMA для восходящей линии связи

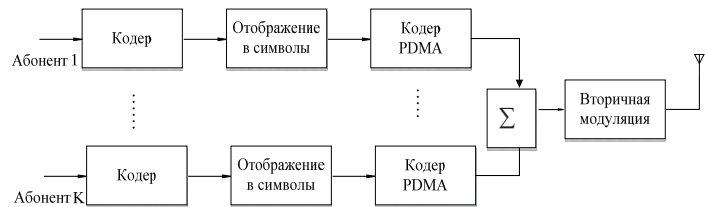


Рис. 8. Передатчик PDMA для нисходящей линии связи

В кодере PDMA с помощью шаблона PDMA символы отображаются в N ресурсных блоков и формируется вектор PDMA $\mathbf{g}_k x_k$, где $\mathbf{g}_k = [g_{1,k}, \dots, g_{N,k}]^T$, $k = 1, \dots, K$, а затем осуществляется вторичная модуляция и передача группового сигнала по радиоканалу. Для демодуляции группового сигнала могут использоваться многопользовательские демодуляторы [17, 25, 27].

Таким образом, в схеме PDMA по нисходящей линии связи сигналы абонентов сначала суммируются, а затем совместно передаются по радиоканалу всем абонентам. По восходящей линии связи одновременно передаются сигналы активных абонентов PDMA, причем их данные x_k отображаются в N ресурсных элементов с использованием векторов \mathbf{g}_k , $k = 1, \dots, K$. Вектор $\mathbf{g}_k x_k$, с модуляцией PDMA для k -го абонента формируется с помощью умножения QAM-символа на вектор \mathbf{g}_k размерности $N \times 1$ с элементами 0 или 1, где «0» означает, что соответствующий ресурсный элемент не используется данным абонентом (данные абонента в него не отображаются). Матрица PDMA состоит из векторов \mathbf{g}_k , $k = 1, \dots, K$, и имеет размерность $N \times K$:

$$\mathbf{G}_{PDMA} = [\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_K], \quad \mathbf{g}_k = [g_{1,k}, \dots, g_{N,k}]^T. \quad (9)$$

Передача по радиоканалу с использованием различных ресурсных элементов характеризуется матрицей канала, состоящей из векторов коэффициентов передачи по радиоканалу размера $N \times 1$ для абонентов PDMA:

$$\mathbf{H}_{PDMA} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K], \quad \mathbf{h}_k = [h_{1,k}, \dots, h_{N,k}]^T, \quad (10)$$

где \mathbf{h}_k – комплексный вектор размера $N \times 1$ коэффициентов передачи по радиоканалу $h_{n,k}$. Матрица канала \mathbf{H}_{PDMA} строится следующим образом: k -му абоненту и n -му ресурсному элементу соответствует коэффициент передачи по радиоканалу с индексом (n, k) .

С учетом введенных выше обозначений на вход демодулятора базовой станции на восходящей линии поступает векторный сигнал размера $N \times 1$, который может быть записан в следующем виде [24]:

$$\mathbf{y} = (\mathbf{H}_{PDMA} \odot \mathbf{G}_{PDMA}) \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (11)$$

где $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_K]^T$ – вектор QAM-символов размера $K \times 1$,

где $\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_N]^T$ – вектор шума в радиоканале размера $N \times 1$, символ « \odot » означает поэлементное умножение матриц. Таким образом, для передачи сигналов K активных абонентов совместно используются N ресурсных элементов.

Теперь проиллюстрируем формирование группового сигнала PDMA для 3 абонентов и 2 ресурсных блоков (загрузка 150%) на восходящей линии связи. Модель системы PDMA для шаблона $\mathbf{G}_{PDMA}^{2 \times 3}$ (см. формулу (7)) имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} & 0 \\ h_{2,1} & 0 & h_{2,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

В этом случае абоненты с номерами 1 и 2 совместно используют ресурс 1, а абоненты 2 и 3 совместно используют ресурс 2, причем разным абонентам выделено разное количество ресурсов, в отличие от схемы SCMA, в которой каждому абоненту выделяется одинаковое количество ресурсов (в частотно-временной области).

