

ТЕХНОЛОГИЯ NOMA С КODOVЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ В 3GPP: 5G ИЛИ 6G?

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-1-4-14

Бакулин Михаил Германович,
МТУСИ, Москва, Россия, m.g.bakulin@gmail.com

Бен Режеб Тауфик Бен Камель,
МТУСИ, Москва, Россия, benrejebt@yandex.ru

Крейнделин Виталий Борисович,
МТУСИ, Москва, Россия, vitkrend@gmail.com

Панкратов Денис Юрьевич,
МТУСИ, Москва, Россия, dpankr@mail.ru

Смирнов Алексей Эдуардович,
МТУСИ, Москва, Россия, smirnov.al.ed@gmail.com

Manuscript received 11 October 2021;
Accepted 22 November 2021

Ключевые слова: множественный доступ, технология NOMA, стандартизация 3GPP, системы 5G, системы 6G, кодовое разделение, LDS-CDMA, WSMA, SCMA, PDMA

Технология неортогонального доступа (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA) рассматривается в рамках стандартизации 3GPP [1, 2, 3]. Необходимость внедрения новых технологий неортогонального множественного доступа вызвана прежде всего распространением Интернета вещей (IoT) и перспективой массового подключения абонентских устройств к новым сетям беспроводной связи (5G и 6G), во много раз превышающее по масштабам подключения в существующих сетях (подключение миллиардов новых устройств) [1, 4]. Выделены два основных направления развития NOMA – с разделением по мощности и с кодовым разделением [3, 5]. В ходе стандартизации 3GPP внимание компаний-разработчиков было сосредоточено на втором направлении, однако для внедрения NOMA в системах 5G и 6G был выявлен ряд проблем, требующих дополнительных исследований. По последним прогнозам, трафик данных в сетях 6G будет в сотни раз больше, чем в сетях 5G, при высоких требованиях к энергетической эффективности и доступности связи, что потребует применения новых технологий множественного доступа. Статья посвящена обзору основных схем неортогонального множественного доступа (NOMA) с кодовым разделением в рамках стандартизации 3GPP. Различными компаниями было предложено множество схем NOMA для систем 5G и 6G. Кратко иллюстрируется область применения и основные преимущества технологии NOMA. Рассматриваются наиболее популярные разновидности NOMA с кодовым разделением и их особенности, анализируются перспективы и проблемы их внедрения.

Информация об авторах:

Бакулин Михаил Германович, доцент, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия

Бен Режеб Тауфик Бен Камель, доцент, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия

Крейнделин Виталий Борисович, профессор, д.т.н., МТУСИ, Москва, Россия

Панкратов Денис Юрьевич, доцент, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия

Смирнов Алексей Эдуардович, доцент, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия

Для цитирования:

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? // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №1. С. 4-14.

For citation:

Bakulin M.G., Ben Rejeb T.B.C., Kreyndelin V.B., Pankratov D.Y., Smirnov A.E. (2022) Code domain NOMA in 3GPP specifications: 5G or 6G? T-Comm, vol. 16, no.1, pp. 4-14. (in Russian)

Введение

Технологии множественного доступа являются одними из ключевых технологий, которые способствовали развитию систем беспроводной связи [6, 7, 8, 9, 10]. Возможности технологий ортогонального множественного доступа, в которых один и тот же ресурс (временной или частотный) может быть занят только одним абонентом, ограничены [6, 11]. Неортогональный множественный доступ (NOMA), в котором один и тот же ресурс может совместно использоваться несколькими абонентами, является перспективным решением для дальнейшего развития сетей беспроводной связи (5G и 6G) [5, 12].

Технология NOMA имеет множество разновидностей, предложенных различными компаниями, которые представлены во множестве публикаций [9, 10, 13, 14, 15]. В данной работе рассматриваются наиболее популярные схемы NOMA с кодовым разделением, предложенные в рамках стандартизации 3GPP для систем 5G, их основные преимущества и недостатки, а также проблемы, препятствующие внедрению систем NOMA [16, 17, 18].

1. Концепция NOMA и стандартизация в 3GPP

Выбор схем множественного доступа существенно влияет на спектральную и энергетическую эффективность систем беспроводной связи. Технология неортогонального множественного доступа (NOMA) позволяет обеспечить массовое подключение и работу большого числа абонентских устройств, гибкое использование ресурсов системы, совместима с другими технологиями множественного доступа и может использоваться для повышения эффективности систем с ортогональным доступом [2, 3].

Преимущества неортогонального разделения абонентов.

Технологии ортогонального разделения сигналов, используемые в многоканальных системах связи, давно известны [7, 8] – множественный доступ временным (Time Division Multiple Access, TDMA) и с частотным разделением (Frequency Division Multiple Access, FDMA). При ортогональном доступе каждому абоненту назначается свой ресурс (сигнал) в частотной или временной области.

При неортогональном доступе несколько абонентов могут работать одновременно, используя одну и ту же частоту или временной интервал, в результате в системе NOMA обеспечивается более высокая емкость и спектральная эффективность по сравнению с системами ортогонального доступа [3, 12]. Кроме того, в системе NOMA могут использоваться различные способы распределения мощности для справедливого (fairness) распределения ресурсов абонентов, например, для абонентов, находящихся дальше от базовой станции [12].

Следует отметить, что быстрое развитие современных систем беспроводной связи приводит к переосмыслению существующих подходов разработки таких систем [11]. Если в предыдущих поколениях систем беспроводной связи требовалось прежде всего увеличение скорости передачи данных абонентами, то в системах 5G и 6G приоритетным становится увеличение числа абонентов. Технология NOMA была предложена прежде всего для массового подключения абонентских устройств (режим IoT) в сетях 5G, в сценариях, когда не требуется высокая скорость передачи данных для

всех пользователей [1]. В отличие от систем с ортогональным доступом, в которых ресурсы в частотной и временной областях ограничены, технология NOMA предлагает эффективное решение этой задачи [5].

Стандартизация NOMA в 3GPP.

Технология NOMA рассматривалась в рабочей группе 3GPP для стандарта NR (New Radio) для систем 5G [18, 19, 20], в результате был сформулирован технический отчет [16]. Разными компаниями были предложены различные схемы NOMA, которые относятся к разновидностям NOMA с кодовым разделением: например, NOMA с разделением по шаблонам (Pattern Division Multiple Access, PDMA) [10], множественный доступ с расширением ресурсов (Resource Spreading Multiple Access, RSMA) [21], многопользовательский совместный доступ (Multi-User Shared Access, MUSA) [4], множественный доступ на основе последовательностей Велча (Welch Spreading Multiple Access, WSMA) [18], множественный доступ с перемежением (Interleave-Division Multiple-Access, IDMA) [16].

