

УДК 621.396.2

## НЕОРТОГОНАЛЬНЫЙ МНОЖЕСТВЕННЫЙ ДОСТУП: ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ

*Бакулин М.Г., доцент МТУСИ, e-mail: m.g.bakulin@gmail.com;*

*Крейнделин В.Б., профессор, заведующий кафедрой МТУСИ, e-mail: vitkrend@gmail.com;*

*Шумов А.П., доцент РГРТУ, e-mail: magnit2250@mail.ru*

### NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS: MAIN DIRECTIONS AND CAPABILITIES

*Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Shumov A.P.*

*Non-orthogonal multiple access (NOMA) today becomes an important enabling technology for the fifth-generation (5G) wireless systems to meet the heterogeneous demands on low latency, high reliability, massive connectivity, improved fairness, and high throughput. The key idea behind NOMA is to take off orthogonality requirement when servicing multiple users in the same resource block, such as a time slot, subcarrier, or spreading code. The NOMA principle is a general basis, and several recently proposed 5G multiple access schemes can be viewed as special cases. This article provides an overview of the latest NOMA research and innovations such as power-domain NOMA with single and multiple antennas in uplink and downlink, code-domain NOMA and other. In paper are considered various techniques of resource allocation such as user pairing and power allocation for NOMA systems, some forms of cooperative NOMA are discussed.*

**Key words:** Non-orthogonal multiple access (NOMA), power-domain, code-domain NOMA, MIMO, cooperative NOMA networks.

**Ключевые слова:** Неортогональный множественный доступ – Non-orthogonal multiple access (NOMA), 5G и за пределами, мобильная сотовая связь, технологии радиодоступа.

#### Введение

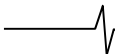
Каждое поколение сотовых сетей приходит с новыми стандартами, технологиями и характеристиками, отличающимися от стандартов, технологий и характеристик предыдущих поколений. Это связано с тем, что новые поколения систем связи вводятся для поддержания новых сервисов, включая мультимедийные приложения, приложения, основанные на Internet-of-Things (IoT), vehicle-to-everything (V2X) коммуникации [1].

Появление новых областей использования ведет к резкому росту мобильного трафика, который, в свою очередь, приводит к значительному дефициту частотного ресурса, как к одному из наиболее критических вызовов, на который должны ответить системы связи 5G и следующих поколений.

Множественный доступ является одним из основополагающих принципов беспроводных коммуникационных систем. Он имеет значительное влияние на характер использования доступного частотного спектра, пропускную способность, задержку в системах связи. Применительно к сотовым системам множественный доступ представляет собой технологию, с помощью которой множество пользователей используют общие радиоресурсы для организации линий связи с базовой станцией (BS). Некоторые из широко используемых технологий множественного доступа в предыдущих поколениях со-

*В настоящее время неортогональный множественный доступ – non-orthogonal multiple access (NOMA) – становится важной технологией, которая может дать беспроводным сетям пятого поколения (5G) новые возможности для того, чтобы соответствовать новым требованиям по низкой задержке, высокой надежности, массовой соединяемости, повышенной справедливости для пользователей, высокой пропускной способности, которые уже сейчас планируются для беспроводных систем связи будущих поколений. Ключевая идея, лежащая в основе NOMA, состоит в том, чтобы снять условие ортогональности при обслуживании множества пользователей. Принцип NOMA представляет собой общую концепцию, и несколько недавно предложенных 5G схем множественного доступа могут рассматриваться как ее специальные случаи. В этой статье обсуждаются основы power-domain NOMA – NOMA в домене мощности – с одной или многими антеннами в условиях линий вверх и вниз, рассматриваются основные принципы code-domain NOMA – NOMA в кодовом домене. В статье рассматриваются разные технологии размещения ресурсов, такие как спаривание пользователей и размещение мощностей для систем с NOMA, обсуждаются основные формы кооперативного NOMA и его вариантов.*

товых сетей включают в себя множественный доступ с временным разделением (time division multiple access (TDMA)), множественный доступ с частотным разделением (frequency division multiple access (FDMA)), множественный доступ с кодовым разделением (code division multiple access (CDMA)). Эти технологии относятся к так называемому ортогональному множественному доступу – orthogonal multiple access (OMA). При OMA доступ пользователей является ортогональным, и в идеале пользователи при совместном использовании канала связи не должны создавать друг другу помех. В этих схемах множеству пользователей назначаются ортого-



нальные радиоресурсы во временной, частотной, кодовой областях или в их комбинации. В TDMA выделенный временной слот назначается каждому пользователю для передачи его сигналов. На приемных сторонах сигналы пользователей различаются путем идентификации соответствующих временных слотов. Аналогично FDMA делит доступную полосу частот (bandwidth (BW)) на несколько неперекрывающихся частотных подканалов, назначает каждый подканал отдельному пользователю и разрешает множеству пользователей посылать их сигналы, используя назначенные подканалы. На приемных сторонах сигналы пользователей, таким образом, различаются путем идентификации соответствующих частотных диапазонов. В отличие от FDMA и TDMA, CDMA назначает каждому пользователю уникальную ортогональную расширяющую последовательность, и пользователи передают свои сигналы, используя один и тот же частотно-временной ресурс за счет использования каждым пользователем назначенной ему уникальной расширяющей последовательности. На приемных сторонах сигналы пользователей разделяются за счет использования декорреляции, которая идентифицирует сигналы пользователей на основе соответствующих назначенных кодовых последовательностей, рассматривая при этом сигналы других пользователей как шум.

Теоретически, основанные на OMA системы, благодаря ортогональному размещению ресурсов не должны испытывать межпользовательской интерференции, вследствие чего для детектирования сигнала требуемого пользователя могут быть использованы приемники со сравнительно низкой сложностью. Однако, поскольку число ортогональных ресурсов ограничено, а количество пользователей, которых предполагается обслуживать в системах 5G, существенно возрастает, то системы OMA, скорее всего, не смогут обслуживать необходимое количество пользователей систем 5G и более поздних. В противоположность OMA неортогональный множественный доступ (non-orthogonal multiple access (NOMA)) допускает межпользовательскую интерференцию при размещении ресурсов для пользователей, и таким образом множество пользователей может быть обслужено с использованием одного и того же ресурса.

Как альтернатива OMA, NOMA вводит новую размерность за счет мультиплексирования внутри одной из классических временной/частотной/кодовой областей. Другими словами NOMA может рассматриваться как расширение, которое потенциально может быть интегрировано с существующими технологиями множественного доступа. Для снижения влияния интерференции в случае NOMA применяются схемы подавления интерференции, такие как successive interference cancellation (SIC) [2].

Ранее было показано, что NOMA имеет потенциал поддержания массовых соединений при обеспечении более высокой суммарной пропускной способности и равноправия пользователей. Основанные на NOMA сотовые сети начали разрабатываться для обеспечения появляющихся разнообразных приложений, требующих больших объемов данных. Принцип NOMA примени-

тельно к 5G сотовым сетям был первоначально введен в [3], где были также продемонстрированы его новые возможности. Новые возможности NOMA повлекли за собой большое число исследований [4-7], поэтому понимание принципов NOMA и характера его использования в сотовых системах связи является очень важным.

В этой статье мы рассматриваем концепцию NOMA, особенности разных вариантов этой схемы доступа и их возможности по обеспечению выполнения некоторых требований систем сотовой связи поколений 5G и последующих, чтобы дать соответствующую информацию тем, кто собирается исследовать или использовать новые технологии радиодоступа.

## Основы NOMA

NOMA стал важным принципом, используемым при разработке технологий радиодоступа для систем связи пятого поколения (5G) [8-10]. Хотя несколько технологий множественного доступа и были предложены для систем связи 5G, включая power-domain NOMA [11-13], sparse code multiple access (SCMA) [14, 15], pattern division multiple access (PDMA) [16, 17], low density spreading (LDS) [18], lattice partition multiple access (LPMA) [19], interleaved division multiple access (IDMA) [20], эти технологии основаны на одной и той же концепции, согласно которой более одного пользователя обслуживается в каждом ортогональном ресурсном блоке, например, таком как временной слот, частотный канал, один расширяющий код или одна ортогональная пространственная степень свободы.

Применение NOMA в сотовых сетях является относительно новым, однако связанные с ним технологии изучались в теории информации долгое время. Например, ключевые компоненты NOMA, такие как суперпозиционное кодирование, successive interference cancellation (SIC), message passing algorithm (MPA) были предложены уже более двух десятилетий назад [21, 22, 23]. Тем не менее, принцип NOMA, то есть отмена ортогональности, не был использован в предыдущих поколениях сотовых сетей. Неортогональный множественный доступ NOMA может быть интегрирован в существующие и будущие беспроводные системы благодаря его совместимости с другими коммуникационными технологиями. Например, было показано, что NOMA совместим с обычными технологиями OMA, такими как TDMA и OFDMA [24]. Поэтому NOMA был также предложен для включения в 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Long-Term Evolution Advanced (LTE-A) standard [25], где NOMA назван как Multi-User Superposition Transmission (MUST). В частности, без требования каких-либо изменений в LTE ресурсных блоках (то есть в OFDMA поднесущих) использование принципа NOMA обеспечивает двум пользователям одновременное обслуживание на одной и той же OFDMA поднесущей. Более того, NOMA не так давно был включен в новый американский цифровой TV стандарт (ATSC 3.0), где он назван как layered division multiplexing (LDM) [26]. В частности, спектральная эффективность TV вещания улучшается за счет использования принципа NOMA и наложения множественных потоков данных. Приведенные примеры ясно демонстри-

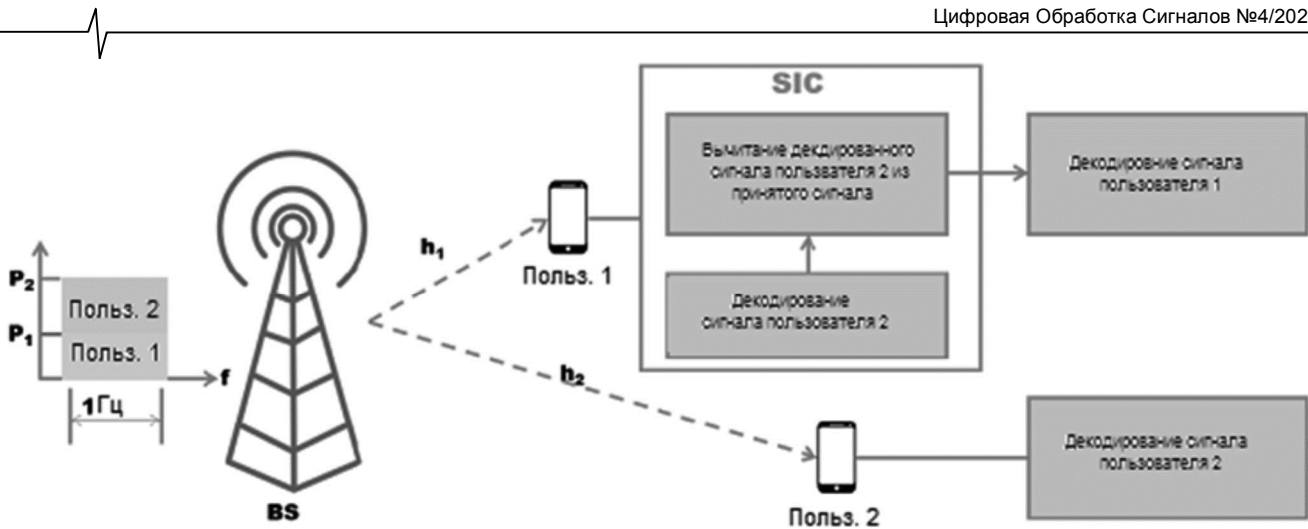


Рис. 1. Двухпользовательская линия вниз с NOMA в домене мощности [28]

руют большой потенциал NOMA не только для 5G сетей, но также для других систем, которые существуют и появятся.