Шаблоны \mathbf{G}_{PDMA} генерируются заранее и хранятся на передающей и приемной сторонах. Модуляция PDMA осуществляется с помощью векторов \mathbf{g}_k из матрицы \mathbf{G}_{PDMA} на основе данных абонентов, при этом ненулевые элементы представляют собой элементы сигнального созвездия, например, на основе символов QAM [12, 16].

В схеме PDMA, как и в SCMA, используются неортогональные шаблоны, которые позволяют максимизировать разнесение и уменьшить перекрытие сигналов пользователей, при этом мультиплексирование сигналов абонентов PDMA может осуществляться более гибко. Сравнивая структурные схемы PDMA и SCMA, можно сказать, что в схеме PDMA не используются сложные многомерные созвездия и сложные кодовые книги, как в схеме SCMA. На приемной стороне системы PDMA могут использоваться схожие, но менее сложные многопользовательские демодуляторы (например, SIC и другие алгоритмы) [8, 25, 26, 27].

5. Характеристики схем NOMA

Рассмотрим характеристики основных схем NOMA с обработкой на уровне символов для восходящей линии связи: сравним эти схемы с точки зрения коэффициента ошибочных блоков (Block Error Ratio, BLER) для различной загрузки системы NOMA и разных значений отношения сигнал/шум (SNR). На рисунке 9 представлены результаты моделирования схемы PDMA для случая $K = 3$ активных абонентов, которые совместно используют 6 ресурсных блоков

[12]. Загрузка системы PDMA составляет 150% и спектральная эффективность для каждого абонента составляет 0.5 бит/с/Гц [12]. В схеме OMA, характеристики которой также представлены на графике (рис. 9), работает два абонента, каждый из которых занимает три ресурсных блока без перекрытия сигналов, при этом спектральная эффективность каждого абонента составляет 0,5 бит/с/Гц.

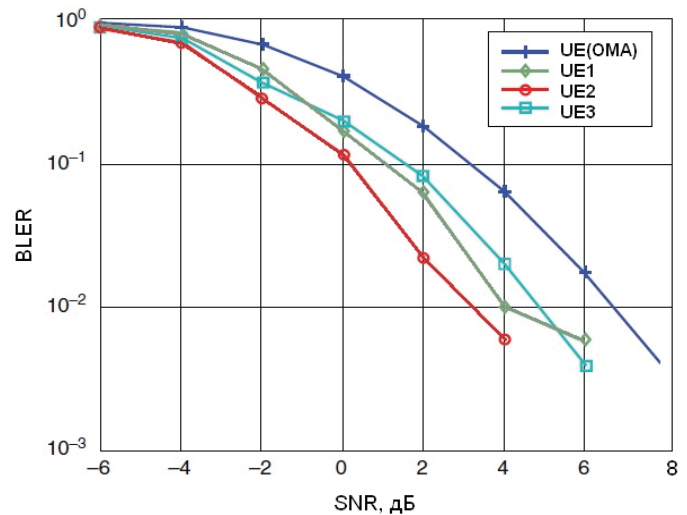


Рис. 9. Характеристики схемы PDMA [12]

Из рисунка 9 видно, что схема PDMA по сравнению с OMA обеспечивает меньший коэффициент BLER для каждого абонента за счет разнесения, обеспечиваемого модуляцией PDMA. При BLER порядка 0.01 энергетический выигрыш PDMA составляет примерно 2-3,5 дБ. Кроме того, в системе PDMA при том же количестве ресурсов поддерживается намного больше абонентов, чем при ортогональном доступе.

Характеристики BLER для системы SCMA для различной загрузки показаны на рисунке 10. В этой системе коэффициенты загрузки равны 100%, 150%, 200% и 300%, что соответствует 2, 3, 4 и 6 абонентам, соответственно. Спектральная эффективность каждого абонента составляет 0,5 бит/с/Гц при общем числе ресурсных блоков, равном 12. Для получения этих характеристик использовалась модуляция QPSK, турбокодирование со скоростью 1/2, несущая частота составляла 2 ГГц.