В документе 3GPP [16] предлагаются модификации структуры передающей стороны системы NR 5G для формирования сигналов различных разновидностей NOMA для восходящей линии связи. Модифицированная структурная схема передающей стороны системы NOMA на основе стандартной структуры системы 5G представлена на Рис. 1. На этой схеме новые блоки цифровой обработки, которые не отражены в текущих спецификациях 3GPP, выделены цветом. Для включения новых блоков в спецификации 5G необходимо внесение изменений и/или дополнений в действующие стандарты. Блоки обработки, которые включены в действующие стандарты 5G, отмечены пунктирной линией [19].

Для внедрения NOMA необходимо включение в спецификации 5G описания способов формирования групповых сигналов абонентов на передающей стороне. Структуры приемников не регламентируются стандартами 5G – выбор остается за разработчиками и производителями оборудования. Групповые сигналы могут использоваться как для разделения неортогональных ресурсов разных пользователей, так и для повышения скорости передачи отдельных пользователей.

Предложенные схемы NOMA с кодовым разделением основаны на дополнительной обработке, которая реализуется и уровне символов, на уровне битов или их сочетании. Различие между предложенными схемами NOMA заключается в кодовых последовательностях абонентов, формирующихся с помощью технологий кодирования, перемежения и скремблирования, что отражено на структурной схеме (рис. 1).

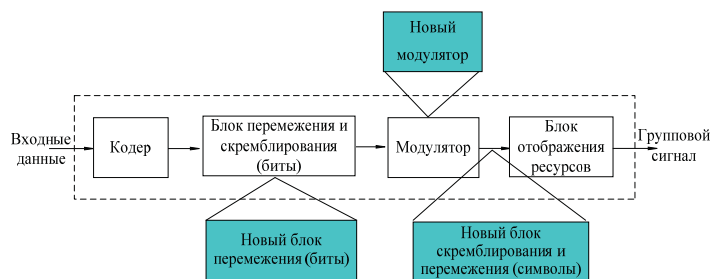


Рис. 1. Структурная схема передающей стороны системы NOMA на основе стандартной структуры системы 5G

Согласно схеме (рис. 1), для реализации NOMA в системах 5G понадобится модифицированный модулятор, новый блок скремблирования, новый блок перемежения или сочетание этих блоков, в зависимости от реализуемой в системе 5G разновидности NOMA. В предложенных в 3GPP схемах NOMA применяются различные сочетания новых блоков в зависимости от алгоритмов формирования групповых сигналов неортогонального множественного доступа на передающей стороне, что будет показано далее на примере конкретных схем NOMA.

В процессе исследований в рамках стандартизации 3GPP оценивались преимущества NOMA для рекомендации NOMA в стандарт 5G в дополнение к ортогональному доступу для восходящей линии связи [16]. Было показано, что NOMA может превзойти существующие технологии ортогонального множественного доступа, но требует усложнение алгоритмов приема сигналов пользователей [18]. Технология NOMA хорошо подходит для сетей с большим количеством абонентских устройств, в которых требуется восполнить недостаток в ортогональных ресурсах. В качестве ресурсов могут использоваться, например, поднесущие, как в схеме с ортогональным частотным разделением (OFDMA), тогда после модулятора необходим блок дискретного преобразования Фурье.

Тем не менее, при сравнении для сценариев 5G оказалось, что выигрыш в помехоустойчивости системы NOMA с кодовым разделением (схема WSMA) по сравнению с многопользовательской системой MIMO не так велик. При этом сложность приемника NOMA существенно больше – для внедрения технологии NOMA необходимы алгоритмы с приемлемой сложностью. Исследование схем NOMA в рамках 5G было приостановлено в декабре 2018 года и внедрение NOMA было отложено, возможно для применения в системах следующего поколения (6G) [16, 18].

2. Схемы NOMA с кодовым разделением и предыстория NOMA

В 3GPP было множество различных схем NOMA, основанных на кодовом разделении сигналов абонентов [3]. Был проведен анализ предложенных схем для текущих сценариев 5G, который не показал их существенного преимущества по сравнению с используемыми технологиями 5G, поэтому было принято решение не включать NOMA в стандарты 5G и продолжить их дальнейшее исследование для новых сценариев 6G [16, 18].

Предыстория и развитие технологии NOMA.

Схемы NOMA обычно делятся на две основные разновидности в зависимости от принципа разделением сигналов абонентов – с разделением по мощности (Power Domain NOMA) и с кодовым разделением (Code Domain NOMA) [5]. В первом случае разные абоненты используют одни и те же ресурсы, но передают сигналы с разным уровнем мощности. В чем же отличие NOMA с кодовым разделением от традиционных систем CDMA?

В традиционной системе CDMA для разделения сигналов абонентов применяются ортогональные или квазиортогональные кодовые последовательности, причем число пользователей ограничено числом таких последовательностей. Применение неортогональных кодовых последовательностей

позволяет существенно увеличить число абонентов, но требуются сложные алгоритмы многопользовательского приема (компенсации взаимных помех между сигналами абонентов) [10].

В технологии NOMA с кодовым разделением абоненты совместно используют все доступные частотно-временные ресурсы с помощью индивидуальных кодовых последовательностей. Однако, в отличие от традиционной системы CDMA, для разделения абонентов используются неортогональные последовательности с низким коэффициентом корреляции и с большим числом нулевых элементов [13]. Коэффициент загрузки системы NOMA, определяющийся как отношение числа абонентов к базе сигналов, намного превышает коэффициент загрузки традиционной системы CDMA.

К технологии NOMA с кодовым разделением можно отнести такие известные технологии, как множественный доступ с ортогональным частотным разделением (OFDMA) или CDMA в сочетании с применением кодовых последовательностей с низкой плотностью (LDS – Low Density Spreading), а также множественный доступ с разреженными кодовыми последовательностями (SCMA – Sparse Code Multiple Access) [6].

В технологии LDS-CDMA вместо традиционных кодовых последовательностей технологии CDMA используются так называемые коды с низкой плотностью (LDS-последовательности). Технологию LDS-OFDM (Low Density OFDM) [10] можно рассматривать как объединение LDS-CDMA и OFDM – в ней передаваемые информационные символы накладываются на LDS-последовательности, а затем передаются на ортогональных поднесущих OFDM [10]. При этом, в отличие от традиционной системы OFDM, количество передаваемых символов может быть больше, чем количество ортогональных поднесущих, что позволяет повысить спектральную эффективность системы связи.

Схема с разреженными кодовыми последовательностями (SCMA), являющаяся развитием схемы LDS-CDMA, была предложена сравнительно недавно компанией Huawei [10]. В схеме SCMA информационные биты, в отличие от схемы LDS-CDMA, напрямую отображаются в разные разреженные кодовые слова с использованием комплексных кодовых последовательностей. При этом улучшение характеристик обеспечивается за счет увеличения сложности обработки на приемной стороне.