Существующие схемы NOMA могут быть отнесены к двум основным категориям: power-domain NOMA (NOMA в домене мощности) и code-domain NOMA (NOMA в кодовом домене). Первая – power-domain NOMA – назначает уникальный уровень мощности пользователю, и множество пользователей передает свои сигналы, используя один и тот же частотно-временной-кодовый ресурс, с назначенной ему мощностью [4].

Уровень мощности для пользователя определяется на основе его канального коэффициента передачи: пользователю с более высоким канальным усилением часто назначается более низкий уровень мощности. На приемных сторонах сигналы разных пользователей могут быть разделены путем использования разницы пользовательских мощностей на основе SIC.

NOMA в кодовом домене основывается на кодовых книгах, расширяющих последовательностях, шаблонах чередования – interleaving patterns или скремблирующих последовательностях для неортогонального назначения ресурсов пользователям [27].

В классических CDMA системах несколько пользователей используют одни и те же частотно-временные ресурсы за счет использования уникальных пользовательских расширяющих последовательностей. По сравнению с классическим CDMA отличительной чертой code-domain NOMA является то, что расширяющие последовательности ограничены разреженными последовательностями, называемыми также низкоплотными последовательностями или неортогональными последовательностями с низкой взаимной корреляцией.

В этой статье вначале будут рассмотрены основные принципы технологии NOMA в домене мощности, а затем кратко будут рассмотрены основные принципы технологии NOMA в кодовом домене, а также некоторых других технологий неортогонального множественного доступа.

#### NOMA в домене мощности для линии вниз

На рис. 1 представлена система NOMA, состоящая из одной базовой станции BS и двух пользователей, оборудованных одной антенной каждый.

Предположим, что  $x_1$  и  $x_2$  представляют собой сигналы, которые должны быть переданы от BS пользователям 1 и 2 соответственно. BS передает сигнал, сформированный в результате суперпозиционного кодирования [29] в виде

$$s = \sqrt{P_1}x_1 + \sqrt{P_2}x_2, \quad (1)$$

где  $P_i, i = 1, 2$  – передаваемая мощность пользователя  $i$ , а передаваемые сигналы пользователей  $x_i, i = 1, 2$ ,

имеют единичную мощность, то есть  $E\{|x_i|^2\} = 1$ , где  $E\{\cdot\}$  – оператор усреднения. Полная передаваемая мощность пользователей 1 и 2 может быть записана в этом случае как  $P = P_1 + P_2$ . Практически для конкретной системы мощность  $P$  задана и поделена на  $P_1$  и  $P_2$  согласно принятой схеме размещения мощностей – схеме power allocation (PA). Принятый сигнал пользователем  $i$  может быть выражен как

$$y_i = h_i s + n_i, \quad (2)$$

где  $h_i$  – комплексный канальный коэффициент передачи между BS и пользователем  $i$ , а  $n_i$  представляет собой гауссовский шум плюс интерференция со спектральной плотностью мощности  $N_{f,i}$ . Для многосотового сценария межсотовая интерференция также включена в  $n_i$ . Для разделения сигналов разных пользователей в приемниках используется SIC. Оптимальный порядок декодирования при SIC в линии вниз отличается от порядка декодирования для линии вверх и обычно задается в порядке возрастания канального усиления, нормализованного к мощности шума плюс мощность межсотовой интерференции, определяемого как  $|h_i|^2 / N_{f,i}$  [12, 13, 15-18]. При таком порядке каждый пользователь может в основном удалить интерференцию от сигналов других пользователей, чья очередь декодирования наступает перед этим пользователем [7]. Это возможно потому, что скорость передачи пользователя  $j$  контролируется так, что его сигнал может быть корректно декодирован в приемнике пользователя  $j$ , таким образом, он также может быть декодирован любым другим пользователем  $i$  с  $|h_i|^2 / N_{f,i} > |h_j|^2 / N_{f,j}$ . Более конкретно, для случая двухпользовательского NOMA с  $|h_1|^2 / N_{f,1} > |h_2|^2 / N_{f,2}$ , пользователь 2 не выполняет подавление интерферен-

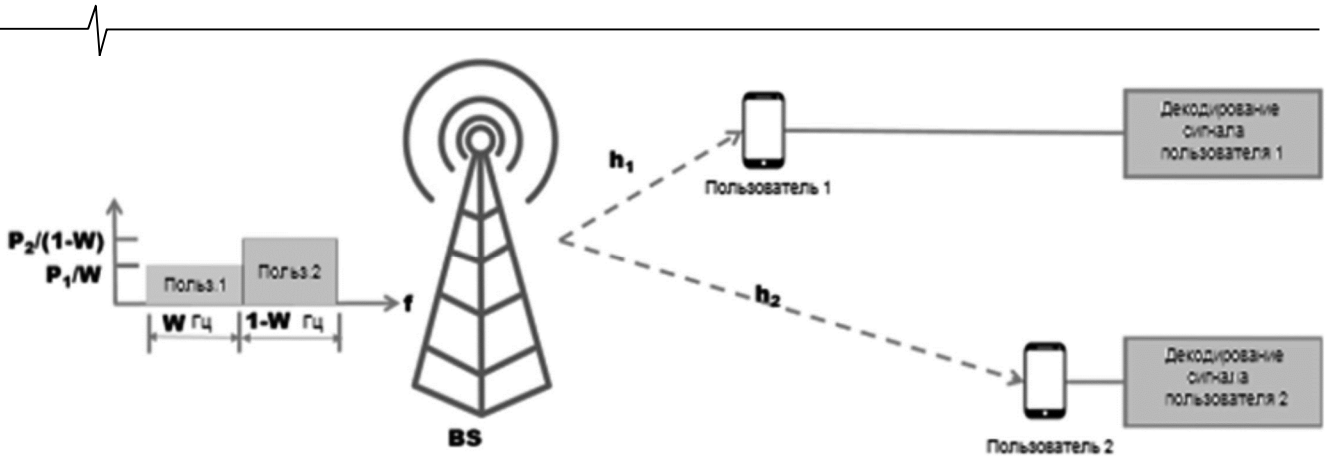


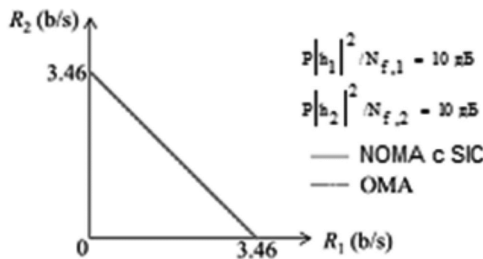
Рис. 2. Двухпользовательская линия вниз с FDMA

ции, так как он становится первым в порядке декодирования; тогда как пользователь 1 первым декодирует сигнал пользователя 2 и вычитает его из принятого сигнала перед декодированием своего собственного сигнала. Поэтому пропускная способность пользователя  $i$ ,  $R_i$ , представляется как

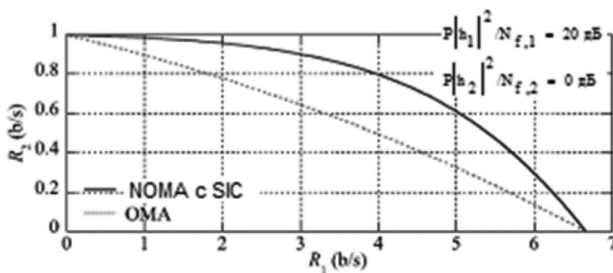
$$R_1 = \log_2(1 + P_1 |h_1|^2 / N_{f,1}),$$

$$R_2 = \log_2(1 + P_2 |h_2|^2 / (P_1 |h_2|^2 + N_{f,2})) \quad (3)$$

На рис. 2 представлена система OMA с FDMA, состоящая из одной базовой станции BS и двух пользователей, оборудованных одной антенной каждый для передачи сигналов от базовой станции пользователям, то есть линии вниз.



а) симметричные каналы



б) несимметричные каналы

Рис. 3. Области пропускной способности для линии вниз [7]

В линии вниз OMA с полосой of  $W$  ( $0 \leq W \leq 1$ ) Гц, назначенной пользователю 1, и остающейся полосой  $1-W$  Гц, назначенной пользователю 2, скорость  $R_i$  может быть выражена соотношениями

$$R_1 = W \log_2(1 + P_1 |h_1|^2 / N_{f,1}),$$

$$R_2 = (1-W) \log_2(1 + P_2 |h_2|^2 / (1-W)N_{f,2}) \quad (4)$$

На рис. 3(а) и 3(б) приведены области пропускной способности для случаев симметричного и асимметрич-

ного каналов соответственно. В симметричном канале отношения сигнал/шум – signal-to-noise ratios (SNRs),  $P |h_i|^2 / N_{f,i}$  двух пользователей одинаковы, тогда как в асимметричном канале они различны.

На рис 3(а),  $P |h_1|^2 / N_{f,1}$  и  $P |h_2|^2 / N_{f,2}$  приняты равными 10 дБ. На рис. 3(б),  $P |h_1|^2 / N_{f,1}$  и  $P |h_2|^2 / N_{f,2}$  установлены равными 20 and 0 дБ, соответственно. В случае симметричного канала области пропускной способности для OMA и NOMA с SIC являются идентичными. В случае асимметричного канала максимум полной пропускной способности канала достигается, когда вся передаваемая мощность и полоса размещаются только пользователю 1. Этот максимум достигается обеими схемами множественного доступа, однако, область пропускной способности NOMA с SIC гораздо шире, чем для OMA в случае асимметричного канала. Например, если мы хотим задать  $R_2$  равной 0,8 b/s, то достижимая  $R_1$  для NOMA с SIC примерно в два раза больше, чем для OMA. Это связано с тем, что пропускная способность пользователя 1 с высоким  $P |h_1|^2 / N_{f,1}$  ограничена полосой, а не мощностью, и суперпозиционное кодирование с пользователем 2 позволяет пользователю 1 использовать полный диапазон частот при размещении ему только небольшого количества передаваемой мощности из-за совместного использования мощности с пользователем 2. Таким образом, пользователь 1 создает только небольшое количество интерференции,  $P_1 |h_2|^2 / N_{f,2}$ , пользователю 2. Напротив, OMA должен разместить значительную часть полосы пользователю 2, чтобы увеличить его пропускную способность, а это вызывает существенное снижение пропускной способности пользователя 1, которая ограничена полосой. Поэтому в сотовой линии вниз, где каналные условия для пользователей различны из-за эффекта близкий-далекий, NOMA может улучшить обмен между эффективностью системы и равноправием между пользователями по сравнению с OMA.