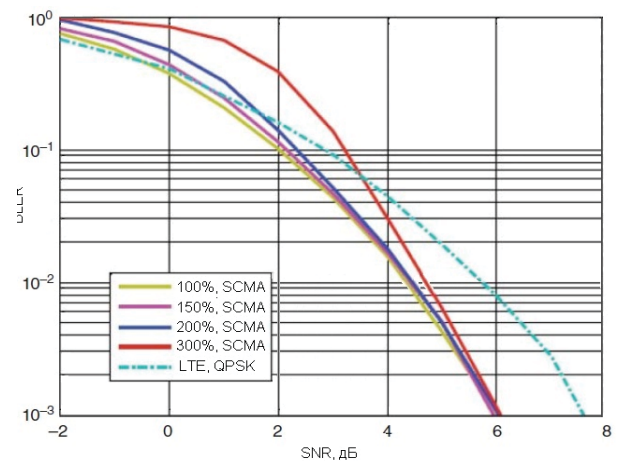


Рис. 10. Характеристики системы SCMA [12]

В рассматриваемом сценарии мобильной связи использовалась модель быстрых замираний в городе, в которой среднее значение SNR было примерно одинаковое для разных абонентов [12]. Для сравнения на рисунке 10 построена кривая BLER для системы LTE (на основе схемы доступа OFDMA) с двумя активными абонентами, каждый из которых занимает по 6 ресурсных блоков (спектральная эффективность составляет 0.5 бит/с/Гц на абонента, вместе они используют 12 ресурсных блоков).

Из рисунка 10 видно, что энергетический выигрыш в системе SCMA при загрузке 150% по сравнению с системой OMA на основе LTE составляет более 1 дБ по уровню BLER порядка 0,01. При увеличении загрузки характеристики для схемы SCMA ухудшаются, но даже при загрузке 300% они остаются лучше, чем в системе OMA.

Следует отметить, что в LTE применяется технология автоматического запроса на повторную передачу пакетов данных (Automatic Repeat Request ARQ), которая вносит задержки при декодировании пакетов. Технология NOMA позволяет снизить задержки при передаче пакетов, что важно для сценариев mMTC. Кроме того, по предварительным оценкам [12], в системе NOMA (на основе SCMA) число активных абонентских устройств может быть увеличено с 68 до 270 по сравнению с OMA (на основе OFDMA).

Теперь рассмотрим характеристики схемы MUSA, представленные на рисунке 11, для коэффициентов загрузки от 100% до 500% и сценария использования 12 ресурсных блоков для различного числа активных абонентов (от 4 до 20 абонентов). Напомним, что в этой схеме NOMA используются комплексные кодовые последовательности, характеристики получены для последовательностей с базой $N=4$. Для случая 12 абонентов спектральная эффективность каждого абонента составляет 0,25 бит/с/Гц.

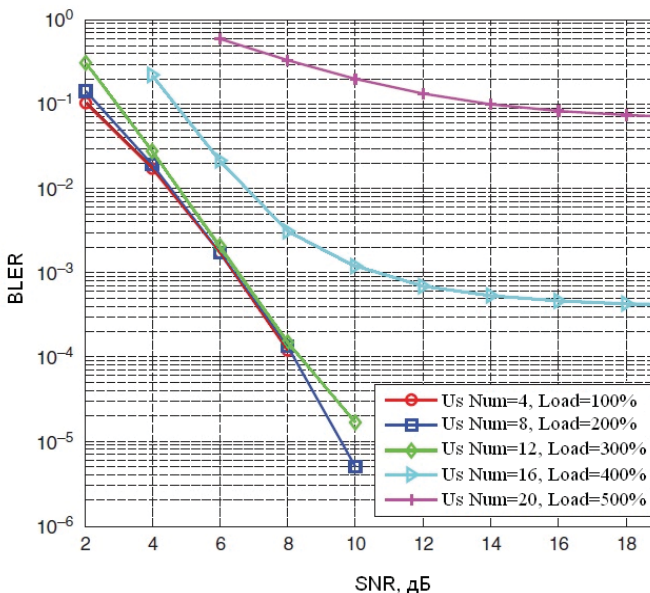


Рис. 11. Характеристики системы MUSA [12]