Существуют другие методы множественного доступа, которые также связаны с NOMA, включая давно известную схему неортогонального множественного доступа на основе решетчатого разделения (Lattice Partition Multiple Access, LPMA), которая из-за применения решетчатых кодов отличается высокой сложностью реализации [22]. Перспективными схемами NOMA, наряду с SCMA, также является множественный доступ с пространственным разделением (SDMA) и множественный доступ с разделением по шаблонам (PDMA) [5].

В системе PDMA мультиплексирование и передача потоков данных абонентов осуществляется с помощью неортогональных шаблонов, минимизирующих взаимные помехи между сигналами пользователей. Мультиплексирование выполняется в пространственной области и/или в кодовой области, что позволяет использовать технологию PDMA с другими технологиями множественного доступа [10].

Чтобы реализовывать различные разновидности NOMA с кодовым разделением, рассматриваемые далее, для систем 5G была предложена концепция программно-настраиваемого радиоинтерфейса, которая обеспечивает совместную работу различных схем множественного доступа для поддержки различных режимов и услуг систем 5G [9]. Следует также упомянуть схемы совместного множественного доступа (MUSA) для поддержки массового подключения абонентских устройств в режиме Интернета вещей, что особенно актуально для систем 5G [4].

Технология LDS-CDMA

Первые схемы NOMA с кодовым разделением были основаны на совмещении LDS-последовательностей с традиционными технологиями ортогонального доступа (CDMA и OFDMA) [5, 10, 13]. Технология LDS-CDMA появилась более десяти лет назад и представляет собой усовершенствование CDMA с применением кодов с низкой плотностью [10, 13]. Следует отметить, что в технологии LDS-CDMA, благодаря использованию LDS-последовательностей, может быть применен алгоритм многопользовательского приема, по характеристикам близкий к алгоритму, оптимальному по критерию максимального правдоподобия [3].

В традиционной системе CDMA уровень взаимных помех становится высоким с увеличением числа пользователей. Для снижения уровня помех были предложены ортогональные коды с переменной базой (числом элементов кода), однако такая система не предназначена для работы в режиме перегрузки, когда число абонентов существенно превышает число доступных ортогональных кодовых последовательностей.

В системе LDS-CDMA применяются кодовые последовательности с низкой плотностью, т.е. с большим числом нулевых элементов. Применение таких LDS-последовательностей уменьшает уровень помех между сигналами абонентов и позволяет обеспечить массовое подключение абонентов и обеспечить работу в режиме перегрузки. Такая структура LDS-кодов, отличающая LDS-CDMA от традиционной системы CDMA, позволяет упростить обработку принимаемых сигналов пользователей.

Рассмотрим пример системы LDS-CDMA, в которой $K = 6$ пользователей используют последовательности с длиной $N = 4$. Отображение информационных символов в кодовые последовательности можно представить с помощью следующей матрицы:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где число строк матрицы \mathbf{S} равно базе сигналов, а число столбцов матрицы \mathbf{S} равно числу абонентов, совместно использующих эти последовательности. Коэффициент загрузки при этом составляет 150 %, т.е. поддерживается намного больше абонентов, чем в традиционной системе CDMA. Для структуры матрицы \mathbf{S} характерно наличие большого числа нулевых элементов. Графически эта система иллюстрирует-

ся на рисунке 2, где x_i – информационные символы абонентов, а y_i – элементы принимаемых кодовых последовательностей.

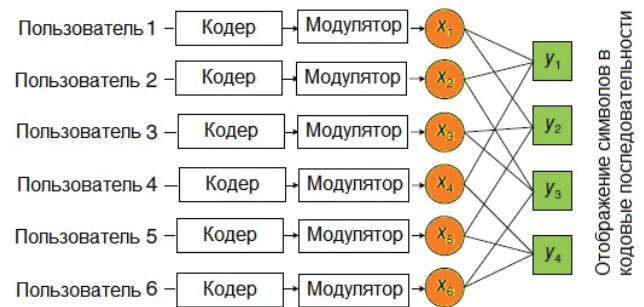


Рис. 2. Упрощенная структурная схема системы LDS-CDMA

На приемной стороне системы NOMA для многопользовательской демодуляции может использоваться так называемый алгоритм MPA (Message Passing Algorithm – алгоритм передачи сообщений), который, по сути, является упрощением демодулятора с последовательным подавлением помех (SIC) и для демодуляции использует структуру графа отображения информационных символов в ресурсы. Вместе с алгоритмом MPA на практике может быть применен турбодекодер для коррекции ошибок. Благодаря тому, что эти алгоритмы обработки являются итерационными, они могут работать совместно, что позволяет улучшить качество демодуляции (но увеличивается сложность обработки).

Следует также отметить, что кодовые последовательности LDS делают многопользовательские демодуляторы более доступными для реализации в системах NOMA, в том числе и алгоритмы на основе SIC. Кроме того, последовательности с низкой плотностью, используемые в системе LDS-CDMA, существенно снижают влияние взаимных помех сигналов пользователей по сравнению с традиционной системой CDMA.

Оценить порядок вычислительной сложности обработки на приеме для систем CDMA и NOMA с кодовым разделением можно следующим образом. Сложность приемника (оптимального по критерию максимального правдоподобия) традиционной системы CDMA имеет порядок M^K , где K – число активных пользователей в системе, M – кратность модуляции. Если в системе NOMA используется W кодовых последовательностей, то сложность приемника NOMA имеет порядок M^W , где $W < K$ общего числа пользователей традиционной системы CDMA. Демодулятор MPA также может использоваться в приемнике системы LDS-OFDM, однако его реализация в такой системе приводит к более высокой вычислительной сложности по сравнению с традиционной технологией OFDMA из-за добавления LDS-последовательностей.

3. МА с кодовым разделением с обработкой на уровне битов

При развитии направления NOMA с кодовым разделением в рамках стандартизации 3GPP были предложены две основные группы схем, которые различаются по виду обра-

ботки – на уровне битов (до модулятора) и на уровне символов (после модулятора). Рассмотрим подробнее эти разновидности NOMA с кодовым разделением, их структурные схемы, иллюстрирующие обработку на передаче, а также наиболее популярные способы формирования кодовых последовательностей [5].

Скремблирование и перемежение на уровне битов

Обработка на уровне битов позволяет разделять сигналы абонентов NOMA за счет их рандомизации, при этом в документе 3GPP [16] рассматривается два вида рандомизации – скремблирование и перемежение.

