

# Обзор методов неортогонального множественного доступа (NOMA)

для беспроводных сетей

**Неортогональный множественный доступ (NOMA) — это перспективная технология для будущих систем мобильной связи, которая может приблизиться к пропускной способности многопользовательского канала за счет совместного применения ресурсов для нескольких пользователей. В обзоре представлены принципы построения NOMA в доменах мощности и кода. Приведены результаты сравнения производительности различных схем NOMA в отношении их пиковой мощности к средней, сложности приемника, задержки, пользовательской нагрузки и пиковой пропускной способности для разных сценариев применения NOMA.**

Евгений Кренгель  
evg.krengel@gmail.com

Павел Иванов  
ivanov-p@sbtcom.ru

## Введение

Неортогональный множественный доступ (NOMA) стал важным принципом при разработке методов радиодоступа для беспроводных сетей пятого поколения (5G). Научкой и промышленностью были предложены методы множественного доступа 5G, включая NOMA в области мощности PD-NOMA (Power Division NOMA), множественный доступ с чередованием и разделением IDMA (Interleave-division Multiple Access), множественный доступ с распределением ресурсов RSMA (Resource Spread Multiple Access), множественный доступ CDMA (Code Division Multiple Access) с расширением кодами с низкой плотностью LDS (Low Density Spreading), или LDS-CDMA, множественный доступ с разреженным кодом SCMA (Sparse Code Multiple Access), многопользовательский общий доступ MUSA (Multi-User Shared Access) и множественный доступ с разделением по шаблону PDMA (Pattern Division Multiple Access). Эти методы основаны на одной и той же ключевой концепции, когда более одного пользователя обслуживается в каждом ортогональном ресурсе, — это, например, временной интервал, частотный канал, код расширения или ортогональная пространственная степень свободы.

В отличие от NOMA традиционные методы ортогонального множественного доступа OMA (Orthogonal Multiple Access), такие как множественный доступ с временным разделением каналов (TDMA) и множественный доступ с ортогональным частотным разделением каналов (OFDMA), обслуживают одного пользователя в каждом блоке ортогональных ресурсов.

Спектральную неэффективность OMA можно проиллюстрировать на следующем простом примере. Рассмотрим сценарий, в котором один пользователь с очень плохими условиями канала должен обслуживаться, поскольку он имеет данные с высоким приоритетом. В таком случае использование OMA означает, что один из ограниченных ресурсов полосы пропускания неизбежно будет занят исключительно этим пользователем, несмотря на плохое состояние канала. Очевидно, это отрицательно сказывается на эффективности спектра и пропускной способности всей системы. В данной ситуации применение NOMA гарантирует обслуживание не только пользователя с плохими условиями канала, но и пользователей, имеющих лучшие условия канала (на той же полосе пропускания).

Таким образом, если необходимо гарантировать равноправие пользователей, пропускная способность системы NOMA может быть значительно выше, чем у OMA. Помимо увеличения спектральной эффективности, академические и промышленные исследования продемонстрировали, что NOMA поддерживает широкие возможности подключения, а значит, будущая сеть 5G сможет обеспечивать функции «Интернета вещей» (IoT). На рис. 1 приведен пример, который показывает распределение мощности и частоты для пользователей  $U_1, U_2, \dots, U_6$  соответственно в системах OMA и NOMA и иллюстрирует преимущества NOMA.

Хотя применение NOMA в сотовых сетях началось относительно недавно, связанные концепции изучаются в теории информации в течение длительного времени. Так, ключевые

компоненты NOMA, в частности суперпозиционное кодирование, последовательное подавление помех (SIC) и алгоритм передачи сообщений (MPA), были изобретены более двух десятилетий назад. Тем не менее принцип NOMA, то есть устранение ортогональности, не использовался в предыдущих поколениях сотовых сетей. В этом философия, лежащая в основе NOMA, достаточно отличается от философии множественного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA). Фактически CDMA в первую очередь построена на идее разделения пользователей за счет применения различий между их кодами расширения, тогда как NOMA поощряет множественных пользователей использовать один и тот же код. Как следствие, для CDMA чиповая скорость должна быть намного выше, чем скорость передачи информационных данных, например, для поддержки скорости передачи данных 10 Гбит/с может потребоваться чиповая скорость в несколько сотен Гбит/с, что трудно реализовать с помощью существующего оборудования.