Отметим, что мы рассматриваем симметричные и асимметричные каналные условия (разные каналные условия для пользователей 1 и 2) для сравнения областей скорости данных. Из сравнения областей скорости данных можно видеть, что OMA и NOMA в симметричных каналных условиях обеспечивают одинаковые об-

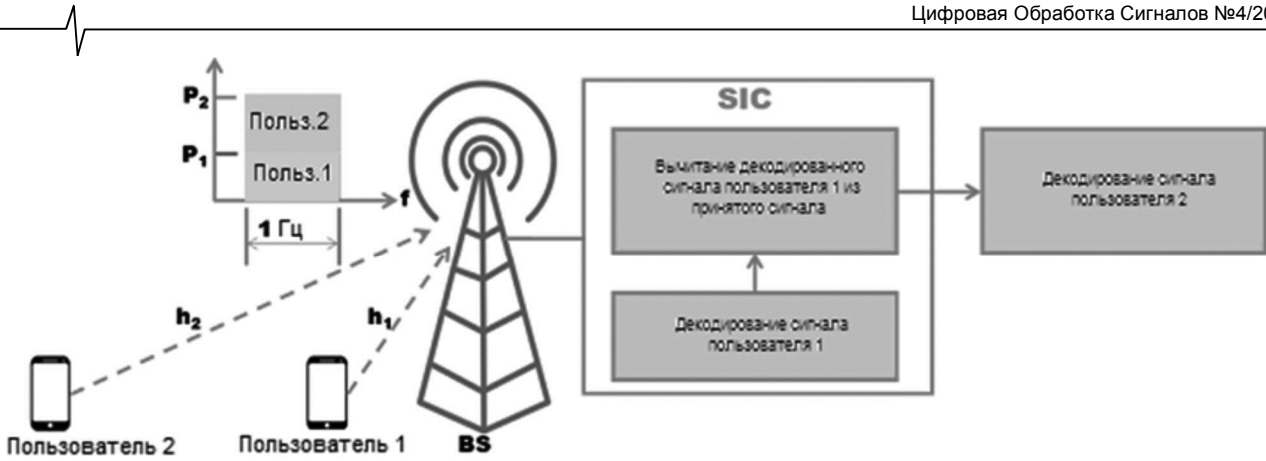


Рис. 4. Двухпользовательская линия вверх с NOMA в домене мощности

ласти скорости данных, то есть мультиплексирование в энергетической области становится невыгодным, если сигналы обоих пользователей подвергаются действию одинаковых интерференции и шума [7]. Поэтому по сравнению с OMA, NOMA в сотовых линиях вниз обеспечивает более высокую суммарную пропускную способность и дает лучший обмен между системной эффективностью и справедливостью между пользователями, когда каналные условия для пользователей различны. В работе [30] показано, что NOMA значительно превосходит и другие формы технологий OMA, включая TDMA и OFDMA, по пропускной способности в различных условиях. Как обобщение двухпользовательского сценария на  $K$ -пользовательский для NOMA в линии вниз с параметрами

$$|h_1|^2 / N_{f,1} > |h_2|^2 / N_{f,2} > \dots > |h_k|^2 / N_{f,k} \dots > |h_1|^2 / N_{f,k}$$

(и следовательно,  $P_1 < P_2 < \dots < P_k \dots < P_K$ ) и 1 Гц BW, скорость данных пользователя 1 остается такой же, как согласно (3), тогда как скорость данных любого другого пользователя  $k$  определяется соотношением

$$R_k^{NOMA} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_k |h_k|^2}{\sum_{j=1}^{k-1} P_j |h_k|^2 + N_{f,k}} \right). \quad (7)$$

Хотя теоретически ограничений на количество NOMA пользователей нет, с практической точки зрения NOMA в линии вниз применяется к небольшому числу пользователей (обычно к двум или трем) в кластере; для большого числа пользователей имеет место увеличение скорости ошибок из-за их распространения, преимущественно возникающего из-за несовершенного SIC. Также с ростом числа пользователей в кластере последнее пользовательское устройство требует большей вычислительной мощности и больших затрат энергии, что может быть невыполнимым на практике, особенно для устройств с ограниченными ресурсами. Необходимо отметить, что NOMA в домене мощности в линии вниз был стандартизован в 3rd Generation Partnership Project (3GPP) LTE Release 13, где он назван как multiuser superposition transmission (MUST) [25].

**NOMA в домене мощности для линии вверх**

На рис. 4 представлены линии вверх при NOMA, где пользователи 1 и 2 одновременно передают свои сигналы то  $x_1$  и  $x_2$  на BS.

Принятый сигнал на BS определяется соотношением

$$y = \sum_{i=1}^2 \sqrt{P_i} h_i x_i + n, \quad (8)$$

где  $P_i$  – передаваемая мощность для пользователя  $i$  с  $E\{|x_i|^2\} = 1$ ,  $n$  представляет собой гауссовский шум плюс интерференцию со спектральной плотностью мощности  $N_f$ . BS передает по линии вниз опорный сигнал, на основе которого пользователь выполняет оценку канала. Таким образом, пользователи могут регулировать свою передаваемую мощность  $P_i$  или  $P_i$  в зависимости от их каналных усилений. Пользователь 1 снова отмечается как сильный, имеющий более высокое каналное усиление по сравнению с более слабым пользователем 2. Над принятым суперпозиционным сигналом BS выполняет SIC для разделения пользовательских сигналов. BS первым декодирует сигнал пользователя 1, рассматривая сигнал пользователя 2 как шум [31], а затем вычитает декодированный сигнал пользователя 1  $\hat{x}_1$  из принятого сигнала  $y$ . Далее из того, что осталось, декодируется сигнал пользователя 2  $\hat{x}_2$ . Таким образом, в линии вверх NOMA пользователь 1 испытывает интерференцию от пользователя 2, тогда как пользователь 2 не получает интерференции от пользователя 1, так как сигнал пользователя 1 предварительно удален перед декодированием сигнала пользователя 2. В противоположность этому пользователь 2 в линии вниз NOMA испытывает интерференцию от пользователя 1, тогда как пользователь 1 не испытывает интерференции от пользователя 2, так как сигнал пользователя 2 предварительно удален перед декодированием сигнала пользователя 1. Если SIC выполнено без ошибок, то достижимая скорость данных пользователя  $i$  NOMA  $R_i^{NOMA}$  для используемой полосы в 1 Гц выражается как

$$R_1^{NOMA} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |h_1|^2}{P_2 |h_1|^2 + N_f} \right), \quad (9)$$

$$R_2^{NOMA} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 |h_2|^2}{N_f} \right). \quad (10)$$

Достижимая суммарная пропускная способность равна  $R^{NOMA} = R_1^{NOMA} + R_2^{NOMA}$ . Можно видеть, что такие же уравнения, как 4), могут также быть использованы для

вычисления достижимых скоростей данных линии вверх OMA пользователей 1 и 2 после замены  $N_{f,i}$  на  $N_f$ . Также как для линии вниз NOMA, может быть показано, что линия вверх NOMA превосходит аналог с OMA с точки зрения достижимой скорости данных и суммарной пропускной способности на основе сравнения соотношений (9) и (10) с их аналогами для OMA [7].

Как обобщение 2-х-пользовательского случая, для  $K$ -пользовательской линии вверх NOMA с  $|h_1|^2 / N_f > |h_2|^2 / N_f > \dots > |h_k|^2 / N_f \dots > |h_1|^2 / N_f$  (и следовательно,  $P_1 < P_2 < \dots < P_k \dots < P_K$ ) и 1 Гц BW, скорости данных пользователей  $k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K-1, K$  могут быть записаны как

$$R_k^{NOMA} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_k |h_k|^2}{\sum_{j=k+1}^K P_j |h_j|^2 + N_f} \right), \quad (11)$$

$$R_K^{NOMA} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_K |h_K|^2}{N_f} \right). \quad (12)$$

В отличие от линии вниз NOMA линия вверх NOMA может обеспечить обслуживание относительно большего числа пользователей, так как BS может быть оборудована требуемыми вычислительными мощностями и энергией. Кроме того, BS может применить более эффективные схемы декодирования для снижения влияния интерференции. Поэтому линии вверх NOMA являются более предпочтительными по сравнению с линиями вниз NOMA для коммуникаций машинного типа [32].

Вместе с тем необходимо отметить, что при применении NOMA для ослабления интерференции требуются более сложный передатчик и приемник. Более того, NOMA в домене мощности обычно работает хорошо, когда только два или несколько пользователей делят один и тот же ресурсный блок, так как с увеличением числа пользователей, мультиплексированных в домене мощности, интерференция множественного доступа (multiple access interference (MAI)) возрастает, и характеристики NOMA ухудшаются.

### Размещение мощности при NOMA

NOMA способен поддерживать неравные скорости передачи для пользователей, имеющих разные каналные условия, путем назначения им разных излучаемых мощностей. Поэтому механизм распределения мощностей для разных пользователей является критическим для NOMA в домене мощности. Как упоминалось ранее, SIC приемник работает в порядке понижения мощности сигнала. Конкретно, большая мощность назначается пользователям с плохими каналными условиями. В этом случае, интерференция от пользователей с хорошими каналами значительно снижается, поскольку им назначаются меньшие мощности. Между тем, точность детектирования для пользователей с плохими каналами может также быть улучшена. Так как распределение мощности в NOMA базируется на распределении каналных условий, случаи с хорошими и плохими каналами имеют отличия и должны быть исследованы отдельно, как в [33].

Когда доступна точная CSI, проблема оптимизации может быть сформулирована так, чтобы максимизировать индивидуальную/суммарную скорость при учете справедливости между разными пользователями. При средних каналных условиях проблема оптимизации может быть сформулирована для минимизации максимальной вероятности отказа. Достаточно подробная информация по достигнутому уровню работ по распределению мощности в NOMA с разными стратегиями относительно уровня справедливости приведена в работе [34]. В ней оцениваются разные стратегии размещения мощности и соответствующие им уровни сложности и справедливости между пользователями. Так, размещение большей мощности слабым пользователям дает средний уровень справедливости при низкой сложности [11, 12, 13, 35], обеспечение приоритета высокого уровня справедливости требует высокой сложности [33, 36, 37], максимизация средней геометрической скорости данных пользователей дает средний уровень справедливости при сравнительно низкой сложности [38-41], вопросы обмена пропускной способностью и справедливостью между пользователями рассматривались в работах [42-44].