Структурная схема системы NOMA с обработкой на уровне битов приведена на рисунке 3. Сначала входные данные пользователя поступают на вход помехоустойчивого кодера, за тем осуществляется скремблирование или перемежение на уровне битов, модуляция и отображение полученных информационных символов в доступные ресурсы. В качестве ресурсов могут использоваться, например, поднесущие, тогда после модулятора необходим блок дискретного преобразования Фурье (DFT).



Рис. 3. Структурная схема передающей стороны системы NOMA с использованием обработки на уровне битов (на стороне абонентской станции)

В рамках стандартизации 5G было предложено несколько схем NOMA с применением скремблирования битов, например схемы NCMA (Network-Coded Multiple Access) компании LG Electronics и LCRS (Low Code Rate Spreading) компании Intel. При этом в системе NOMA может использоваться уже имеющаяся в спецификациях 3GPP процедура скремблирования [16].

Для процедуры перемежения на уровне битов, используются так называемые шаблоны перемежения, которые являются индивидуальными для каждого абонента системы NOMA. В качестве примера таких схем NOMA можно привести IGMA (Interleave-Grid Multiple Access) компании Samsung, IDMA компании Convida Wireless LLC и LCRS компании Intel, предложенных в документе 3GPP [16].

Следует отметить, что для осуществления перемежения в этих схемах NOMA необходимо использование новых блоков перемежения в стандартной структуре 3GPP, реализованных, например, на основе стандартного блочного кодирования с низкой плотностью (LDPC), имеющегося в спецификациях 5G, с помощью добавления разных циклических сдвигов для разделения сигналов разных абонентов [16].

Наиболее интересной представляется схема IDMA, в которой, по сути, для разделения сигналов абонентов используются уникальные кодовые последовательности. Таким образом, схема IDMA представляет собой разновидность CDMA с перемежением чипов кодовых последовательностей, причем благодаря добавлению блока перемежения на передающей стороне возможно восстановление соответствующей последовательности (искаженной в процессе передачи по радиоканалу) с помощью итерационного алгоритма

многопользовательского приема, имеющего приемлемую вычислительную сложность [16].

4. МА с кодовым разделением с обработкой на уровне символов

В документе 3GPP [16] предложены также схемы NOMA с обработкой на уровне символов (после модулятора), которые включают в себя несколько разновидностей, различающиеся по способам формирования групповых сигналов NOMA. При обработке на уровне символов групповые сигналы в рамках спецификаций 5G могут создаваться несколькими способами [16, 20]:

- применение индивидуальных кодовых последовательностей для различных абонентов с видами модуляции, уже включенными в спецификации 5G;
- применение индивидуальных кодовых последовательностей для различных абонентов с модифицированной модуляцией;
- применение индивидуального для каждого абонента перемежения с добавлением нулевых символов.

Применение индивидуальных кодовых последовательностей для различных абонентов с унаследованной модуляцией 5G.

Для этого подхода формирования групповых сигналов характерно применение кодовых последовательностей с большим числом нулевых элементов и низким уровнем взаимной корреляции между сигналами разных абонентов [1, 9]. Элементы таких последовательностей могут быть взяты из стандартных сигнальных созвездий BPSK, QPSK или QAM, уже определенных в спецификациях 3GPP [16].

Структура передающей стороны системы NOMA с унаследованной модуляцией 5G представлена на рисунке 4. Сначала осуществляется помехоустойчивое кодирование входного потока данных, также может осуществляться одна из упомянутых выше процедур обработки на уровне битов. После модуляции осуществляется обработка на уровне символов с использованием унаследованной модуляции 5G.

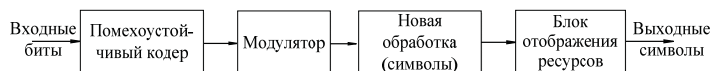


Рис. 4. Структурная схема передающей стороны системы NOMA с унаследованной модуляцией 5G

В рамках стандартизации 3GPP разные компании предложили различные конструкции кодовых последовательностей NOMA для обработки на уровне символов [16]. Схемы WSMA (Ericsson), NCMA (LGE) NOCA (Nokia) основанные на применении так называемых последовательностей Велча и Грассманиана, а схема UGMA (User Grouped Multiple Access) компании NTT DOCOMO основана на применении обобщенных последовательностей Велча. Довольно часто упоминаемой в публикациях схему является схема RSMA компании Qualcomm, в которой на уровне символов применяется процедура скремблирования.

Схемы NOMA с использованием последовательностей Велча.

К разновидностям NOMA на основе последовательностей Велча (WBE, Welch bound equality) относятся схемы RSMA компании Qualcomm и WSMA компании Ericsson. Для построения WBE-последовательностей используется следующее равенство, называемое границей Велча:

$$B_{Welch} = K^2/N. \tag{2}$$

Примеры генерации WBE-последовательностей приведены в техническом отчете 3GPP [16]. Равенство (2) представляет собой границу взаимной корреляции любого набора из K последовательностей длины N (суммы квадратов взаимной корреляции последовательностей).

На Рис. 5 приведена структурная схема передающей стороны абонентской станции системы WSMA. После помехоустойчивого кодирования биты могут опционально подвергаться скремблированию (обработка на уровне битов). Затем осуществляется квадратурная амплитудная модуляция (QAM), расширение и перемежение с помощью кодовых последовательностей. В системе WSMA применяются неортогональные короткие WBE-последовательности с низким уровнем взаимной корреляции. При этом в отличие схемы SCMA последовательности в схеме WSMA не являются разреженными [23].



Рис. 5. Структурная передающей стороны схемы WSMA (цифровая обработка на стороне абонентской станции)

В схеме WSMA сигналы формируются на уровне символов, причем для каждого абонента задается конкретный вектор из набора заранее спроектированных векторов (последовательностей) размерности L . Эти векторы обладают определенными корреляционными свойствами.

Рассмотрим подробнее структуру и свойства матрицы WBE-последовательностей в схеме WSMA с K абонентами. Пусть имеется K векторов последовательности $\mathbf{s}_k, k=1, \dots, K$ длиной L , обозначающих кодовые последовательности пользователей, для которых $\|\mathbf{s}_k\| = \sum_{l=1}^L s_{k,l}^2 = 1$. Тогда матрица WBE-последовательностей имеет структуру $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_K]$ и размер $L \times K$.

Коэффициент загрузки системы WSMA определяется соотношением K/L , причем для поддержки большого числа абонентов необходимо, чтобы $(K/L) > 1$. В зависимости от требуемых характеристик матрицы последовательностей \mathbf{S} выбирается показатель эффективности. Например, для схемы WSMA используется коэффициент TSC (Total Square Correlation – полная корреляция), который ограничивается равенством (2) и задается с помощью соотношения [16]:

$$TSC = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K |\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_j|^2 \geq K^2/L, \tag{3}$$

где штрихом обозначена операция эрмитова сопряжения (транспонирование и комплексное сопряжение элементов вектора \mathbf{s}_i). При выполнении этого соотношения множество последовательностей \mathbf{S} соответствует границе Велча, однако векторы этого множества удовлетворяют границе Велча не по отдельности, а в совокупности.

Таким образом, существует несколько множеств \mathbf{S} , удовлетворяющих границе Велча и соответствующих выбранному показателю эффективности. При такой оптимизации обеспечивается низкое значение корреляции между векторами множества \mathbf{S} , кроме того, оптимизируется емкость системы WSMA, что делает эту схему привлекательным вариантом для реализации NOMA.

В Табл. 1 приведен пример такого множества \mathbf{S} WBE-последовательностей (кодовая книга WSMA) из документа 3GPP [16]. В системе WSMA с такой матрицей \mathbf{S} поддерживается до четырех активных абонентов ($K=4$ последовательностей) с длиной $L=8$ на один ортогональный ресурс. При этом коэффициент загрузки системы равен $K/L=2$ (загрузка составляет 200%). Каждый столбец кодовой книги – это комплексная WBE-последовательность с единичной нормой, которая назначается соответствующему абоненту.

Таблица 1

Пример кодовой книги WSMA, предложенной для стандарта 3GPP, для случая $K=4$ активных пользователей и базы сигнала [16]

		Номер последовательности	1	2	3	4
Отсчет последовательности	1		-0.6617 + 0.1004i	-0.0912 + 0.4191i	0.4151 - 0.3329i	0.2736 - 0.4366i
	2		0.0953 + 0.4784i	-0.4246 - 0.0859i	0.2554 - 0.3140i	0.5452 + 0.2068i
	3		-0.4233 - 0.1399i	-0.4782 + 0.3752i	-0.3808 - 0.1569i	-0.4690 - 0.2225i
	4		-0.1265 + 0.3153i	0.4936 + 0.1233i	0.6130 - 0.0873i	-0.3399 + 0.0974i
		Номер последовательности	5	6	7	8
Отсчет последовательности	1		-0.4727 - 0.1234i	-0.3413 + 0.1257i	0.4216 + 0.1187i	0.4603 + 0.2142i
	2		0.0592 - 0.6432i	0.3671 - 0.1430i	-0.0241 - 0.5620i	0.0048 - 0.4244i
	3		0.3493 - 0.1988i	0.6514 - 0.0660i	-0.4507 + 0.0958i	0.4047 + 0.1601i
	4		-0.0975 - 0.4316i	0.2174 + 0.4864i	-0.5167 + 0.1116i	-0.4908 + 0.3629i

Для генерации WBE-последовательностей может также использоваться параметр $\mu = \max_{i \neq j} p_{ij}$, где p_{ij} представляют собой коэффициенты взаимной корреляции [16]. Множество таких WBE-последовательностей называется множеством Грассмана, при этом задачей оптимизации является упаковка линейного пространства [20]. Следует отметить, что при отдельной оптимизации каждого показателя эффективности получаются подмножества WBE-последовательностей с разными корреляционными свойствами. В результате оптимизации параметра (3) получаются WBE-последовательности с разным уровнем взаимной корреляции, а в результате оптимизации параметра μ получаются WBE-последовательности с равным уровнем взаимной корреляции [20].

Оптимизация хордового расстояния d_{cord} позволяет получить близкий к нулевому уровень взаимной корреляции между несколькими кодовыми последовательностями, при этом задачей оптимизации является упаковка подпространства G [16]. Хордовое расстояние между двумя последовательностями определяется формулой:

$$d_{cord} = \min_{\mathbf{G}} \left(\max_{1 \leq i \leq j \leq K} \sqrt{1 - |\mathbf{s}_i' \mathbf{s}_j|^2} \right). \quad (4)$$

Для иллюстрации корреляционных свойств WBE-последовательностей для системы WSMA приведем несколько вариантов определителя Грама $|\mathbf{S}'\mathbf{S}|$. Множества \mathbf{S} этих последовательностей были сгенерированы с помощью оптимизации разных показателей эффективности для системы с $K = 4$ активными абонентами на один ортогональный ресурс для случая $K = L$, где L – длина WBE-последовательностей (загрузка 100%). Таким образом, для разных оптимизируемых параметров TSC, μ и d_{cord} получается следующая структура определителей Грама:

Таблица 2

Примеры вариантов определителя Грама $|\mathbf{S}'\mathbf{S}|$ для разных оптимизируемых параметров

TSC	μ	d_{cord}
$\begin{bmatrix} 1 & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{12} & 1 & p_{23} & p_{24} \\ p_{13} & p_{23} & 1 & p_{34} \\ p_{14} & p_{24} & p_{34} & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & p & p & p \\ p & 1 & p & p \\ p & p & 1 & p \\ p & p & p & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & p_{13} & p_{14} \\ 0 & 1 & p_{23} & p_{24} \\ p_{13} & p_{23} & 1 & 0 \\ p_{14} & p_{24} & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Схемы NOMA с использованием последовательностей Грассманиана и на основе обобщенного равенства Велча

Схема NCMA, предложенная компанией LG Electronics, основана на использовании последовательностей Грассманиана (Grassmannian sequences) [24]. При генерации таких последовательностей используется более строгая оптимизация по сравнению со схемой WSMA – минимизация максимального уровня взаимной корреляции между любыми из двух WBE-последовательностей.

Генерация последовательностей Грассманиана представляет собой задачу упаковки линейного пространства. Множество последовательностей Грассманиана определяется матрицей $\mathbf{G} = [\mathbf{s}_1 \dots \mathbf{s}_K]$, состоящей из векторов последовательностей, причем $\mathbf{G} \subset \mathbb{C}^{N \times K}$, где $\mathbb{C}^{N \times K}$ – множество комплексных матриц размерности $N \times K$; N – длина последовательностей; K – число последовательностей.

В схеме UGMA компании NTT DOCOMO для разделения сигналов абонентов используются последовательности GWBE (Generalized welch-bound equality – обобщенное равенство границе Велча) [25]. Такие последовательности, в отличие от WBE-последовательностей, соответствующих границе Велча (2), строятся на основе обобщенного равенства границе Велча, включающим в себя мощности P_k сигналов K абонентов:

$$\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K P_i P_j |\mathbf{s}_i' \mathbf{s}_j|^2 \geq \left(\sum_{k=1}^K P_k \right)^2 / N. \quad (5)$$

Причем при выполнении условия $P_1 = P_2 = \dots = P_K$ последовательности GWBE становятся WBE-последовательностями.

Последовательности GWBE строятся по следующему правилу:

$$\min_{\mathbf{s}_k' \mathbf{s}_k = 1 \forall k} \mathbf{R}_s = \|\mathbf{S}'\mathbf{P}\mathbf{S}\|^2 = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K P_i P_j |\mathbf{s}_i' \mathbf{s}_j|^2, \quad (6)$$

где \mathbf{S} – матрица последовательностей GWBE размерности $K \times N$, $\mathbf{R}_s = \mathbf{S}'\mathbf{P}\mathbf{S}$ – корреляционная матрица с учетом мощностей $\mathbf{P} = \text{diag}\{P_1, \dots, P_K\}$ сигналов K абонентов. Примеры последовательностей GWBE и способ их формирования приводятся в документе 3GPP [16].

Комплексные кодовые последовательности с квантованными элементами и последовательности на основе созвездия QPSK.

Упомянутые выше последовательности GWBE состоят из комплексных чисел, действительные и мнимые части которых могут быть квантованы с помощью дискретных значений. Последовательности с квантованными элементами также используются в схеме MUSA компании ZTE [26].

Элементы кодовых последовательностей могут быть взяты из сигнальных созвездий QPSK или QAM. Например, для QPSK число таких последовательностей составляет 4^N , соответственно, где N – длина последовательностей. Примеры таких последовательностей также приведены в документе 3GPP [16].

В схеме NOCA компании Nokia также используются квантованные последовательности с элементами из сигнального созвездия QPSK [27]. Эти последовательности формируются с помощью процедуры компьютерной оптимизации (поиска) для достижения низкой взаимной корреляции между последовательностями с разными циклическими сдвигами.

Схемы NOMA с применением последовательностей на основе разреженных шаблонов и модифицированной модуляцией.

Структурная схема системы NOMA с применением разреженных шаблонов и модифицированной модуляцией 5G на передающей стороне абонентских станций приведена на рисунке 6. После помехоустойчивого кодирования и обработки на уровне битов осуществляется отображение в информационные символы по особому алгоритму (модифицированная модуляция). Затем полученная на выходе модулятора последовательность символов отображается в ресурсы на основе специальных разреженных шаблонов по алгоритму, приведенному в документе [16].



Рис. 6. Структурная схема системы NOMA с применением разреженных шаблонов и модифицированной модуляцией 5G

Таким образом, обработка на передающей стороне по схеме (рис. 6) включает в себя как использование новых видов модуляции, так и расширение с помощью разреженных шаблонов для получения так называемой разреженной последовательности символов. К этой разновидности NOMA относится схема SCMA, предложенная компанией Huawei [16].

При формировании групповых сигналов абонентов в схеме SCMA с помощью специальных шаблонов в кодовые последовательности добавляются нули, в результате чего получаются разреженные сигналы. При этом в схеме SCMA используются коды, в которых число нулей одинаково для каждого шаблона. Приведем пример шаблона для последовательностей из 4 элементов для случая 6 абонентов:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где столбцы матрицы \mathbf{S} соответствуют шести абонентам, а число строк равно числу элементов последовательностей. Для шаблона (7) коэффициент загрузки системы SCMA равен $K / N = 6 / 4 = 1,5$ (загрузка 150%).

В отличие от схемы SCMA, в усовершенствованной схеме PDMA компании CATТ число нулевых и ненулевых элементов не является фиксированным [28]. Элементы последовательностей в этих схемах NOMA могут быть выбраны из комплексных множеств, например $\{0, 1, -1, j, -j\}$ [16]. При этом входной поток из M битов отображается в последовательность с помощью специальной матрицы преобразования, имеющей размерность $N \times 2^M$, где N – длина последовательности.

Схема NOMA с применением расширения и скремблирования на уровне символов.

Процедура скремблирования может применяться также на уровне символов, что иллюстрируется на рисунке 7. В этой разновидности NOMA осуществляется так называемая гибридная обработка символов на выходе модулятора – расширение (отображение в кодовые последовательности) и скремблирование. При использовании технологии OFDMA после отображения ресурсов необходим блок дискретного преобразования Фурье, опционально также может применяться обработка на уровне битов.



Рис. 7. Структурная схема системы NOMA с использованием гибридной обработки на уровне символов

Компанией Qualcomm предложена схема RSMA, в которой при расширении символов для каждого модулированного символа используется индивидуальная короткая расширяющая последовательность [29]. Кроме того, в схеме RSMA для формирования групповых сигналов короткие кодовые последовательности совместно используются с длинными

последовательностями (скремблирование на уровне символов). Скремблирующие последовательности могут быть основаны, например, на последовательностях Задова-Чу и последовательностях Голда [30].

Схема NOMA с перемежением и добавлением нулевых элементов на уровне символов.

Структурная схема системы NOMA с перемежением и добавлением нулевых элементов на уровне символов (на стороне абонентской станции) приведена на рисунке 8. Обработка на уровне битов после помехоустойчивого кодера является опциональной. Такая структура передающей стороны используется в схеме множественного доступа с перемежением и отображением (IGMA) компании Samsung [31].



Рис. 8. Структурная схема системы NOMA с перемежением и добавлением нулевых элементов на уровне символов

В схеме IGMA при обработке на уровне символов осуществляется специальный процесс отображения, в котором последовательности символов подвергаются добавлению нулевых элементов и перемежению. В результате получаются разреженные последовательности символов, причем степень разреженности регулируется с помощью матрицы отображения [16].

Особенности внедрения схем NOMA.

Рассмотренные разновидности NOMA имеют разные преимущества и сложности при реализации на практике. В основном все эти схемы предназначены для использования на восходящей линии связи, т.е. от абонентских станций к базовой станции.

Сложная обработка в системах NOMA связана, прежде всего, с тем, что в них используются сложные кодовые последовательности, сложные методы модуляции и кодирования, а также сложные алгоритмы многопользовательского приема таких сигналов [19, 32, 33, 34, 35, 36, 37].

Например, для реализации популярной схемы SCMA необходимы сложные алгоритмы обработки сигналов на приемной стороне и сложные кодовые книги на передающей стороне. Для схемы MUSA из-за использования сложных комплексных последовательностей необходимы сложные алгоритмы многопользовательского приема таких сигналов. В схеме LPMA наибольшие затруднения при реализации встречают алгоритмы решетчатого кодирования.

Участники стандартизации 3GPP отмечают необходимость в проведении дополнительных исследований предложенных разновидностей NOMA с кодовым разделением для других сценариев, исследование эффективных алгоритмов построения кодовых книг и кодирования, новых методов модуляции и отображения и совмещения со схемами ортогонального доступа и технологией MIMO [38]. Весьма актуальным, согласно отчету 3GPP, также является разработка алгоритмов многопользовательского приема сигналов NOMA, имеющих невысокую вычислительную сложность [39, 40].

Заключение

В существующих и будущих сетях беспроводной связи ожидается массовое подключение абонентских устройств, что создает большие трудности для индустрии систем беспроводной связи – проблема спектральной эффективности и пропускной способности становится все более острой. В свою очередь, абоненты ожидают от новых сетей высокую энергетическую эффективность, надежность связи и высокую скорость передачи данных. Для решения этих проблем было предложено использовать технологию неортогонального множественного доступа (NOMA).

В последнее время проводятся интенсивные исследования, направленные на повышение эффективности сетей 5G и внедрение в них технологии NOMA. В рамках стандартизации 3GPP предложено множество разновидностей неортогонального доступа, однако еще не принято решение по регламентации использования каких-либо конкретных схем NOMA.

В техническом отчете 3GPP показано, что основной проблемой внедрения технологии NOMA в системах 5G является высокая сложность реализации алгоритмов формирования и обработки сигналов, особенно на приемной стороне, по сравнению с технологиями ортогонального доступа. Кроме того, необходимы эффективные алгоритмы кодирования и построения кодовых книг, новые методы модуляции и многопользовательского приема, а также эффективные методы совмещения схем NOMA с технологиями ортогонального доступа.

В рамках стандартизации 3GPP еще не предложена одновременно гибкая (совмещающаяся с другими технологиями) и приемлемо сложная в реализации технология NOMA, подходящая для разных сценариев применения (для восходящей и для нисходящей линий связи) как в существующих, так и в будущих системах 5G и 6G, которая бы обеспечивала множественный доступ абонентов в разных сценариях и при этом совмещалась с технологиями ортогонального множественного доступа. Таким образом, участники стандартизации 3GPP приняли решение отложить внедрение технологии NOMA в системах 5G и продолжить исследования технологии NOMA с кодовым разделением, в том числе для новых сценариев будущих систем 6G.

Работа подготовлена на основе научных исследований, выполненных при финансовой поддержке Федерального агентства связи в рамках государственного контракта от 26.02.2021 № П33-1-26/8 «Развитие новой технологии неортогонального доступа (NOMA) и ее использование совместно с технологией ММО для перспективных систем связи 6G» (шифр «ММО-NOMA»).

Литература

1. Shirvanimoghaddam, Mahyar & Dohler, Mischa & Johnson, Sarah. Massive Non-Orthogonal Multiple Access for Cellular IoT: Potentials and Limitations // IEEE Communications Magazine. 2016. 55. 10.1109/MCOM.2017.1600618.
2. Ding Z. et al. Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks // IEEE Commun. Mag., Vol. 55, № 2, pp. 185-191, Feb. 2017.

3. Liu Y. et al. Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond // Proceedings of the IEEE, Vol. 105, № 12, pp. 2347-2381, Dec. 2017.
4. Yuan Z. et al. Multi-user shared access for internet of things // IEEE Proc. of Veh. Technol. Conf. (VTC), 2016.
5. 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.
6. 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.
7. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений Изд. 2-е, переработанное, дополненное. М.: Сов. радио, 1970.
8. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985.
9. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Технологии в системах радиосвязи на пути к 5G. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 280 с.
10. Fa-Long (Editor), Charlie Jianzhong Zhang (Editor). Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations // Wiley-IEEE Press, 2016.
11. 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.
12. Timotheou S., Krikidis I. Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems // IEEE Signal Process. Lett., Vol. 22, № 10, pp. 1647-1651, Oct. 2015.
13. Hoshyiar R. et al. Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel // IEEE Trans. Signal Process., Vol. 56, № 4, pp. 1616-1626, Apr. 2008.
14. Nikopour H., Baligh H. Sparse code multiple access // IEEE Proc. of Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. (PIMRC), Sep. 2013, pp. 332-336.
15. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П. Неортогональный множественный доступ: основные направления и возможности // Цифровая обработка сигналов. 2020. № 4. С. 21-35.
16. 3GPP 38.812 V16.0.0 (2018-12), 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. 3GPP, -166056, Final Minutes report RAN185-v100, http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_86/Docs/
18. Yuan Y., Yan C. NOMA study in 3GPP for 5G // Proc. IEEE ISTC, Hong Kong, Dec. 2018, pp. 1-5.
19. Yifei Yuan, Zhifeng Yuan, Li Tian. 5G Non-Orthogonal Multiple Access Study in 3GPP // IEEE Communications Magazine, Vol. 58, № 7, pp. 90-96, July 2020, doi: 10.1109/MCOM.001.1900450.
20. 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.
21. 3GPP, 164688, Resource Spread Multiple Access, Qualcomm, May 2016.
22. Fang D. et al. Lattice partition multiple access: A new method of downlink non-orthogonal multiuser transmissions. 2016, Washington, DC USA.
23. NOMA sign Principles and Performance, document IMT-2020, Ericsson, Beijing, China, Jun. 2017.
24. 3GPP, R1-1808499, Traitter side signal processing schemes for NCMA, LG Electronics.
25. 3GPP, R1-1809148, ansmitter design for uplink NOMA, NTT DOCOMO, INC.
26. 3GPP, R 805840, Key processing modules at transmitter side for NOMA, ZTE.
27. 3GPP, 1808968, Considerations on NOMA Transmitter, Nokia, Nokia Shanghai Bell.
28. 3GPP, R1-1811860, NOMA traitter side signal processing, CATT.

29. 3GPP, R1-1809434, Traitter side signal processing schemes for NOMA, Qualcomm Incorporated.

30. 3GPP, 8.211, Physical channels and modulation (Release 15)

31. 3GPP, R1-1809499, Traitter side signal processing schemes for NOMA, Samsung.

32. Крейнделин В.Б., Смирнов А.Э., Бен Режеб Т.Б.К. Эффективность методов обработки сигналов в системах MU-MIMO высоких порядков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Том 10. №12. С. 24-30.

33. Pankratov D., Stepanova A. Linear and Nonlinear Chebyshev Iterative Demodulation Algorithms for MIMO Systems with Large Number of Antennas // 2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Moscow, Russia, 2019, pp. 307-312.

34. 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.

35. Hacı H. et al. Performance of non-orthogonal multiple access with a novel asynchronous interference cancellation technique // IEEE Trans. Commun., Vol. 65, № 3, pp. 1319–1335, Mar. 2017.

36. Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Нелинейные итерационные алгоритмы многопользовательской демодуляции // Радиотехника, 2004, №8. С. 42-46.

37. Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Квазиоптимальный алгоритм многопользовательской демодуляции в условиях многолучевого распространения радиоволн. // Электросвязь, № 7, 2006. С. 46-48.

38. Бен Режеб Т.Б.К. Исследование эффективности прекодирования с помощью грасмановских кодовых книг в многопользовательских системах MU-MIMO // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8. № 2. С. 99-104.

39. Бакулин М.Г., Бен Р.Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Смирнов А.Э. Снижение вычислительной сложности детектирования сигнала в системах MIMO // Электросвязь. 2021. № 3. С. 22-27.

40. Смирнов А.Э. Итерационный алгоритм демодуляции с низкой вычислительной сложностью для систем Massive MIMO // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8. № 2. С. 181-186.

CODE DOMAIN NOMA IN 3GPP SPECIFICATIONS: 5G OR 6G?

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

The article is devoted to non-orthogonal multiple access (NOMA) schemes with code division within 3GPP standardization. Various companies have proposed a great variety of NOMA schemes for 5G and 6G systems. The scope and main advantages of NOMA technology are briefly illustrated. The most popular varieties of code domain NOMA and their features are considered, their structure, prospects and implementation problems are analyzed.

Keywords: multiple Access, NOMA, 3GPP standardization, 5G, 6G, code division, LDS-CDMA, WSMA, SCMA, PDMA.

References

1. Shirvanimoghaddam, Mahyar & Dohler, Mischa & Johnson, Sarah. (2016). Massive Non-Orthogonal Multiple Access for Cellular IoT: Potentials and Limitations. *IEEE Communications Magazine*. 55. 10.1109/MCOM.2017.1600618.
2. 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.
3. 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.
4. Z. Yuan et al. (2016). Multi-user shared access for internet of things. *IEEE Proc. of Veh. Technol. Conf. (VTC)*.

5. 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.
6. 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.
7. L. Fink (1970). *The Theory of Transmission of Discrete Messages* Ed. 2nd, revised, enlarged. Moscow, Sov. Radio.
8. L. Varakin (1985). *Communication Systems with Noise-Like Signals*. Moscow, Radio and communication
9. M. Bakulin, V. Kreindelin, D. Pankratov (2018). *Technologies in Radio Communication Systems on the Way to 5G*. Moscow: Hotline-Telecom.
10. Fa-Long Luo (Editor), Charlie Jianzhong Zhang (Editor) (2016). *Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations.*, Wiley-IEEE Press.
11. 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.
12. S. Timotheou and I. Krikidis (2015). Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems. *IEEE Signal Process. Lett.*, Vol. 22, no. 10, pp. 1647-1651, Oct. 2015.
13. R. Hoshyar et al. (2008). Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel. *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 56, no. 4, pp. 1616-1626, Apr. 2008.
14. 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.
15. M. Bakulin, V. Kreindelin and A. Shumov (2020). Non-orthogonal multiple access: main directions and opportunities. *Digital Signal Processing*. No. 4, pp. 21-35.
16. 3GPP TR 38.812 V16.0.0 (2018-12), 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. 3GPP, RI-166056, Final Minutes report RAN185-v100, http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RLI/TSGRI_86/Docs.
18. Y. Yuan and C. Yan (2018). NOMA study in 3GPP for 5G. *Proc. IEEE ISTC*, Hong Kong, Dec. 2018, pp. 1-5.
19. Yifei Yuan, Zhifeng Yuan, Li Tian (2020). 5G Non-Orthogonal Multiple Access Study in 3GPP. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 58, № 7, pp. 90-96, July 2020, doi: 10.1109/MCOM.001.1900450.
20. Behrooz Makki, Krishna Chitti, Ali Behravan, Mohamed-Slim Alouini (2020). A Survey of NOMA: Current Status and Open Research Challenges. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, Vol. 1, pp. 179-189.
21. 3GPP, RI-164688, Resource Spread Multiple Access, Qualcomm, May 2016.
22. D. Fang et al. (2016). Lattice partition multiple access: A new method of downlink non-orthogonal multiuser transmissions, Washington, DC USA.
23. NOMA Design Principles and Performance, document IMT-2020, Ericsson, Beijing, China, Jun. 2017.
24. 3GPP, RI-1808499, Transmitter side signal processing schemes for NCMA, LG Electronics.
25. 3GPP, RI-1809148, Transmitter design for uplink NOMA, NTT DOCOMO, INC.
26. 3GPP, RI-1805840, Key processing modules at transmitter side for NOMA, ZTE.
27. 3GPP, RI-1808968, Considerations on NOMA Transmitter, Nokia, Nokia Shanghai Bell.
28. 3GPP, RI-1811860, NOMA transmitter side signal processing, CATT.
29. 3GPP, RI-1809434, Transmitter side signal processing schemes for NOMA, Qualcomm Incorporated.
30. 3GPP, TS38.211, Physical channels and modulation (Release 15)
31. 3GPP, RI-1809499, Transmitter side signal processing schemes for NOMA, Samsung.
32. V.B. Kreindelin, A.E. Smirnov, Ben Rejeb T.B.K. (2016). Efficiency of signal processing in multiuser large scale MIMO systems. *T-Comm: Telecommunications and Transport*. Vol. 10, No. 12, pp. 24-30.
33. D. Pankratov and A. Stepanova (2019). Linear and Nonlinear Chebyshev Iterative Demodulation Algorithms for MIMO Systems with Large Number of Antennas. *2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*. Moscow, Russia, pp. 307-312.
34. M. Bakulin, Ben Rejeb T.B.K., V. Kreindelin, A. Smirnov (2021). Reducing the computational complexity of signal detection in MIMO systems. *Electrosvyaz*, no. 3, pp. 22-27.
35. H. Haci et al. (2017). Performance of non-orthogonal multiple access with a novel asynchronous interference cancellation technique. *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 65, no. 3, pp. 1319-1335, Mar. 2017.
36. V.B. Kreindelin, D.Y. Pankratov (2004). Non-linear iterative multi-user demodulation algorithms. *Radiotekhnika*, No. 8, pp. 42-46.
37. V.B. Kreindelin, D.Y. Pankratov (2006). Quasi-optimal algorithm for multi-user demodulation in conditions of multipath propagation of radio waves. *Electrosvyaz*, No. 7, Moscow, pp. 46-48.
38. Ben Rejeb T.B.K. (2018). Investigation of the efficiency of precoding using Grassmannian codebooks in multiuser MU-MIMO systems. *DSPA: Digital Signal Processing and its Application*. Vol. 8, No. 2, pp. 99-104.
39. M.G. Bakulin, Ben Rejeb T.B.K., V.B. Kreindelin, A.E. Smirnov (2021). Reducing the Computational Complexity of Signal Detection in MIMO Systems. *Electrosvyaz*, No. 3, Moscow, pp. 22-27.
40. A.E. Smirnov (2018). An iterative demodulation algorithm with low computational complexity for Massive MIMO systems. *DSPA: Digital Signal Processing and its Application*. Vol. 8, No. 2, pp. 181-186.

Information about authors:

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

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

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

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

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