На рисунке 11 представлены характеристики BLER, построенные в диапазоне значений отношения сигнал/шум (SNR) от 2 до 18 дБ. При увеличении загрузки с 200% до 300% помехоустойчивость системы MUSA почти не ухудшается, а при увеличении загрузки с 300% до 400% – ухуд-

шается на порядок. При сравнении схем MUSA и SCMA их суммарная спектральная эффективность для всех абонентов составляет порядка 3 бит/с/Гц при загрузке 300% (при значениях SNR на уровне 5дБ). По предварительным оценкам число абонентов MUSA будет несколько больше (300 по сравнению с 270) в рассматриваемых сценариях [12, 18]. Дополнительное повышение эффективности передачи по восходящей линии связи ожидается получить с помощью совмещения этих схем NOMA и технологии MIMO, являющейся одной из основных технологий в современных системах беспроводной связи [8, 10, 11, 27].

Выводы

Неортогональный множественный доступ (NOMA) позволяет обеспечить дальнейшее совершенствование систем беспроводной связи последующих поколений, в которых планируется массовое подключение абонентских устройств в режиме Интернета вещей (IoT) в сценариях массовых межмашинных соединений (mMTC). В полной мере эти сценарии будут реализованы в сетях беспроводной связи будущих поколений, поскольку технология NOMA еще не внедрена в системах 5G.

Препятствием к внедрению технологии NOMA являются проблемы сложности обработки групповых сигналов NOMA. В этой связи весьма перспективными являются схемы NOMA с обработкой на уровне символов. Основные достоинства и недостатки наиболее перспективных из рассмотренных схем NOMA следующие.

- Схема MUST, с разделением по мощности на уровне символов, позволяет существенно повысить спектральную эффективность систем беспроводной связи с ортогональным доступом, но она разработана только для нисходящей линии связи и небольшой загрузки системы.

- Схема SCMA предназначена для восходящей линии связи, однако в ней используются сложные кодовые книги и сигнально-кодовые конструкции, оптимизированные для определенных шаблонов формирования групповых сигналов NOMA и алгоритмов обработки сигналов с высокой сложностью.

- Схема MUSA также предназначена для восходящей линии связи и превосходит SCMA по числу абонентов при той же помехоустойчивости и спектральной эффективности, однако хорошие характеристики MUSA обеспечиваются в условиях, когда мощности сигналов абонентов существенно различаются. В схеме MUSA используются комплексные кодовые последовательности, что обеспечивает дополнительную «степень свободы» (загрузка системы может составлять до 500%), но при этом существенно усложняется обработка сигналов и снижается помехоустойчивость.

- Схема PDMA работает как в восходящем, так и в нисходящем направлении и является наиболее перспективной с точки зрения гибкости распределения ресурсов и совмещения с другими схемами множественного доступа. В PDMA, в отличие от SCMA, разным абонентам может быть выделено разное количество ресурсных блоков, однако эта схема требует более сложной оптимизации алгоритмов формирования и обработки групповых сигналов.

Из проведенного анализа схем NOMA и их характеристик следует, что пока еще не предложена универсальная

схема NOMA для применения в разных сценариях 5G и будущих систем беспроводной связи, с приемлемой сложностью обработки и гибким распределением ресурсов. Для решения этой задачи необходима совместная оптимизация как алгоритмов формирования групповых сигналов, так и алгоритмов многопользовательского приема, в том числе на основе алгоритмов MMSE, PIC и SIC, а также их совмещение с технологией MIMO.

Работа подготовлена на основе научных исследований, выполненных при финансовой поддержке Минцифры России в рамках государственного контракта от 26.02.2021 № ПЗЗ-1-26/8 «Развитие новой технологии неортогонального доступа (NOMA) и ее использование совместно с технологией MIMO для перспективных систем связи 6G» (шифр «MIMO-NOMA»).