NOMA можно интегрировать в существующие и будущие беспроводные системы из-за ее совместимости с другими коммуникационными технологиями. Например, NOMA совместима с традиционным OMA, таким как TDMA и OFDMA. Поэтому было предложено включить технологию NOMA в стандарт долгосрочного развития (LTE-A) проекта партнерства третьего поколения (3GPP, где NOMA упоминается как многопользовательская суперпозиционная передача MUST — Multiuser Superposition Transmission). В частности, не требуя каких-либо изменений в ресурсных блоках LTE (то есть поднесущих OFDMA), использование принципа NOMA гарантирует, что два пользователя одновременно обслуживаются на одной и той же поднесущей OFDMA. Кроме того, NOMA недавно была включена в будущий стандарт цифрового телевидения (ATSC 3.0), где эта технология называется мультиплексированием с многоуровневым разделением каналов (LDM). Например, спектральная эффективность телевизионного вещания повышается за счет применения принципа NOMA и наложения нескольких потоков данных. Приведенные выше примеры ясно демонстрируют большой потенциал NOMA не только для сетей 5G, но и для других существующих и будущих беспроводных систем.

Цель этого обзора — дать краткие сведения о технологии NOMA по результатам последних исследований NOMA в домене мощности и кодовом домене.

## NOMA в домене мощности

Power-domain NOMA изначально предлагался как — множественный доступ с разделением путем назначения разной мощности разным пользователям. Затем он был теоретически изучен в сочетании с кодированием с наложением (SPC) на передатчике и последовательным подавлением помех (SIC) в приемнике. Когда принцип NOMA применяется к одному ортогональному блоку ресурсов, то есть к одной несущей, спектрально эффективный способ реализации множественного доступа становится использование области мощности. NOMA в об-

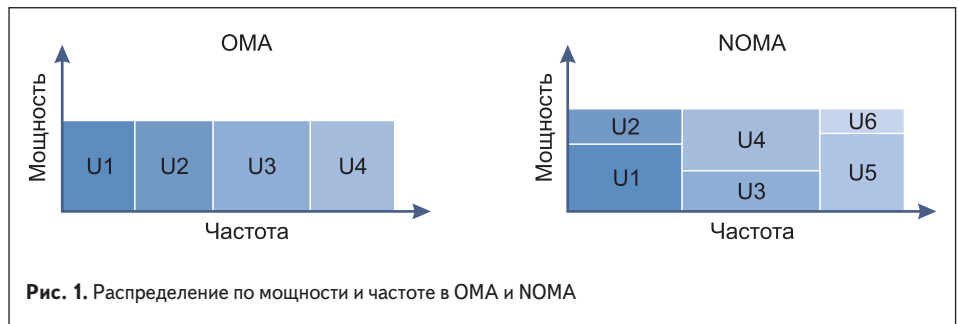


Рис. 1. Распределение по мощности и частоте в OMA и NOMA

ласти мощности может обслуживать нескольких пользователей в одном временном интервале, с одной поднесущей OFDMA или одним кодом расширения, а множественный доступ реализуется путем распределения разных уровней мощности для разных пользователей.

Демодуляция принятого сигнала методом SIC (Serial interference cancellation) заключается в последовательной демодуляции, регенерации (восстановление изначальной формы сигнала) и компенсации (вычитание регенерированного сигнала) наиболее мощных сигналов для дальнейшей демодуляции наименее мощных. Первым демодулируется сигнал пользователя с наибольшей мощностью, который регенерируется и устраняется из принятого сигнала (устраняется интерференционная помеха первого канала), после чего становится возможной демодуляция второго по уровню мощности пользовательского сигнала. По цепочке осуществляется демодуляция всех каналов. Структура PD-NOMA для двух пользователей представлена на рис. 2.

Примером для этой версии NOMA является MUST, которая предназначена для двух пользователей. NOMA в области мощности выделяет больше мощности пользователю с плохими условиями канала, что справедливо для такого пользователя. Однако обычная NOMA в области мощности не может строго гарантировать целевые показатели QoS (Quality of Service) пользователей. NOMA когнитивного радио (CR) — это важный вариант NOMA в области мощности, который строго выполняет некоторые или все требования QoS пользователей. Ключевая идея

CR-NOMA состоит в том, чтобы рассматривать NOMA как частный случай когнитивного отношения, когда политика распределения мощности разработана таким образом, чтобы осуществлялись предварительно определенные пользователем требования QoS.