Необходимо отметить, что наиболее критический вопрос распределения мощности при NOMA возникает из-за невыпуклого свойства упорядоченных ограничений мощности, которые делают проблему оптимизации неотслеживаемой. Поэтому, видимо, следует ожидать дальнейших исследований в направлении оптимального распределения мощности между пользователями.

### NOMA с использованием многоантенных технологий

Многоантенные технологии могут дать дополнительную степень свободы в пространственной области и обеспечить дальнейшее улучшение характеристик NOMA. В последнее время многоантенный NOMA привлек значительное внимание исследователей [45, 36, 46, 7, 47-59]. В отличие от NOMA, основанного на SISO – single-input-single-output, где каналы обычно представляются как скаляры, один из исследовательских вызовов в многоантенном NOMA обусловлен проблемой упорядочивания пользователей, так как каналы обычно представляются в форме векторов и матриц. В настоящее время возможные варианты многоантенной NOMA можно разделить на две категории, в которых один или много пользователей обслуживаются одним вектором формирования луча. Путем расположения разных пользователей в разных лучах в одном и том же ресурсном блоке качество обслуживания – quality of service (QoS) – каждого пользователя может быть гарантировано в многоантенных системах NOMA путем принуждения лучей поддерживать predetermined порядок декодирования. Этот тип многоантенной схемы NOMA был впервые предложен в работе [54], чтобы исследовать оптимизацию мощности для максимизации эргодической пропускной способности. Предложенная многоантенная схема NOMA может позволить достичь значительного улучшения характеристик по сравнению с обычными схемами OMA.

Кластер пользователей может использовать один и тот же луч. Пространственные каналы разных пользова-

телей внутри одного кластера рассматриваются как сильно коррелированные. Поэтому лучи для разных кластеров должны быть построены так, чтобы гарантировать ортогональность каналов для разных кластеров друг другу, чтобы подавить межкластерную интерференцию. Для NOMA на основе multiple-input-single-output (MISO), многоадресная схема формирования лучей была предложена в [46], где сначала ZF формирование лучей было применено для ослабления интерференции от соседних кластеров, а затем построены оптимальные векторы формирования лучей, чтобы минимизировать полную передаваемую мощность внутри каждого кластера. Схема NOMA, основанная на MIMO для одновременного применения разомкнутого случайного формирования лучей и внутрилучевой SIC была предложена в работе [45]. Однако, здесь характеристики системы значительно ухудшены, так как случайное формирование лучей может внести неопределенность на сторону пользователя. Позже направление предварительного кодирования и детектирования с фиксированным распределением мощности было предложено в [48], чтобы решить проблемы, вызванные случайным формированием лучей, и продемонстрировать, что NOMA на основе MIMO может достичь лучших характеристик, чем OMA на основе MIMO даже для пользователей, которые испытывают сильную соканальную интерференцию. Кроме того, в работах [55, 56] доказано превосходство MIMO-NOMA над MIMO-OMA с точки зрения суммарной пропускной способности канала и эргодической суммарной пропускной способности. Более того, двухкоординатные подходы к формированию лучей были предложены в [49] для борьбы с межсотовой интерференцией в двухсотовых MIMO-NOMA сетях, в которых две BS совместно оптимизируют свои векторы формирования лучей для улучшения скоростей данных пользователей на краю сот. Этот подход расширен на произвольное количество сот в [50], где охарактеризовано максимальное количество пользователей, поддерживаемых предложенной схемой в многосотовых MIMO сетях. Больше подробностей о многосотовых MIMO-NOMA подходах можно найти в работе [51].

Информацию по достигнутому уровню работ по многоантенным NOMA можно найти в работах [34, 4, 36, 46, 7, 47-57] для разных сценариев использования, разных MIMO технологий, разных метрик качества, разных характеристик режимов использования.

### Кооперативный NOMA

В сотовых сетях пользователь на границе соты обычно принимает сигнал с низкой мощностью и меньшей скоростью данных по сравнению с пользователями, находящимися вблизи BS. Ретрансляционная и координатная технология многоточечной – multipoint relaying and coordinated (CoMP) – передачи и приема широко применяется для повышения скоростей передачи для пользователей на краях соты [60]. Сценарий с пользователями, передающими на разных скоростях естественно согласуется со сценариями приложений, типичных для NOMA.

Основная идея NOMA с ретрансляцией состоит в

использовании абонентов с лучшей CSI как ретрансляторов – decode-and-forward (DF) – или – amplify-and-forward (AF) – для повышения скорости передачи пользователей с плохой CSI. Модель совместного NOMA, поддерживающая  $M$  пользователей с  $M$  временными слотами, была предложена в [61]. В первом временном слоте выполняется традиционная некооперативная схема NOMA. Во втором временном слоте пользователь с лучшей CSI действует как DF ретранслятор для пользователя со второй лучшей CSI. В следующие временные слоты пользователь с  $m$ -й лучшей CSI работает как ретранслятор для пользователя с последующей худшей CSI для повышения скоростей передачи.

CoMP передача, где несколько BS вместе поддерживают пользователей на краях сот, способна улучшить характеристики этих пользователей. NOMA был первым примененным совместно с CoMP [62], где две скоординированные BS использовали код Alamouti, чтобы поддержать пользователя на краю соты в канале NOMA. В результате эффективность NOMA в CoMP системах была также продемонстрирована в работе [63] в сравнении с обычной NOMA с совместной передачей. Скоординированная схема с прямой передачей и схема с ретрансляцией – coordinated direct and relay transmission (CDRT) – также была рассмотрена в [64], где BS связывается с близким пользователем и ретранслирует, одновременно используя NOMA в первом временном слоте, связываясь с далеким пользователем с помощью ретрансляции в последующие временные слоты. Эта основанная на NOMA CDRT решает основной вызов путем использования свойства NOMA, которое позволяет приемнику получать дополнительную информацию, такую как сигналы других пользователей для подавления интерференции.

Подробная сводка существующих работ по NOMA в кооперативных коммуникациях приведена в работе [34], а также в работах [35, 61, 62, 64-67] для разных технологий, метрик и разных характеристик используемых схем.

### NOMA на основе когнитивного радио

Чтобы решить вопрос дефицита спектра в беспроводных коммуникациях, было предложено когнитивное радио (CR) [68, 69], которое позволяет нелицензированным пользователям использовать лицензированные полосы частот, пока они не создают недопустимых помех лицензированным пользователям. Технологией, дающей возможности для CR, является зондирование спектра [70-72], а вопрос поиска баланса между нагрузкой от мониторинга и CR пропускной способностью был исследован в работах [73, 74].

Если нелицензированный пользователь находится на достаточной дистанции от лицензированного, с которым он делит один и тот же лицензированный спектр, то интерференция между ними будет в общем небольшой. Поэтому CR в этом случае может рассматриваться как специальный случай NOMA в локальной области, тогда как NOMA, введенный в предыдущих разделах, относится к области мощности, кода или нескольким областям. Коммуникации device-to-device (D2D) [75, 76], являющиеся популярной областью исследований, становятся спе-



циальным случаем CR, если два пользователя в D2D коммуникациях рассматриваются как простая CR сеть. В дополнение к локальному домену CR может также использовать пространственный домен [77], [78] и частотно-пространственный домен [79].

Модель сети, лежащая в основе CR, подобна NOMA, которая распределяет мощность разных пользователей под некоторыми SINR ограничениями. Схема когнитивного радио в стиле NOMA (CR-NOMA) была предложена в [80], и она отличается от традиционной схемы с фиксированным распределением мощности. В [81] изучались, основанные на NOMA CR сети, и была выведена замкнутая форма выражений для вероятности отказа. В дополнение, в [82-85] схемы распределения мощности для CR-NOMA, и основанные на NOMA CR сети были развиты для улучшения характеристик систем с точки зрения суммарной скорости, энергетической эффективности (EE) и других метрик.

### Спектральная (SE) и энергетическая (EE) эффективность NOMA

Напомним, что когда планируют разработку сетей 5G, то SE и EE являются двумя важными метриками качества. NOMA может обеспечить повышенные SE и EE благодаря высокой степени свободы в энергетическом домене, особенно для сетей IoT, которые требуют массовой подключаемости, но при низкой расходуемой мощности в сенсорных узлах. Более конкретно, NOMA рассматривается как возможность повысить SE сетей 5G [86-89]. NOMA с учетом EE также была исследована в [90], где был предложен алгоритм квазиоптимального распределения ресурсов с целью максимизации EE систем. Более того, EE сетей NOMA при условии минимальной требуемой скорости данных для каждого пользователя может быть максимизирована, используя подход, предложенный в [91]. Так же как и в большинстве беспроводных сетей [92], в сетях NOMA повышенные SE и EE не могут быть достигнуты одновременно. Поэтому в будущем ожидается увеличение числа работ по обмену между SE и EE в NOMA. Более полный обзор power-domain NOMA может быть найден в [4].

### NOMA в кодовом домене

NOMA в кодовом домене может поддерживать множество передач внутри одного и того же частотно-временного ресурсного блока путем назначения разных кодов разным пользователям. Он дает некоторый выигрыш ценой расширения полосы сигнала по сравнению с NOMA в области мощности. Концепция NOMA в кодовом домене заимствована из классических CDMA систем, в которых множество пользователей используют одни и те же частотно-временные ресурсы, но применяют уникальные пользовательские расширяющие последовательности. Ключевая разница при этом по сравнению с CDMA, однако, состоит в том, что расширяющие последовательности ограничены разреженными последовательностями или неортогональными последовательностями с низкой взаимной корреляцией. Существующие решения в code-domain (CD) NOMA в основном включают low-density spreading CDMA (LDS-

CDMA) [93], low-density spreading OFDM (LDS-OFDM) [42], sparse code multiple access (SCMA) [14], которые будут охарактеризованы ниже.

**LDS-CDMA:** LDS-CDMA [93] (low-density spreading) является новым типом CDMA. Его ключевая черта состоит в том, что low-density signature, которая имеет форму, подобную low-density parity-check (LDPC) matrix, применяется для конструирования кодовой книги. Когда число пользователей больше, чем число отсчетов на период символов в обычном CDMA, MAI присутствует неизбежно, и оптимальное многопользовательское детектирование выполнить очень сложно. Однако, из-за разреженной структуры сигнатуры в LDS-CDMA, при детектировании LDS-CDMA может быть применена квазиоптимальная многопользовательская схема детектирования с низкой сложностью, основанная на message passing algorithm (MPA), что существенно улучшает характеристики.

**LDS-OFDM:** LDS-OFDM [42] имеет свойства, подобные LDS-CDMA, за исключением того, что выход сигнатуры отображается на поднесущие OFDM, а не на временные отсчеты в CDMA. Поэтому может быть использован MPA детектор с низкой сложностью. По сравнению с LDS-CDMA LDS-OFDM использует передачу со многими несущими, что делает его более подходящим для широкополосных каналов. Кроме того, совместимость с OFDM делает LDS-OFDM более гибким при распределении ресурсов [42].