Литература

1. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений Изд. 2-е, переработанное, дополненное. М.: Сов. радио, 1970.
2. Варакин Л.Е. и др. CDMA: прошлое, настоящее, будущее. Под ред. Л.Е. Варакина, Ю.С. Шинакова. М.: Междунар. акад. связи, 2003.
3. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П. Проблемы и методы повышения спектральной эффективности систем связи: ортогональная передача // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 2. С. 22-33.
4. Ding Z. et al. Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks // IEEE Commun. Mag., Vol. 55, No. 2, pp. 185-191, Feb. 2017.
5. Liu Y. et al. Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond // in Proceedings of the IEEE, Vol. 105, No. 12, pp. 2347-2381, Dec. 2017.
6. Yifei Yuan et al. NOMA for 6G massive IoT // Preprint, accepted by IEEE Communications Magazine, Apr. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/350835377_NOMA_for_6G_massive_IoT_COMMAG_arXiv_CSIT210404911 (дата обращения: 6.01.2022)
7. Wang P. et al. Comparison of orthogonal and nonorthogonal approaches to future wireless cellular systems // IEEE Veh. Technol. Mag., Vol. 1, № 3, pp. 4–11, Sep. 2006.
8. Dai L., Wang B., Ding Z., Wang Z., Chen S., Hanzo L. A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G // IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 3, 2018, pp. 2294-2323.
9. Yuan Y., Yan C. NOMA study in 3GPP for 5G // Proc. IEEE ISTC, Hong Kong, Dec. 2018, pp. 1-5.
10. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Технологии в системах радиосвязи на пути к 5G. М.: Горячая линия-Телеком, 2018.
11. Akhtar M.W. et al. The shift to 6G communications: vision and requirements // Human-centric Computing and Information Sciences, 10, 2020.
12. Fa-Long Luo et al. Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations, Wiley-IEEE Press, 2016.
13. Han S. et al. Energy Efficiency and Spectrum Efficiency Co-Design: From NOMA to Network NOMA // IEEE Multimedia Commun. Technical Committee E-Letter, vol. 9, no. 5, 2014, pp. 21–22.
14. S.M. Riazul Islam, Nurilla Avazov, Octavia A. Dobre, Kyung-Sup Kwak. Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 2, pp. 721-742, 2017.
15. Lee H. et al. Multiuser superposition transmission (MUST) for LTE-A systems // IEEE Proc. of Inter. Commun. Conf. (ICC), May 2016, pp. 1-6.
16. 3GPP TR 38.812, Technical Report, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for NR (Release 16), 2018.
17. Chen S. et al. Pattern division multiple access PDMA – A novel non-orthogonal multiple access for 5G radio networks // IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 66, № 99, pp. 1-1, 2016.
18. Yuan Z. et al. Multi-user shared access for internet of things // IEEE Proc. of Veh. Technol. Conf. (VTC), 2016.
19. Nikopour H., Balth H. Sparse code multiple access // IEEE Proc. of Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. (PIMRC), Sep. 2013, pp. 332-336.
20. 3GPP, R1-164688, Resource Spread Multiple Access, Qualcomm, May 2016.
21. 3GPP, R1-1805003, Signatu Design for NOMA, Ericsson, April, 2018.
22. RP-17082 New Study Item proposal: Study on Non-orthogonal Multiple Access for NR, ZTE, CATT, Intel, Samsung, RAN#75.
23. R1-1800293, Discussion on R1-15 NOMA study item, CATT, 3GPP RAN1#AH1801.
24. 3GPP R1-1801753, NOMA transmitter side signal processing, CATT, Athens, Greece, February 26th – March 2nd, 2018.
25. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Новый подход к задачам MIMO-детектирования и многопользовательской демодуляции // Информационные процессы. 2021. Т. 21. № 2. С. 93-107.
26. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Смирнов А.Э. Снижение вычислительной сложности детектирования сигнала в системах MIMO // Электросвязь. 2021. № 3. С. 22-27.
27. Бен Режеб Т.Б.К., Смирнов А.Э. Эффективность методов демодуляции сигналов в системах связи с большим количеством антенн // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. – 2015. Т. 5. № 3. С. 254-258.
28. 3GPP R1-1805004, Receiver design for NOMA, Ericsson, April 2018.
29. 3GPP R1-1803770, PDMA transmitter side signal processing, CATT, Sanya, China, April 16th – April 20th, 2018.
30. Behrooz Makki, Krishna Chitti, Ali Behravan, Mohamed-Slim Alouini. A Survey of NOMA: Current Status and Open Research Challenges // IEEE Open Journal of the Communications Society, Vol. 1, pp. 179-189, 2020.
31. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. Технология NOMA с кодовым разделением в 3GPP: 5G или 6G? // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 1. С. 4-14. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-1-4-14