## NOMA в кодовом домене

Кодовый домен NOMA был разработан на основе классического CDMA, который различает нескольких пользователей с помощью уникальных, специфичных последовательностей расширения. Таким образом, все схемы NOMA в кодовой области можно рассматривать как варианты CDMA. Несколько пользователей могут совместно работать на одних и тех же временных и частотных ресурсах. Если назначенные последовательности расширения идеально ортогональны и синхронны для разных пользователей, многопользовательский канал может быть разделен на набор однопользовательских каналов с помощью согласованных фильтров. Однако в практических системах ортогональность не может быть удовлетворена по разным причинам. Например, количество пользователей может быть больше, чем количество ортогональных последовательностей расширения, то есть длин последовательностей расширения. Даже если ортогональные последовательности расширения используются в синхронной передаче по нисходящей линии связи, ортогональность будет нарушена из-за разброса задержки канала. Также широко признано, что из-за асинхронной природы системы при передаче по восходящей линии

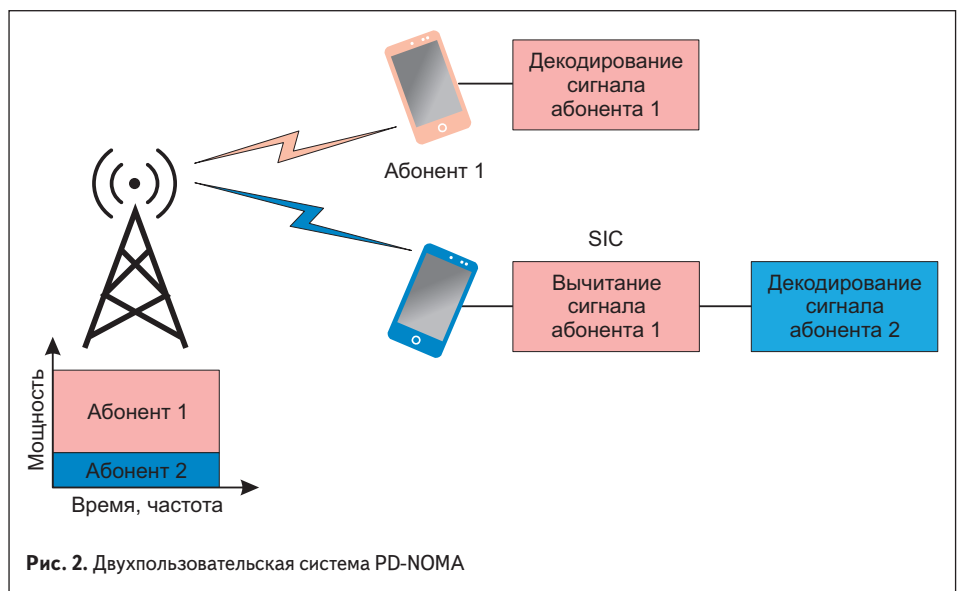


Рис. 2. Двухпользовательская система PD-NOMA

связи требуются неортогональные псевдо-случайные последовательности расширения. Следовательно, CDMA представляет собой классический метод NOMA, который приводит к различным решениям NOMA в кодовой области, кратко изложенным ниже.

**Множественный доступ с чередованием и разделением IDMA**

Множественный доступ с чередованием и разделением IDMA (Interleave-division Multiple Access) можно рассматривать как частный случай CDMA с коэффициентом расширения, равным единице, и с использованием низкоскоростных кодов FEC. Фактически это схема CDMA с перемежением чипов. Оптимальная спектральная эффективность может быть достигнута за счет низкого коэффициента расширения в сочетании с низкоскоростными кодами FEC, при этом индивидуальный пользовательский перемежитель действует как единственное средство различения нескольких пользователей в IDMA. Поскольку расширение не предусмотрено, многопользовательское детектирование (MUD) можно упростить до почипового блока оценки элементарного сигнала (ESE) в приемнике IDMA. Для каждого пользователя ESE оценивает переданный чип на основе среднего значения и дисперсии принятого сигнала, а также на основе искажения. Затем декодеры FEC вычисляют апостериорные вероятности каждого чипа и отправляют их обратно в ESE для итеративного обнаружения. Следовательно, сложность MUD для каждого пользователя увеличивается только линейно с количеством пользователей.

**Множественный доступ с распределением ресурсов RSMA**

Множественный доступ с распределением ресурсов RSMA применяет низкоскоростные коды FEC и коды расширения/скремблирования с хорошими корреляционными свойствами для разделения символов нескольких пользователей. Подобно IDMA, коды FEC с низкой скоростью предназначены для достижения высокого коэффициента кодирования, а длинные рас-

ширители/скремблеры — для уменьшения межпользовательских помех.