**SCMA:** В SCMA (sparse code multiple access – множественный доступ с разреженным кодовым разделением) [14] путем применения разреженной кодовой книги, подобной матрице сигнатур в LDS (low-density signature), некоторое число ресурсных блоков может поддерживать больше пользователей через рассеяние. Рис. 5 демонстрирует принцип SCMA, где шесть пользователей делят четыре ресурсных блока.

Например, для рис. 5 сигнатурная матрица может быть выражена как

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Хотя часть пользователей делят один и тот же блок, другой блок может быть использован для различения разных пользователей, когда случаются противоречия.

Кроме разреженного рассеяния, SCMA использует многомерные созвездия для снижения сложности приемника и дальнейшего улучшения SE. Благодаря многомерности, созвездия в одном ресурсном блоке могут быть спроецированы в их подпространства [15].

Например, 4-х точечное QAM созвездие может быть спроецировано в 3-х точечное созвездие. Даже когда две точки сталкиваются в одном ресурсном блоке или когда, скажем, имеется одно измерение, то они могут быть различены в других используемых блоках. Благодаря меньшему числу точек созвездия сложность приемника может быть понижена. Более того, построение созвездия может фокусироваться на улучшении качества детектирования. Например, дизайн, основанный на



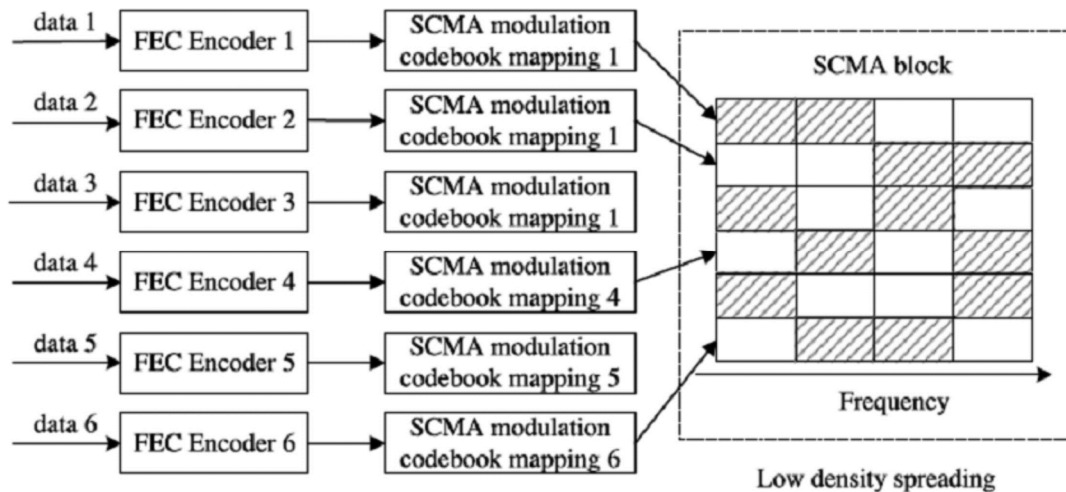


Рис. 5. Множественный доступ с разреженным кодированием – sparse code multiple access (SCMA) [94]

повороте созвездия и интерливинге (перемешивании), был предложен в [95]. Он позволяет достигать лучших характеристик по вероятности ошибки BER по сравнению с простым LDS-OFDM.

Из-за разреженной структуры расширяющей матрицы и большого минимального расстояния многомерного созвездия качество детектирования SCMA становится высоким, даже когда ресурсные блоки перегружены. В приемнике алгоритм MPA, который обычно используется при декодировании LDPC, используется при детектировании [96, 97]. Из-за разреженности MPA может достичь близкого к оптимальному качества при значительно меньшей сложности по сравнению с оптимальными максимально правдоподобным (ML) и BCJR алгоритмами. Однако сложность остается относительно высокой для пользовательских устройств. SCMA также рассматривает кластеризацию пользователей на основе CSI и распределение разных мощностей по разным кластерам. Когда передаваемые мощности между разными кластерами меняются, то сигналы разных кластеров могут быть продетектированы с использованием SIC, подобно NOMA в домене мощности. Внутри каждого кластера разные пользователи могут быть различены с использованием MPA. Как результат, комбинация SIC и MPA может существенно уменьшить сложность приемника.

### NOMA в нескольких доменах

Чтобы поддержать массовую подключаемость для сетей 5G, кроме мультиплексирования сигналов в доменах мощности или кода были предложены некоторые решения для NOMA в нескольких доменах, таких как домены мощности, кодов и пространственном. Выше обсуждался NOMA, основанный на множестве антенн, где NOMA обеспечивается в доменах мощности и пространственном. Ниже будут названы еще три типовых схемы NOMA, работающих в нескольких доменах: pattern division multiple access (PDMA) – множественный доступ с разделением с помощью шаблонов [98], building block sparse-constellation based orthogonal multiple access (BOMA) – ортогональный множественный доступ на основе блоков разреженных созвездий [99] и lattice partition multiple access (LPMA) – множе-

ственный доступ на основе деления решеток [100].

**PDMA:** В PDMA [98], неортогональные шаблоны распределяются разным пользователям для выполнения мультиплексирования. Эти шаблоны построены в множестве доменов – кодов, мощности, пространства для усиления возможностей SIC. В присутствии этого свойства основанный на SIC MPA метод многопользовательского детектирования с низкой сложностью и надежным качеством может быть использован для работы на приемной стороне.

В передатчике PDMA, подобно методу SCMA, сигналы пользователей также рассеяны с помощью разреженных сигнатурных матриц. [98]. Основная разница состоит в том, что число ресурсных блоков, занятых каждым пользователем в PDMA, может изменяться. Например, семь пользователей могут быть мультиплексированы внутри трех ресурсных блоков через следующую сигнатурную матрицу

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1 & \sqrt{\frac{3}{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 & \sqrt{3} & 0 & 0 \\ 1 & \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 & \sqrt{3} & 0 \\ 1 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 & 0 & \sqrt{3} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

При использовании разреженных сигнатурных матриц PDMA может увеличить системную пропускную способность за счет перегрузки. Более того, пользователь может также быть мультиплексирован в другие домены, такие как домены мощности и пространства. В одном и том же ресурсном блоке пользователи могут быть различены через разные мощности, как для NOMA в домене мощности, или через разные прекодеры, если применено MIMO [101].

На приемной стороне, подобно SCMA, MPA может быть использован при детектировании благодаря разреженности сигнатурной матрицы. Когда разные кластеры пользователей мультиплексированы в доменах по мощности и пространству, может быть применено MPA-SIC. Детектирование пользователей, которые мультиплексированы в одну и ту же сигнатурную матрицу, основано на MPA, который может обеспечить превосход-

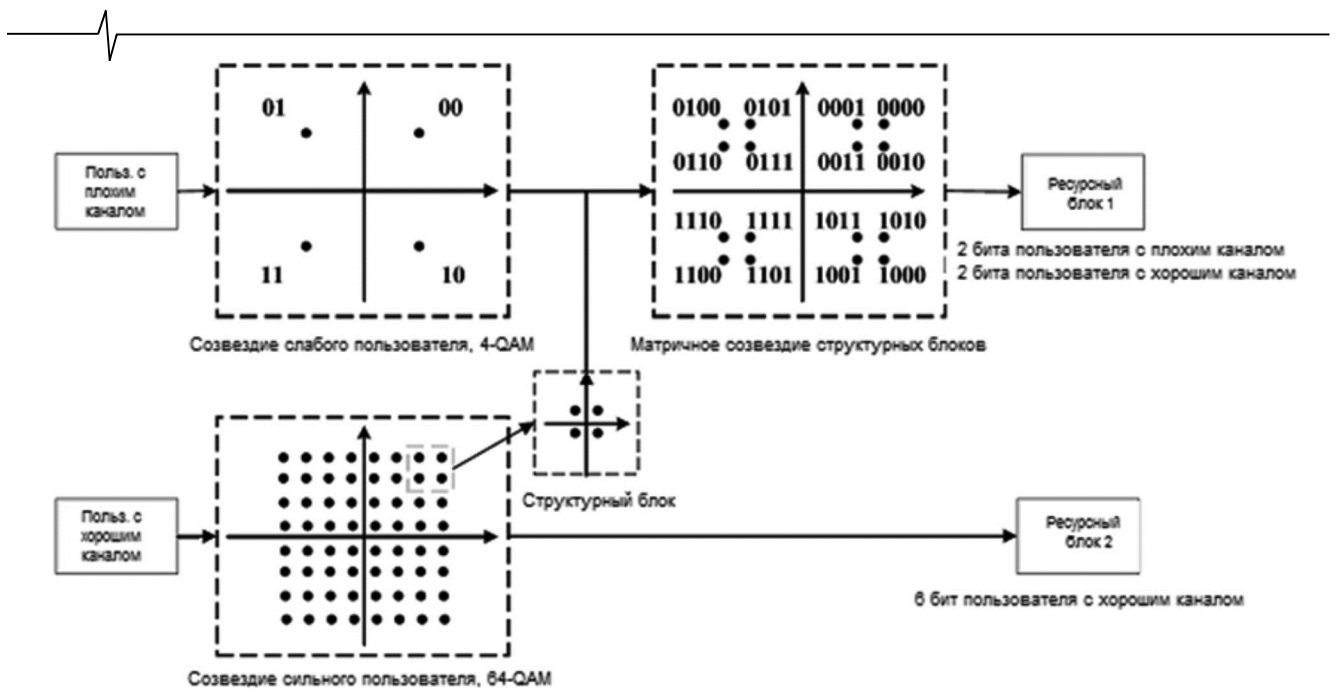


Рис. 6. Ортогональный множественный доступ на основе разреженных созвездий (BOMA) [94]

ное качество. Между разными кластерами в доменах мощности и пространства SIC может быть использовано для снижения сложности. Кроме того, турбоструктура может быть применена, чтобы скомбинировать детектор с декодером для дальнейшего улучшения характеристик. [102].

**BOMA:** Эта техника (building block sparse-constellation based orthogonal multiple access) – ортогональный множественный доступ на основе разреженных созвездий – привлекает информацию от пользователя с хорошей CSI к символам пользователя с плохой CSI. Таким образом, пропускная способность многопользовательской системы может быть значительно увеличена.

Как показано на рис. 6, чтобы достичь такого же качества BER, как для пользователя с хорошей CSI, пользователь с плохой CSI должен применить грубое созвездие с большим минимальным расстоянием.

Следовательно, небольшой структурный блок, который содержит данные пользователя с хорошей CSI может быть вставлен в созвездие пользователя с плохой CSI [103, 104]. Для пользователя с плохой CSI центр составного элемента может рассматриваться как точка созвездия, и вставленный элемент может рассматриваться как интерференция. Когда размер составного элемента много меньше, чем минимальное расстояние грубого созвездия, то деградация качества детектирования становится минимальной. Так как пользователь с хорошей CSI может детектировать точки в своем собственном созвездии, то он может также детектировать все точки в созвездии вставленного структурного элемента и декодировать биты из него.

Структура BOMA относительно проста и подобна структуре, используемой в текущих системах 4G. Требуются только незначительные изменения в программах, так что схема BOMA может быть легко реализована при совместимости с massive MIMO, высокочастотными диапазонами и другими требованиями систем 5G. Кроме того, BOMA не требует сложного распределения мощности и SIC приемника, которые необходимы для

других схем NOMA.

**LPMA:** В LPMA (lattice partition multiple access – множественный доступ с разделением решеток) [100] объединены для мультиплексирования пользователей домены мощности и кодовый. Подобно мультиплексированию по мощности в NOMA код в LPMA реализует многоуровневую решетку, которая назначает разные кодовые уровни пользователям с разными CSI. Могут быть применены несколько типов кодов, такие как Construction  $\pi_A$  [105] и Construction D [106]. Для пользователей с плохой CSI назначенные коды имеют большее минимальное расстояние, что может улучшить качество детектирования. Для пользователей с лучшей CSI назначаются коды с меньшим минимальным расстоянием без ухудшения качества детектирования. В приемнике применен SIC декодер подобно тому, как делается при NOMA в домене мощности.

Кроме мультиплексирования в кодовой области LPMA также применяет мультиплексирование по мощности, чтобы усилить пользователей с плохой CSI. С помощью двух степеней свободы в мультиплексировании схема LPMA становится более гибкой по сравнению с NOMA в домене мощности. Даже если пара пользователей имеет сходную CSI, они могут быть мультиплексированы корректировкой кодовых уровней и уровней мощностей, поэтому сложные механизмы кластеризации пользователей, используемые в схемах NOMA в области мощности, в LPMA не требуются.

### Сопоставление схем NOMA

Выше рассмотрено несколько типовых схем NOMA, основанных на разных технологиях мультиплексирования. При разных технологиях мультиплексирования эти схемы NOMA имеют разные свойства. NOMA в домене мощности имеет простую структуру и может быть легко объединен с разными технологиями, такими как MIMO и кооперативные сети. Однако для получения порядка пользователей с точки зрения CSI требуются кластеризация пользователей и разбиение на пары, что повыша-

Схема	Характеристики	Преимущества	Недостатки
Power-domain NOMA	Мультиплексирование в домене мощности	Высокая SE Совместимость с другими технологиями	Необходимость спаривания пользователей Распространение ошибок при SIC
LDS-CDMA	Разреженное рассеяние CDMA	Не требуется CSI Квазиоптимальный MPA детектор	Избыточность из-за кодирования
LDS-OFDM	Разреженное рассеяние OFDM	Не требуется CSI Квазиоптимальный MPA детектор Более соответствует широкой полосе, чем LDS-CDMA	Избыточность из-за кодирования
SCMA	Разреженное рассеяние Многомерное созвездие	Не требуется CSI Квазиоптимальный MPA детектор Большой уровень разнесения, чем у простого LDS	Избыточность из-за кодирования Сложность построения оптимальной кодовой книги
PDMA	Разреженное рассеяние Мультиплексирование в доменах мощности кодовом, пространственном	Большой уровень разнесения Квазиоптимальный MPA детектор Приемник с низкой сложностью	Избыточность из-за кодирования Сложность построения оптимальной кодовой книги
BOMA	Tiled building block – плиточные строительные блоки	Простая структура Совместимость с действующими системами Низкая сложность приемника	Необходимость спаривания пользователей Не слишком гибкий
LPMA	Многоуровневый решетчатый код Мультиплексирование в доменах мощности и кодовом	Нет необходимости в кластеризации пользователей	Специфическое каналное кодирование

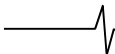
ет сложность системы. NOMA в кодовой области и NOMA в нескольких доменах, такие как SCMA и PDMA, могут дать выигрыш за счет рассеяния без требования знания точной CSI. Кроме того, квазиоптимальные MPA детекторы с низкой сложностью могут обеспечить лучшее качество, чем SIC детекторы. Однако кодирование также вносит избыточность, которая ухудшает системную SE. Другие схемы NOMA также имеют свои специфические черты. Например, BOMA имеет простую структуру и может быть легко совместима с текущими LTE системами, тогда как разбиение пользователей на пары все равно требуется, что снижает гибкость. LPMA может достичь многоуровневости в обоих доменах мощности и кодовом, что снижает стоимость кластеризации пользователей. Однако многоуровневый код требует соответствующего двоичного или вложенного двоичного каналного кодирования. Ключевые технологии и свойства рассмотренных схем NOMA приведены в табл. [94]. По результатам анализа можно отметить, что каждая схема NOMA имеет свои преимущества и ограничения, которые соответствуют разным условиям использования. Для реализации обмена между качеством и сложностью необходима адаптивная конфигурация. Например, если имеется большая разница между условиями каналов пользователей из-за эффекта близкий-далекий или в подвижных сетях, NOMA в области мощности с SIC приемником может быть использован при сравнительно небольшой сложности. С другой стороны, если сценарии использования требуют высокой надеж-

ности, особенно, когда каналные условия плохие или локальное распределение пользователей концентрировано, то SCMA является возможным решением благодаря квазиоптимальному MPA детектированию.

### Возможные направления будущих работ

В этой статье были рассмотрены несколько схем NOMA. Несмотря на использование разных технологий, общим для них является использование неортогональности для увеличения системной пропускной способности и поддержки большего числа пользователей в ограниченных ресурсных блоках. Кроме существующих работ, необходимо большее число исследований для улучшения характеристик этих схем NOMA в следующих, на наш взгляд, направлениях.

1. Метод детектирования MPA-SIC обычно применяется SCMA и PDMA, в которых механизм кластеризации существенно влияет на качество метода. Когда пользователи асинхронны, то пользователи с одинаковым временем задержки должны быть распределены в один и тот же кластер для лучшего качества. Если задержки сильно меняются между пользователями внутри одного и того же кластера, то интерференция между разными пользователями становится большой и может нарушить разреженную структуру. Техника со многими ветвями (multi-branch) [107] может быть применена, чтобы улучшить характеристики путем рассмотрения каждого кластера как ветви. Рассчитывая каждую ветвь параллельно и выбирая лучший результат как финальный, можно



улучшить качество по сравнению с подходом с одним кластером.

2. Совместный синтез возможных новых видов модуляции и схем NOMA может быть важным направлением для исследования в сетях 5G. Некоторые из схем NOMA, особенно LDS в кодовом домене, основаны на OFDM, где выход разреженной расширяющей матрицы отображен на ортогональные поднесущие. В общем, необходимо исследовать, как правильно комбинировать модуляцию и схему NOMA.

3. Несмотря на обширные усилия по NOMA большинство существующих исследований фокусируются на анализе качества и дизайне алгоритмов разных технологий NOMA по отдельности, – NOMA в домене мощности или NOMA в кодовом домене. Однако, разные сценарии имеют свои предпочтительные технологии NOMA, например, если пользователи испытывают очень разные каналные условия из-за эффекта близкий-далекий, то NOMA в домене мощности может быть лучшим кандидатом. Если пользователи испытывают плохие каналные условия, но требуют высокой надежности, то SCMA является предпочтительным из-за его выигрыша от формирования нужного сигнала и близкого к оптимальному МРА детектирования. В работе [108] предложен единый подход, включающий оба – NOMA в доменах мощности и кодовом для поддержки разных сценариев с помощью одной и той же инфраструктуры в разнородных сверхплотных сетях. Однако, необходимо больше исследовательских усилий для реализации такого единого подхода к NOMA.

4. Разработка схем модуляции и схем MA для высокочастотных диапазонов (свыше 40 GHz) начинает получать возрастающее внимание. Millimeter-wave (mmWave) и Terahertz (THz) диапазоны оказываются хорошими кандидатами для снижения спектральных ограничений [109, 110]. Однако свойства распространения миллиметровых и терагерцевых волн оказались весьма слабыми, что принесло новые проблемы разработчикам систем. Например, шум является основным ограничением миллиметрового и терагерцевого диапазонов, что делает уровни передаваемой мощности очень важными и, в конечном счете, влияющими на категории приложений, которые могут использовать эти диапазоны, например, IoT. Более того, высокий уровень искажений, включая расстройку несущей частоты и фазовый шум, также должны быть учтены, так как шум имеет на них большое влияние. Тем не менее, уже есть исследования по NOMA на миллиметровых волнах [111], и можно надеяться на появление анализа таких систем, основанного на практических сценариях.

## Заключение

В этой статье мы постарались дать подробный обзор важнейших направлений неортогонального множественного доступа в сетях пятого 5G и возможных будущих поколений. Из приведенного обсуждения можно сделать вывод, что неортогональный множественный доступ представляет собой перспективный подход, который означает отклонение от предыдущих поколений беспроводных сетей. По-видимому, можно утверждать,

что за счет использования неортогональности множественного доступа сети 5G будут способны обеспечить более высокую пропускную способность и массовую подключаемость при улучшенной спектральной эффективности [112-118], однако это может потребовать дополнительных исследований.

## Литература

1. Boccuzzi J. (2019) Introduction to Cellular Mobile Communications. In: Vaezi M., Ding Z., Poor H. (eds) Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond. Springer, Cham.
2. D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2005.
3. A. Benjebbovu, A. Li, Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Harada, and T. Nakamura, «System-level Performance of Downlink NOMA for Future LTE Enhancements», in Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Atlanta, USA, 2013, pp. 66-70.
4. S.M.R. Islam, N. Avazov, O.A. Dobre and K. Kwak, «Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges», IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 19, no. 2, pp. 721-742, Second quarter 2017.
5. Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan and V. K. Bhargava, «A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends», IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 10, pp. 2181-2195, Oct. 2017.
6. Y. Liu, Z. Qin, M. Elkaslan, Z. Ding, A. Nallanathan and L. Hanzo, «Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond», Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 12, pp. 2347-2381, Dec. 2017.
7. K. Higuchi and A. Benjebbour, «Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) with Successive Interference Cancellation», IEICE Transactions on Communications, vol. E98-B, no. 3, pp. 403-414, Mar. 2015.
8. Z. Ding 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.
9. L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C.-L. I, and Z. Wang, «Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends», IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 9, pp. 74-81, Sep. 2015.
10. Z. Wei, J. Yuan, D. W. K. Ng, M. Elkaslan, and Z. Ding, «A survey of downlink non-orthogonal multiple access for 5G wireless communication networks», ZTE Commun., vol. 14, no. 4, pp. 17-26, Oct. 2016.
11. Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, «Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access», in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf., Dresden, Germany, Jun. 2013, pp. 1-5.
12. Y. Saito, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, and T. Nakamura, «Systemlevel performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)», in Proc. IEEE Int. Symp. Pers., Indoor Mobile RadioCommun., London, U.K., Sep. 2013, pp. 611-615.
13. Z. Ding, Z. Yang, P. Fan, and H.V. Poor, «On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users», IEEE Signal Process. Lett., vol. 21, no. 12, pp. 1501-1505, Dec. 2014.
14. H. Nikopour and H. Baligh, «Sparse code multiple access», in Proc. IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mobile Radio Commun., London, U.K., Sep. 2013, pp. 332-336.
15. M. Taherzadeh, H. Nikopour, A. Bayesteh, and H. Baligh,

«SCMA codebook design», in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf., Las Vegas, NV, USA, Sep. 2014, pp. 1-5.

16. X. Dai et al., «Successive interference cancelation amenable multipleaccess (SAMA) for future wireless communications», in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Syst., Coimbatore, India, Nov. 2014, pp. 222-226.

17. S. Chen, B. Ren, Q. Gao, S. Kang, S. Sun, and K. Niu, «Pattern division multiple access. A novel nonorthogonal multiple access for fifth-generation radio networks», IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 66, no. 4, pp. 3185-3196, Apr. 2017.

18. M. Al-Imari, M. A. Imran, R. Tafazolli, and D. Chen, «Performance evaluation of low density spreading multiple access», in Proc. 8th Int. Wireless Commun. Mobile Comput. Conf., Limassol, Cyprus, Aug. 2012, pp. 383-388.

19. D. Fang, Y.-C. Huang, Z. Ding, G. Geraci, S.-L. Shieh, and H. Claussen, «Lattice partition multiple access: A new method of downlink non-orthogonal multiuser transmissions», in Proc. IEEE Global Commun. Conf., Washington, DC, USA, Dec. 2016, pp. 1-6.

20. L. Ping, L. Liu, K. Wu, and W. K. Leung, «Interleave division multipleaccess», IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 5, no. 4, pp. 938-947, Apr. 2006.

21. X. Wang and H.V. Poor, *Wireless Communication Systems: Advanced Techniques for Signal Reception*. New York, NY, USA: Prentice-Hall, 2004.

22. S. Verdú, *Multiuser Detection*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1998.

23. P. Wang, J. Xiao, and L. Ping, «Comparison of orthogonal and nonorthogonal approaches to future wireless cellular systems», IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 1, no. 3, pp. 4-11, Sep. 2006.

24. T.S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. New York, NY, USA: Prentice-Hall, 1998.

25. Study on Downlink Multiuser Superposition Transmission for LTE, document, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Mar. 2015.

26. L. Zhang et al., «Layered-division-multiplexing: Theory and practice», IEEE Trans. Broadcast., vol. 62, no. 1, pp. 216-232, Mar. 2016.

27. M. Mohammadkarimi, M. A. Raza and O. A. Dobre, «Signature-Based Non-orthogonal Massive Multiple Access for Future Wireless Networks: Uplink Massive Connectivity for Machine-Type Communications», IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 13, no. 4, pp. 40-50, Dec. 2018.

28. S.M.R. Islam, M. Zeng, O.A. Dobre, and K. Kwak, «Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA): How It Meets 5G and Beyond». New Jersey, USA: Wiley 5G Ref Article, 2019.

29. T. Cover, «Broadcast channels», IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 18, no. 1, pp. 2-14, Jan 1972.

30. L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen and L. Hanzo, «A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G», IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 3, pp. 2294-2323, third quarter 2018.

31. H. Tabassum, M.S. Ali, E. Hossain, M.J. Hossain and D.I. Kim, «Uplink Vs. Downlink NOMA in Cellular Networks: Challenges and Research Directions», in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Sydney, Australia, 2017, pp. 1-7.

32. S.M.R. Islam, M. Zeng, and Octavia A. Dobre, «NOMA in 5G Systems: Exciting Possibilities for Enhancing Spectral Efficiency», IEEE 5G Tech Focus, vol. 1, no. 2, Jun. 2017.

33. S. Timotheou and I. Krikidis, «Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems», IEEE Signal Process. Lett., vol. 22,

no. 10, pp. 1647-1651, Oct. 2015.

34. Yunlong Cai, Zhijin Qin, Fangyu Cui, Geoffrey Ye Li, and Julie A. McCann: Modulation and Multiple Access for 5G Networks. IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, vol. 20, no. 1, FIRST QUARTER 2018 629-646.

35. Y. Liu, Z. Ding, M. Elkashlan, and H. V. Poor, «Cooperative nonorthogonal multiple access with simultaneous wireless information and power transfer!», IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 34, no. 4, pp. 938-953, Apr. 2016.

36. Y. Liu, M. Elkashlan, Z. Ding, and G. K. Karagiannis, «Fairness of user clustering in MIMO non-orthogonal multiple access systems», IEEE Commun. Lett., vol. 20, no. 7, pp. 1465-1468, Jul. 2016.

37. J. Cui, Z. Ding, and P. Fan, «A novel power allocation scheme under outage constraints in NOMA systems», IEEE Signal Process. Lett., vol. 23, no. 9, pp. 1226-1230, Sep. 2016.

38. F. Liu, P. Mähönen, and M. Petrova, «Proportional fairness-based user pairing and power allocation for non-orthogonal multiple access», in Proc. IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC), Hong Kong, Aug. 2015, pp. 1127-1131.

39. F. Liu, P. Mähönen, and M. Petrova, «Proportional fairness-based power allocation and user set selection for downlink NOMA systems», in Proc. Conf. Commun. (ICC), Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016, pp. 1-6.

40. J. Mei, L. Yao, H. Long, and K. Zheng, «Joint user pairing and power allocation for downlink non-orthogonal multiple access systems», in Proc. Conf. Commun. (ICC), Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016, pp. 1-6.

41. N. Otao, Y. Kishiyama, and K. Higuchi, «Performance of non-orthogonal access with SIC in cellular downlink using proportional fairness-based resource allocation», in Proc. Int. Symp. Wireless Commun. Syst. (ISWCS), Paris, France, Aug. 2012, pp. 476-480.

42. M. Al-Imari, P. Xiao, M. A. Imran, and R. Tafazolli, «Uplink nonorthogonal multiple access for 5G wireless networks», in Proc. Int. Symp. Wireless Commun. Syst. (ISWCS), Barcelona, Spain, Aug. 2014, pp. 781-785.

43. L. Lei, D. Yuan, C. K. Ho, and S. Sun, «Power and channel allocation for non-orthogonal multiple access in 5G systems: Tractability and computation», IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 15, no. 12, pp. 8580-8594, Dec. 2016.

44. P.D. Diamantoulakis, K.N. Pappi, Z. Ding, and G.K. Karagiannis, «Wireless-powered communications with non-orthogonal multiple access», IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 15, no. 12, pp. 8422-8436, Dec. 2016.

45. K. Higuchi and Y. Kishiyama, «Non-orthogonal access with random beamforming and intra-beam SIC for cellular MIMO downlink», in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Fall), Las Vegas, NV, USA, Sep. 2013, pp. 1-5.

46. J. Choi, «Minimum power multicast beamforming with superposition coding for multiresolution broadcast and application to NOMA systems», IEEE Trans. Commun., vol. 63, no. 3, pp. 791-800, Mar. 2015.

47. Z. Chen, Z. Ding, X. Dai, and G. K. Karagiannis, «On the application of quasi-degradation to MISO-NOMA downlink», IEEE Trans. Signal Process., vol. 64, no. 23, pp. 6174-6189, Dec. 2016.

48. Z. Ding, F. Adachi, and H. V. Poor, «The application of MIMO to nonorthogonal multiple access», IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 15, no. 1, pp. 537-552, Jan. 2016.

49. W. Shin et al. «Coordinated beamforming for multicell MIMO-NOMA», IEEE Commun. Lett., vol. 21, no. 1, pp. 84-87, Jan. 2017.

50. W. Shin, M. Vaezi, J. Lee, and H.V. Poor, «On the number of users served in MIMO-NOMA cellular networks», in Proc. Int.Symp. Wireless Commun. Syst. (ISWCS), Poznan, Poland, Sep. 2016, pp. 638-642.
51. W. Shin et al. «Non-orthogonal multiple access in multi-cell networks: Theory, performance, and practical challenges», IEEE Commun. Mag., vol. 55, no. 10, pp. 176-183, Oct. 2017.
52. Z. Ding, R. Schober, and H. V. Poor. «A general MIMO framework for NOMA downlink and uplink transmission based on signal alignment», IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 15, no. 6, pp. 4438-4454, Jun. 2016.
53. Z. Ding, L. Dai, and H. V. Poor, «MIMO-NOMA design for small packet transmission in the Internet of Things», IEEE Access, vol. 4, pp. 1393-1405, 2016.
54. Q. Sun, S. Han, C.-L. I, and Z. Pan, «On the ergodic capacity of MIMO NOMA systems», IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 4, no. 4, pp. 405-408, Aug. 2015.
55. M. Zeng, A. Yadav, O. A. Dobre, G. I. Tsiropoulos, and H. V. Poor, «On the sum rate of MIMO-NOMA and MIMO-OMA systems», IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 6, no. 4, pp. 534-537, Aug. 2017.
56. M. Zeng, A. Yadav, O.A. Dobre, G. I. Tsiropoulos, and H.V. Poor, «Capacity comparison between MIMO-NOMA and MIMO-OMA with multiple users in a cluster», IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 35, no. 10, pp. 2413-2424, Oct. 2017.
57. Z. Ding and H. V. Poor, «Design of massive-MIMO-NOMA with limited feedback», IEEE Signal Process. Lett., vol. 23, no. 5, pp. 629-633, May 2016.
58. Z. Qin, Y. Liu, Z. Ding, Y. Gao, and M. ElKashlan, «Physical layer security for 5G non-orthogonal multiple access in large-scale networks», in Proc. Conf. Commun. (ICC), Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016, pp. 1-6.
59. Y. Liu, Z. Qin, M. ElKashlan, Y. Gao, and L. Hanzo, «Enhancing the physical layer security of non-orthogonal multiple access in largescale networks», IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 16, no. 3, pp. 1656-1672, Mar. 2017.
60. D. Lee et al. «Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced: Deployment scenarios and operational challenges», IEEE Commun. Mag., vol. 50, no. 2, pp. 148-155, Feb. 2012.
61. Z. Ding, M. Peng, and H.V. Poor, «Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems», IEEE Commun. Lett., vol. 19, no. 8, pp. 1462-1465, Aug. 2015.
62. J. Choi, «Non-orthogonal multiple access in downlink coordinated twopoint systems», IEEE Commun. Lett., vol. 18, no. 2, pp. 313-316, Feb. 2014.
63. Y. Tian, A. R. Nix, and M. Beach, «On the performance of opportunistic NOMA in downlink CoMP networks», IEEE Commun. Lett., vol. 20, no. 5, pp. 998-1001, May 2016.
64. J.-B. Kim and I.-H. Lee, «Non-orthogonal multiple access in coordinated direct and relay transmission», IEEE Commun. Lett., vol. 19, no. 11, pp. 2037-2040, Nov. 2015.
65. J. Men and J. Ge, «Non-orthogonal multiple access for multiple antenna relaying networks», IEEE Commun. Lett., vol. 19, no. 10, pp. 1686-1689, Oct. 2015.
66. Z. Ding, H. Dai, and H. V. Poor, «Relay selection for cooperative NOMA», IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 5, no. 4, pp. 416-419, Aug. 2016.
67. W. Duan, M. Wen, Y. Yan, Z. Xiong, and M. H. Lee, «Use of non-orthogonal multiple access in dual-hop relaying», arXiv preprint, Apr. 2016. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1604.01151>
68. J. Mitola and G. Q. Maguire, «Cognitive radio: Making software radios more personal», IEEE Pers. Commun., vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.
69. Y.-C. Liang, K.-C. Chen, G. Y. Li, and P. Mahonen, «Cognitive radio networking and communications: An overview», IEEE Trans. Veh.Technol., vol. 60, no. 7, pp. 3386-3407, Sep. 2011.
70. J. Ma, G.Y. Li, and B.-H. Juang, «Signal processing in cognitive radio», Proc. IEEE, vol. 97, no. 5, pp. 805-823, May 2009.
71. Z. Qin, Y. Gao, and C. G. Parini, «Data-assisted low complexity compressive spectrum sensing on real-time signals under sub-Nyquist rate», IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 15, no. 2, pp. 1174-1185, Feb. 2016.
72. Z. Qin, Y. Gao, M. D. Plumbley, and C. G. Parini, «Wideband spectrum sensing on real-time signals at sub-Nyquist sampling rates in single and cooperative multiple nodes», IEEE Trans. Signal Process., vol. 64, no. 12, pp. 3106-3117, Jun. 2016.
73. Y.-C. Liang, Y.-H. Zeng, E.C.Y. Peh, and A.T. Hoang, «Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks», IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 7, no. 4, pp. 1326-1337, Apr. 2008.
74. Z. Qin, Y. Liu, Y. Gao, M. ElKashlan, and A. Nallanathan, «Wireless powered cognitive radio networks with compressive sensing and matrix completion», IEEE Trans. Commun., vol. 65, no. 4, pp. 1464-1476, Apr. 2017.
75. D.-Q. Feng et al., «Device-to-device communications in underlying cellular networks», IEEE Trans. Commun., vol. 61, no. 8, pp. 3541-3551, Aug. 2013.
76. D. Feng et al. «Device-to-device communications in cellular networks», IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 4, pp. 49-55, Apr. 2014.
77. S.M. Perlaza, N. Fawaz, S. Lasaulce, and M. Debbah, «From spectrum pooling to space pooling: Opportunistic interference alignment in MIMO cognitive networks», IEEE Trans. Signal Process., vol. 58, no. 7, pp. 3728-3741, Jul. 2010.
78. R. Sun and Z.-Q. Luo, «Interference alignment using finite and dependent channel extensions: The single beam case», IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 61, no. 1, pp. 239-255, Jan. 2015.
79. L. Lu, G.Y. Li, A. Maaref, and R. Yao, «Opportunistic transmission exploiting frequency-and spatial-domain degrees of freedom», IEEE Wireless Commun., vol. 21, no. 2, pp. 91-97, Apr. 2014.
80. Z. Ding, P. Fan, and H. V. Poor, «Impact of user pairing on 5G nonorthogonal multiple access downlink transmissions», IEEE Trans Veh. Technol., vol. 65, no. 8, pp. 6010-6023, Aug. 2016.
81. Y. Liu, Z. Ding, M. ElKashlan, and J. Yuan, «Nonorthogonal multiple access in large-scale underlay cognitive radio networks», IEEE Trans.Veh. Technol., vol. 65, no. 12, pp. 10152-10157, Dec. 2016.
82. L. Lv, J. Chen, and Q. Ni, «Cooperative non-orthogonal multiple access in cognitive radio», IEEE Commun. Lett., vol. 20, no. 10, pp. 2059-2062, Oct. 2016.
83. M. Zeng, G. I. Tsiropoulos, O. A. Dobre, and M. H. Ahmed, «Power allocation for cognitive radio networks employing non-orthogonal multiple access», in Proc. IEEE Glob. Commun. Conf. (GLOBECOM), Washington, DC, USA, Dec. 2016, pp. 1-5.
84. N. Zabetian, M. Baghani, and A. Mohammadi, «Rate optimization in NOMA cognitive radio networks», in Proc. Int. Telecommun. Symp. (ITS), Tehran, Iran, Sep. 2016, pp. 62-65.
85. Y. Zhang et al., «Energy efficiency optimization in cognitive radio inspired non-orthogonal multiple access», in Proc. IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC), Valencia, Spain, Sep. 2016, pp. 1-6.
86. J.-B. Kim and I.-H. Lee, «Non-orthogonal multiple access in

coordinated direct and relay transmission», *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 11, pp. 2037-2040, Nov. 2015.

87. Y. Liu, Z. Ding, M. ElKashlan, and J. Yuan, «Nonorthogonal multiple access in large-scale underlay cognitive radio networks», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 12, pp. 10152-10157, Dec. 2016.

88. Y. Liu, Z. Qin, M. ElKashlan, Y. Gao, and N. Arumugam, «Nonorthogonal multiple access in massive MIMO aided heterogeneous networks», in *Proc. Glob. Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Washington, DC, USA, Dec. 2016, pp. 1-6.

89. Y. Liu, Z. Qin, M. ElKashlan, A. Nallanathan, and J. A. McCann, «Nonorthogonal multiple access in large-scale heterogeneous networks», *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, to be published.

90. F. Fang, H. Zhang, J. Cheng, and V. C. M. Leung, «Energy efficient resource allocation for downlink non-orthogonal multiple access network», *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 9, pp. 3722-3732, Sep. 2016.

91. Y. Zhang, H.-M. Wang, T.-X. Zheng, and Q. Yang, «Energy-efficient transmission design in non-orthogonal multiple access», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 3, pp. 2852-2857, Mar. 2017.

92. Y. Chen, S. Zhang, S. Xu, and G. Y. Li, «Fundamental tradeoffs on green wireless networks», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 30-37, Jun. 2011.

93. R. Hoshyar, F.P. Wathan, and R. Tafazolli, «Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel», *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, no. 4, pp. 1616-1626, Apr. 2008.

94. Cai et al.: Modulation and MA for 5G networks *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, First quarter 2018, pp. 629-646 .

95. D. Cai, P. Fan, X. Lei, Y. Liu, and D. Chen, «Multi-dimensional SCMA codebook design based on constellation rotation and interleaving», in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, Nanjing, China, May 2016, pp. 1-5.

96. Y. Wu, S. Zhang, and Y. Chen, «Iterative multiuser receiver in sparse code multiple access systems», in *Proc. Int. Conf. Commun. (ICC)*, London, U.K., Jun. 2015, pp. 2918-2923.

97. L. Yang, Y. Liu, and Y. Siu, «Low complexity message passing algorithm for SCMA system», *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 12, pp. 2466-2469, Dec. 2016.

98. S. Chen et al., «Pattern division multiple access. A novel nonorthogonal multiple access for fifth-generation radio networks», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 4, pp. 3185-3196, Apr. 2017.

99. M. A. Naim and J. P. Fonseka, «Selective mapping of coded multi-channel transmission», U.S. Patent 9 667 459, May 30, 2017.

100. D. Fang et al., «Lattice partition multiple access: A new method of downlink non-orthogonal multiuser transmissions», in *Proc. Glob. Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Washington, DC, USA, Dec. 2016, pp. 1-6.

101. J. Zeng, B. Li, X. Su, L. Rong, and R. Xing, «Pattern division multiple access (PDMA) for cellular future radio access», in *Proc. Int. Conf. Wireless Commun. Signal Process. (WCSP)*, Nanjing, China, Oct. 2015, pp. 1-5.

102. B. Ren et al., «Advanced IDD receiver for PDMA uplink system», in *Proc. IEEE/CIC Int. Conf. Commun. China (ICCC)*, Chengdu, China, Jul. 2016, pp. 1-6.

103. M.A. Naim, J.P. Fonseka, and E.M. Dowling, «A building block approach for designing multilevel coding schemes», *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 1, pp. 2-5, Jan. 2015.

104. E.M. Dowling and J.P. Fonseka, «Tiled-building-block trellis encoders», U.S. Patent 8 077 790, Dec. 13, 2011.

105. Y.-C. Huang and K. R. Narayanan, «Construction  $\pi A$  and  $\pi D$  lattices: Construction, goodness, and decoding algorithms», *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 63, no. 9, pp. 5718-5733, Sep. 2017

106. P.R.B. da Silva and D. Silva, «Design of lattice network codes based on construction D», in *Proc. Int. Telecommun. Symp. (ITS)*, San Paulo, Brazil, Aug. 2014, pp. 1-5.

107. Y. Cai and R. C. de Lamare, «Multistage MIMO receivers based on multi-branch interference cancellation for MIMO-CDMA systems», in *Proc. Int. Symp. Wireless Commun. Syst. (ISWCS)*, Tuscany, Italy, Sep. 2009, pp. 614-618.

108. Z. Qin, X. Yue, Y. Liu, Z. Ding, and A. Nallanathan, «A unified nonorthogonal multiple access framework for heterogeneous ultra dense networks», *IEEE Commun. Mag.*, to be published.

109. C. Lin and G. Y. Li, «Energy-efficient design of indoor mmWave and sub-THz systems with antenna arrays», *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 7, pp. 4660-4672, Jul. 2016.

110. C. Lin and G. Y. Li, «Terahertz communications: An array-of-subarrays solution», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 12, pp. 124-131, Dec. 2016.

111. Z. Ding, P. Fan, and H. V. Poor, «Random beamforming in millimeterwave NOMA networks», *IEEE Access*, vol. 5, pp. 7667-7681, 2017.

112. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM. Москва, Горячая линия – Телеком, 2016 г., 352 с.

113. Шлома А.М., Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П. Новые технологии в системах мобильной радиосвязи. Москва, МТУСИ, 2005 г., 455 с.

114. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П. Повышение скорости передачи информации и спектральной эффективности беспроводных систем связи. // *Цифровая обработка сигналов*, 2006, № 1, с. 2-12.

115. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П. Методы пространственно-временного блочного кодирования. // *Цифровая обработка сигналов*, 2005, № 2, с. 2-10.

116. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П. Вопросы повышения спектральной эффективности связи: Неортогональная передача. // *Цифровая обработка сигналов*, 2013, № 4, с. 55-64.

117. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П. Вопросы повышения спектральной эффективности связи: Ортогональная передача. // *Цифровая обработка сигналов*, 2014, № 2, с. 22-33.

118. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б. Проблема повышения спектральной эффективности и емкости в перспективных системах 6G. // *Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт*, 2020, Т. 14, № 2, с. 25-31.