NOMA SCHEMES WITH SYMBOL LEVEL PROCESSING

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

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

Vitaly B. Kreyndelin, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia,
vitkrend@gmail.com

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

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

Abstract

Requirements for KPI in 6G networks are significantly higher than in 5G networks. Non-orthogonal multiple access (NOMA) technology has been proposed as a solution to meet the requirements of future communication networks. NOMA technology aims to improve the spectral efficiency of wireless communication systems and support the simultaneous operation of large number of subscribers (especially in mMTC scenarios) and provide flexible resource use. This article discusses the popular symbol-level processing NOMA schemes recently proposed as part of the 3GPP standardization, such as SCMA, PDMA, WSMA, MUSA, and other varieties of NOMA. The main advantages and principles of non-orthogonal access technology are illustrated using the NOMA system with division in power domain (PD-NOMA) for uplink and downlink. Characteristics of various symbol-level processing NOMA schemes, their advantages and disadvantages, as well as problems in the way of their implementation in future wireless networks are analyzed. In addition, this article discusses block diagrams of NOMA systems and mathematical models illustrating the formation of baseband signals in such systems. In conclusion, the noise immunity characteristics of the most popular NOMA schemes with symbol-level processing are given for various loading factors. From the analysis performed, it follows that no NOMA scheme has yet been proposed that is effective in various scenarios of future wireless communication systems and has an acceptable processing complexity in combination with flexible resource allocation for mass connection of subscriber devices.

Keywords: NOMA schemes, Non-Orthogonal Multiple Access, 5G, 6G, power domain NOMA, MUST, SCMA, PDMA, MUSA

References

1. L. Fink (1970). The Theory of Transmission of Discrete Messages Ed. 2nd, revised, enlarged. Moscow, Sov. Radio, (in Russian)
2. L. Varakin (1985). Communication Systems with Noise-Like Signals. Moscow, Radio and communication, (in Russian)
3. Bakulin M.G, Kreyndelin V.B., Shumov A.P. (2014) Problems and methods of communication systems spectral efficiency increasing: orthogonal transmission. *DSPA*, 2014, no. 2, pp. 22-33. (in Russian)
4. Z. Ding et al. (2017), "Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 55, No. 2, pp. 185-191, Feb. 2017.
5. Y. Liu et al. (2017), "Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 105, No. 12, pp. 2347-2381, Dec. 2017.
6. Yifei Yuan et al. (2021), "NOMA for 6G massive IoT", *Preprint, accepted by IEEE Communications Magazine*, Apr. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/350835377_NOMA_for_6G_massive_IoT_COMMAG_arXiv_CSIT210404911 (date of access: 6.01.2022).
7. P. Wang et al. (2006), "Comparison of orthogonal and nonorthogonal approaches to future wireless cellular systems," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Vol. 1, № 3, pp. 4-11, Sep. 2006.
8. L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen and L. Hanzo (2018), "A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2294-2323.
9. Y. Yuan and C. Yan (2018), "NOMA study in 3GPP for 5G," *Proc. IEEE ISTC*, Hong Kong, Dec. 2018, pp. 1-5.
10. M. Bakulin, V. Kreindelin, D. Pankratov (2018). Technologies in Radio Communication Systems on the Way to 5G. Moscow: Hotline-Telecom. (in Russian)
11. Akhtar, M.W. et al. (2016) "The shift to 6G communications: vision and requirements". *Human-centric Computing and Information Sciences*, no. 10.
12. Fa-Long Luo et al. (2016). Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations., Wiley-IEEE Press.
13. S. Han et al. (2014), "Energy Efficiency and Spectrum Efficiency Co-Design: From NOMA to Network NOMA," *IEEE Multimedia Commun. Technical Committee E-Letter*, vol. 9, no. 5, pp. 21-22.
14. S.M. Riazul Islam, Nurilla Avazov, Octavia A. Dobre, and Kyung-Sup Kwak (2017). "Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 721-742.
15. H. Lee et al. (2016), "Multiuser superposition transmission (MUST) for LTE-A systems," *IEEE Proc. of Inter. Commun. Conf. (ICC)*, May 2016, pp. 1-6.