В RSMA сигналы группы различных UE (User Equipment) наложены друг на друга, при этом сигнал каждого UE распространяется на весь частотно-временной ресурс, назначенный группе. Распределение битов на все ресурсы позволяет декодировать при уровне сигнала ниже фонового шума и помех. В зависимости от конкретных сценариев применения может использоваться либо RSMA с одной несущей (SC-RSMA) или RSMA с несколькими несущими (MC-RSMA). Обычно SC-RSMA предусмотрен для коротких пакетов данных при питании от батареи и расширении покрытия, которое использует низкие PAPR-сигналы с одной несущей (например,  $\pi/2$  PSK, QPSK со смещением и модуляция постоянной огибающей) и допускает передачу без грантов, а также асинхронный доступ. Напротив, MC-RSMA оптимизирован для доступа с малой задержкой и возможна безгрантовая передача.

**Множественный доступ CDMA с расширением кодами с низкой плотностью LDS-CDMA**

Множественный доступ CDMA с расширением кодами с низкой плотностью LDS-CDMA также является частным случаем CDMA, в котором используются последовательности LDS для разных пользователей. Чтобы уменьшить помехи, налагаемые на каждую микросхему, количество ненулевых элементов в расширяющих последовательностях должно быть намного меньше, чем количество элементарных посылок, так что итеративный SISO MUD на уровне элементарного сигнала, основанный на алгоритме суммы-произведения, может применяться при разумной сложности. Однако разреженность декодирования SCMA будет нарушена в каналах с многолучевым замиранием, что значительно увеличивает сложность обнаружения.

Вариант решения этой проблемы — комбинация LDS-CDMA и OFDM, приводящая к OFDM с расширением с низкой плотностью (LDS-OFDM), в котором символы отображаются на поднесущие OFDM в соответствии с последовательностью

LDS, назначенной каждому пользователю. Поскольку только несколько поднесущих несут информационные символы, MPA на основе MUD, разработанный для LDS-CDMA, также может использоваться в частотной области для LDS-OFDM. В классических системах CDMA элементы расширения последовательности  $s_k$  ( $k = 1, \dots, K$ ) обычно отличны от нуля, то есть последовательности расширения не разреженным. Следовательно, сигналы, полученные от всех активных пользователей, накладываются сверху друг друга на каждом чипе и на каждого пользователя действуют интерференционные помехи со стороны всех остальных пользователей. Если для устранения помех выбирают ортогональные последовательности расширения, то сигналы от разных пользователей легко обнаруживаются и детектируются с помощью корреляционной обработки в приемнике. Однако классическое ортогональное распространение последовательности может поддерживать столько пользователей, сколько чипов в расширяющей последовательности. Поэтому в качестве альтернативы возникла идея использовать неортогональные последовательности на основе кодов LDS, число кодовых слов в которых превышает их длину (число чипов).

Таким образом, суть LDS-CDMA заключается в использовании последовательности разреженного расширения вместо классического «полностью заполненного» расширения, цель которого — поддержка большего числа пользователей. В результате этого уменьшаются помехи, накладываемые на каждый чип от других пользователей. Заметим, что количество ненулевых элементов в последовательности расширения намного меньше, чем длина последовательности. Следовательно, LDS-CDMA потенциально может улучшить достижимую производительность системы при использовании кодовых последовательностей низкой плотности, что является ключевым отличием функцией между обычным CDMA и LDS-CDMA. В LDS-CDMA все передаваемые символы модулируются разреженными кодовыми последовательностями. В результате количество наложенных сигналов на каждый чип будет меньше, чем количество активных пользователей. Это означает, что помехи, наложенные на каждый чип, будут эффективно уменьшены, а значит, и снижено влияние многопользовательского взаимодействия путем тщательного проектирования разреженным кодовых последовательностей.

**Множественный доступ с разреженным кодом (SCMA)**

Множественный доступ с разреженным кодом (SCMA) — один из способов низкоплотного спрединга NOMA на основе распределения плотности, при которой может быть достигнута высокая перегрузка при сохранении высокой надежности приема. Основная идея SCMA состоит в том, чтобы напрямую отобразить закодированные информационные биты в многомерные модуляционные символы в соответствии с заданной разреженной кодовой книгой, вместо последовательно реализованной модуляции и низкоплотного расширения. Поэтому отображение в ресурсный элемент и многомерное созвездие являются основными средствами в SCMA. Процесс

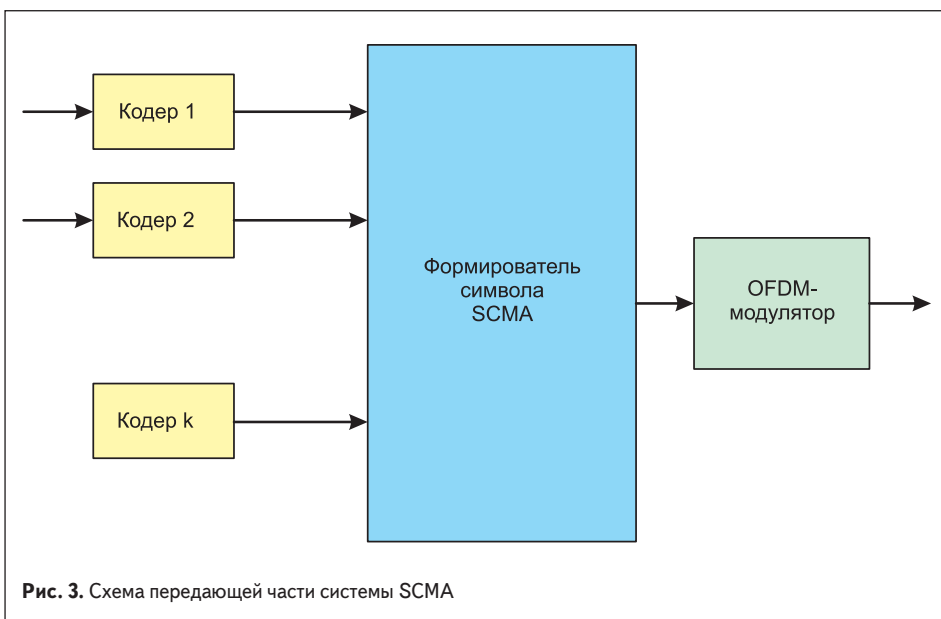


Рис. 3. Схема передающей части системы SCMA

передачи SCMA иллюстрируется на рис. 3, где сигналы нескольких слоев (пользователей) мультиплексируются на одних и тех же радиоресурсах с помощью OFDM-модуляции.

Один из основных аспектов проектирования SCMA — разреженная многомерная кодовая книга. SCMA — это метод проектирования, основанный на вращении, перемешивании и перестановке, который приносит большой выигрыш при формировании сигнальных форм. Также SCMA может обеспечить пространственное разнесение сигналов путем перестановки компонентов сигнала в парные символы, расположенные на нескольких радиоресурсах. Кроме того, разреженная структура SCMA, алгоритмы итеративного многопользовательского детектирования, например алгоритм прохождения сообщения (MPA), могут применяться для одновременного обнаружения нескольких потоков данных на символьном уровне. Однако одной из проблем SCMA является то, что разреженная структура может нарушаться при одночастотной передаче и MPA-приемник может вызвать большую вычислительную нагрузку и задержку обработки при большом количестве мультиплексированных пользователей. Следовательно, при проектировании SCMA должен быть достигнут хороший компромисс между сложностью и исполнением.

Исходя из идеи перегрузки и свойств LDS, SCMA развивается путем наследования из LDS структур разреженной последовательности, так что алгоритм передачи сообщений (MPA) доступен в многопользовательском режиме обнаружения для достижения почти оптимальной производительности. В отличие от схемы LDS, многомерные сигнальные созвездия используются в SCMA вместо расширяющих последовательностей для борьбы с замиранием канала и MAI.

Большой выигрыш при кодировании и лучшая эффективность использования спектра достижимы в SCMA по сравнению с LDS благодаря улучшенным кодовым книгам. Как один из представителей семейства NOMA, SCMA способен поддерживать перегруженный доступ через область кодирования, увеличивая общую скорость и возможности соединения. Тщательное проектирование кодовой книги и многомерных созвездий модуляции, кодирование и усиление формирования могут быть получены одновременно. В системе SCMA пользователи занимают одни и те же ресурсные блоки с низкой плотностью, что позволяет применять недорогой приемник совместного многопользовательского обнаружения. Разреженность сигнала гарантирует небольшие коллизии даже для значительного числа одновременно работающих пользователей, а конструкция кодов обеспечивает хороший охват и защиту от помех.

Таким образом, в отличие от LDS-CDMA SCMA напрямую отображает передаваемые биты в комплексные многомерные кодовые слова для каждого пользователя. Символ SCMA представляет собой суперпозицию всех кодовых слов. Передача данных происходит на нескольких поднесущих по технологии OFDMA, формируемых с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (IFFT).

Каждый пользователь имеет уникальную кодовую книгу; кодовые слова в одной и той же кодовой книге имеют один и тот же разреженный шаблон. Кодовые книги, назначенные различным уровням (пользователям), не ортогональны, поэтому количество пользователей может быть выше, чем количество ортогональных ресурсов, и, следовательно, в системе может поддерживаться огромное количество соединений. Приемник SCMA должен устранить помехи с помощью итеративного MUD на основе MPA, который имеет низкую вычислительную сложность из-за разреженных кодовых слов.

Использование многомерных совокупностей приводит к значительному «выигрышу от формирования», что является основным различием между SCMA и LDS-CDMA. Более высокий коэффициент усиления формы может быть достигнут, когда созвездие находится ближе к сфере, что напоминает принцип упаковки сфер. В SCMA матрица расширения  $S$  является разреженной матрицей, состоящей из кодовых слов  $s_k$ . Поскольку применяются многомерные созвездия, кодовое слово каждого пользователя совместно определяется переданным битовым вектором и кодовой книгой для конкретного пользователя, в то время как вектор символов  $s$  в унифицированной модели представляет собой вектор-строку с единичными записями.

В SCMA отображение битов в созвездие и операции распределения фактически объединены, и, следовательно, исходные битовые потоки напрямую отображаются на разные разреженные кодовые слова, где каждый пользователь имеет собственную кодовую книгу. На рис. 4 представлена SCMA-система с шестью пользователями и четырьмя поднесущими.

Для шести пользователей имеется шесть кодовых книг, причем каждая кодовая книга содержит четыре кодовых слова длиной 4. Все кодовые слова в одной кодовой книге содержат нули в одних и тех же позициях. Позиции нулей в разных кодовых книгах уникальны и отличаются друг от друга для облегчения предотвращения столкновений для любой пары пользователей.

#### Многопользовательский общий доступ MUSA

Многопользовательский общий доступ MUSA принимает комплексные недвоичные расширяющие последовательности для различения

данных разных пользователей. В классической схеме CDMA длинные псевдослучайные последовательности расширения используются для уменьшения корреляции, что приводит к высокой вычислительной сложности и потенциально большой задержке на приемной стороне. В MUSA длины комплексных расширяющих последовательностей могут быть короткими за счет дополнительной свободы, обеспечиваемой мнимой частью.

Таким образом, могут быть созданы последовательности для поддержки большого количества пользователей. В приемнике SIC используется для подавления помех между пользователями при условии идеальной синхронизации. Каждый пользователь может выбрать свою последовательность автономно, чем достигается беспределный доступ, который уменьшает служебные данные и задержку сигнализации.

#### Множественный доступ с разделением по шаблону PDMA

Множественный доступ с разделением по шаблону PDMA: код используется для определения разреженного отображения данных в группе ресурсов. Код может быть представлен двоичным вектором. Размерность вектора равна числу ресурсов в группе. Каждому элементу в векторе соответствует ресурс в группе ресурсов. Например, «1» означает, что данные должны быть сопоставлены с соответствующим ресурсом. Фактически число «1» в коде определяется как порядок разнесения его передачи. Кодовая матрица строится из всех кодов, совместно использующих одну и ту же группу ресурсов. Очевидно, что код с большим весом (то есть числом элементов в шаблоне) обеспечивает более высокий порядок разнообразия. В этом случае можно ожидать более надежную передачу данных, причем сложность также увеличивается.

В PDMA неортогональные шаблоны выделяются разным пользователям для выполнения мультиплексирования. Эти шаблоны тщательно разработаны на множестве областей кода, мощности и пространства, чтобы получить условия для использования SIC. При наличии этого свойства в приемнике, выполненном на основе многопользовательского метода обнаружения MPA, может быть разработан не-

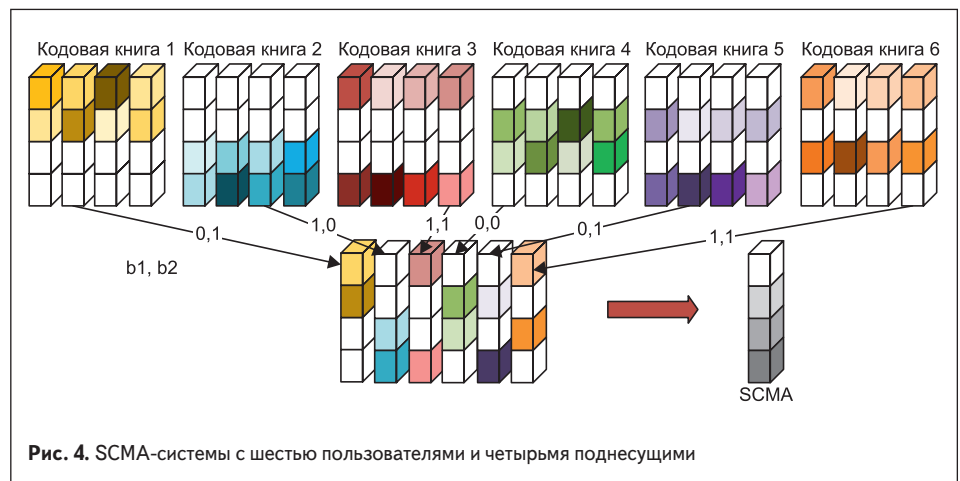


Рис. 4. SCMA-системы с шестью пользователями и четырьмя поднесущими

сложный SIC с надежными характеристиками. В передатчике, как и в SCMA, пользователи в PDMA также распределены в соответствии с разреженной матрицей сигнатур. Основное отличие от SCMA состоит в том, что количество блоков ресурсов, занимаемых каждым пользователем в PDMA, может отличаться. Используя разреженную матрицу сигнатур, PDMA может увеличить пропускную способность системы за счет перегрузки.

### Сравнение методов NOMA

Теоретически методы NOMA могут приближаться к многопользовательской пропускной способности с помощью оптимального MUD. Однако в практических системах существуют ограничения по их применению — например, сложность приемника, энергетическая эффективность, пиковая скорость передачи данных, а также требования к синхронизации и задержке. Так, необходимо поддерживать большое количество пользователей в системах связи массового машинного типа (mMTC), которые обычно укомплектованы аккумулятором с ограниченным зарядом. Поэтому в них для уменьшения действия помех должны быть предусмотрены низкоскоростные коды FEC. Поскольку восходящий трафик mMTC обычно состоит из коротких пакетов данных, для уменьшения накладных расходов и задержки должен обеспечиваться режим свободного доступа. Более того, срок службы батареи терминалов mMTC должен быть очень долгим, что требует наличия приемника низкой сложности и сигналов с низким PAPR для повышения КПД усилителя мощности.

Напротив, в сценариях расширенной мобильной широкополосной связи (eMBB) высокий пик спектральной эффективности становится основной проблемой, в то время как сложность базовой станции может быть высокой в отличие от PAPR передаваемых сигналов и сложности мобильного приемника. Кроме того, в приложениях сверхнадежной связи с малой задержкой (URLLC), таких как пользовательское 3D-видео и дополненная реальность, связь между автомобилями и удаленное управление машинами, дронами и роботами, малая задержка и низкие коэффициенты потери пакетов являются первоочередными задачами.

В таблице сравниваются различные методы NOMA с точки зрения их PAPR, сложности приемника, задержки, доступа без грантов, пользовательской нагрузки и пиковой пропускной способности. PAPR MC-RSMA, MUSA и PD-NOMA выше из-за их суперпозиционной природы, они более уязвимы к нелинейности и требуют усилителя мощности с высокой

линейностью на передатчике. Метод последовательного подавления помех в приемнике PD-NOMA приводит к высокой сложности и задержке. Однако когда используется приемник на основе MPA, что характерно для IDMA, LDS-CDMA и SCMA, то сложность и задержка приемника выше, даже если используется разреженная матрица расширения. Кодовый домен NOMA способен поддерживать доступ без грантов, но его пиковая пропускная способность ограничена из-за его природы с расширенным спектром. Для кодового домена NOMA пользовательская нагрузка определяется количеством доступных кодов расширения, что относительно мало в RSMA. В PD-NOMA высокая пользовательская нагрузка может поддерживаться за счет сложной стратегии распределения ресурсов и высокой сложности приемника.

### Заключение

Цель настоящего обзора — ознакомить читателей с возможностями и преимуществами, которые предлагает технология NOMA, а также со сценариями ее практического использования. Ниже представлен список литературы, использованной в этом обзоре. ■

### Литература

- Ding Z., Liu Y., Choi J., Sun Q., El-kashlan M., I C.-L., Poor H. V. Application of non-orthogonal multiple access multiple access in LTE and 5G networks // IEEE Commun. Mag. 2017. Vol. 55. No. 2.
- Dai L., Wang B., Yuan Y., Han S., I C.-L., Wang Z. Nonorthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities and future research trends // IEEE Commun. Mag. 2015. Vol. 53. No. 9.
- Wei D. W. K. N. Z., Yuan J., El-kashlan M., Ding Z. A survey of downlink non-orthogonal multiple access for 5G wireless communication networks // ZTE Commun. 2016. Vol. 14. No. 4.
- Saito Y., Benjebbour A., Kishiyama Y., Nakamura T. System level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA). Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. London, UK, Sept. 2013.
- Ding Z., Yang Z., Fan P., Poor H. V. On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users // IEEE Signal Process. Lett. 2014. Vol. 21. No. 12.
- Nikopour H., Baligh H. Sparse code multiple access. Proc. IEEE Int. Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Commun. London, UK, Sept. 2013.

- Taherzadeh M., Nikopour H., Bayesteh A., Baligh H. SCMA codebook design. Proc. IEEE Veh. Tech. Conf. Las Vegas, NV, US, Sept. 2014.
- Dai X., Chen S., Sun S., Kang S., Wang Y., Shen Z., Xu J. Successive interference cancellation amenable multiple access (SAMA) for future wireless communications. Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Systems. Coimbatore, India, Nov. 2014.
- Chen S., Ren B., Gao Q., Kang S., Sun S., Niu K. Pattern division multiple access (PDMA) — a novel non-orthogonal multiple access for 5G radio networks // IEEE Trans. Veh. Tech. 2016. Vol. PP. No. 99.
- Ding M. Z., Fan P., Poor H. V. Impact of user pairing on 5G non-orthogonal multiple access // IEEE Trans. Veh. Tech. 2016. Vol. 65. No. 8.
- Li P. Interleave-division multiple access and chip-by-chip iterative multi-user detection // IEEE Radio Commun. 2005. Vol. 43. No. 6.
- Nikopour H., Baligh H. Sparse Code Multiple Access. Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Sep. 2013.
- Chen S., Ren B., Gao Q., Kang S., Sun S., Niu K. Pattern division multiple access. A novel nonorthogonal multiple access for fifth-generation radio networks // IEEE Trans. Veh. Technol. 2017. Vol. 66. No. 4.
- Mazzini G. Power division multiple access. Proc. IEEE Int. Conf. Universal Pers. Commun. (ICUPC), Oct. 1998. Vol. 1.
- Saito Y., Kishiyama Y., Benjebbour A., Nakamura T., Li A., Higuchi K. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access. Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Jun. 2013.
- Ding Z., Liu Y., Choi J., Sun Q., El-kashlan M., I C.-L., Poor H. V. Application of non-orthogonal multiple access multiple access in LTE and 5G networks // IEEE Commun. Mag. 2017. Vol. 55. No. 2.
- Ding Z. et al. A survey on non-orthogonal multiple access for 5 networks: Research challenges and future trends // IEEE J. Sel. Areas Commun. 2017. Vol. 35. No. 10.
- Dai L. et al. A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G // IEEE Communication Surveys & Tutorials. Third Quarter. 2018. Vol. 20. No. 3.
- Vaezi M., Ding Z. Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond. Springer, 2019.
- Imran M. A., Sambo Y. A., Abbasi Q. H. Enabling 5G Communication Systems to Support Vertical Industries. John Wiley & Sons Ltd, 2019.
- Dai L., Wang B., Yuan Y. et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends // IEEE Communications Magazine. 2015. Vol. 53. No. 9.
- Покаместов Д. А., Крюков Я. В., Рогожников Е. В. и др. Концепция физического уровня систем связи пятого поколения // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2017. Т. 60. № 7.
- Кокорева Е. В. Неортогональный множественный доступ в системах мобильной связи 5G // Экономика и качество систем связи. 2018. № 2.

Т а б л и ц а . Сравнение методов NOMA

| NOMA     | PAPR                                      | Сложность приемника | Задержка сигнала                         | Доступ без запроса | Пользовательская нагрузка | Пиковая пропускная способность |
|----------|---|---------------------|--|--------------------|---------------------------|--------------------------------|
| IDMA     | Низкий                                    | Высокая             | Большая                                  | Да                 | Высокая                   | Низкая                         |
| RSMA     | Низкий для SC-RSMA<br>Высокий для MC-RSMA | Низкая              | Большая для SC-RSMA<br>Малая для MC-RSMA | Да                 | Низкая                    | Низкая                         |
| LDS-CDMA | Низкий                                    | Высокая             | Большая                                  | Да                 | Средняя                   | Низкая                         |
| SCMA     | Низкий                                    | Высокая             | Большая                                  | Да                 | Средняя                   | Низкая                         |
| MUSA     | Высокий                                   | Низкая              | Малая                                    | Да                 | Высокая                   | Низкая                         |
| PD-NOMA  | Высокий                                   | Средняя             | Средняя                                  | Нет                | Высокая                   | Высокая                        |