16. 3GPP TR 38.812, Technical Report, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for NR (Release 16), 2018.
17. S. Chen et al. (2016), "Pattern division multiple access PDMA – A novel non-orthogonal multiple access for 5G radio networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 66, № 99, pp. 1-1.
18. Z. Yuan et al. (2016), "Multi-user shared access for internet of things," *IEEE Proc. of Veh. Technol. Conf. (VTC)*.
19. H. Nikopour and H. Baligh (2013), "Sparse code multiple access," *IEEE Proc. of Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, Sep. 2013, pp. 332-336.
20. 3GPP, R1-164688, Resource Spread Multiple Access, Qualcomm, May 2016.
21. 3GPP, R1-1805003, Signature Design for NOMA, Ericsson, April, 2018.
22. RP-170829, New Study Item proposal: Study on Non-orthogonal Multiple Access for NR, ZTE, CATT, Intel, Samsung, RAN#75
23. R1-1800293, Discussion on Rel-15 NOMA study item, CATT, 3GPP RAN1#AH1801.
24. 3GPP R1-1801753, NOMA transmitter side signal processing, CATT, Athens, Greece, February 26th - March 2nd, 2018.
25. M.G. Bakulin, V.B. Kreyndelin, D.Yu. Pankratov, A.G. Stepanova (2021). New approach for MIMO detection and multi-user demodulation. *Journal of Information Processes (JIP)*, vol. 21, vol. 2, pp. 93-107. (in Russian)
26. M.G. Bakulin, T.B.C. Ben Rejeb, V.B. Kreyndelin, A.E. Smirnov (2021). Reducing the computational complexity of signal detection in MIMO systems. *Electrosvyaz*, 2021, no. 3, pp. 22-27. (in Russian)
27. Ben Rejeb T.B.C., Smirnov A.E. (2015). BER performance of different detection methods in massive MIMO communication systems. *REDS*, vol. 5, no. 3, pp. 254-258. (in Russian)
28. 3GPP R1-1805004, Receiver design for NOMA, Ericsson, April 2018.
29. 3GPP R1-1803770, PDMA transmitter side signal processing, CATT, Sanya, China, April 16th - April 20th, 2018.
30. Behrooz Makki, Krishna Chitti, Ali Behravan, Mohamed-Slim Alouini (2020). "A Survey of NOMA: Current Status and Open Research Challenges," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, Vol. 1, pp. 179-189.
31. M.G. Bakulin, T.B.C. Ben Rejeb, V.B. Kreyndelin, D.Y. Pankratov, A.E. Smirnov (2022). Code domain NOMA in 3GPP specifications: 5G or 6G? *T-Comm*, vol. 16, no. 1, pp. 4-14. (in Russian)

Information about authors:

Mikhail G. Bakulin, PhD, associate Professor, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia

Ben Rejeb Taoufik Ben Camille, Ph.D, associate Professor, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia

Vitaly B. Kreyndelin, Doctor of technical science, Professor, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia

Denis Y. Pankratov, PhD, associate Professor, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia

Alexey E. Smirnov, PhD, associate Professor, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia