

ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ 6G

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-2-25-31

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

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

Ключевые слова: технология MIMO, ортогональный доступ, неортогональный доступ, вычислительная сложность, спектральная эффективность, емкость, корреляционный прием.

Проблема повышения спектральной эффективности и увеличения числа абонентов в перспективных системах связи 6G в настоящее время активно исследуется во всем мире. В системах связи поколений 3G, 4G и 5G эта проблема решается, в основном, за счет использования технологии MIMO и ортогональных методов многопользовательского доступа (OMA). К числу таких методов относится, в частности, многопользовательский доступ с помощью ортогонального частотного мультиплексирования (OFDMA), а также многопользовательский доступ с помощью кодового разделения каналов (CDMA). Однако, к будущим системам 6G предъявляются настолько высокие требования по спектральной эффективности, помехоустойчивости и емкости, что ортогональный доступ OMA уже не может обеспечить необходимую емкость системы связи при заданной помехоустойчивости и спектральной эффективности. Поэтому рассматривается использование неортогональных методов многопользовательского доступа (NOMA). Если для сигналов NOMA применить классическую теорию корреляционного приема, то помехоустойчивость системы связи будет очень невысокой. Методы NOMA требуют синтеза новых сигналов и новых алгоритмов приема, поскольку классическая линейная теория корреляционного приема не может быть применена. При этом требуется также найти новые критерии такого синтеза, которые бы учитывали вычислительную сложность демодуляции сигналов. В статье показано, что основное направление исследований в целях создания систем 6G – поиск совершенно новых алгоритмов приема с низкой вычислительной сложностью и поиск соответствующих новых сигналов, прием которых возможен с минимальными потерями в помехоустойчивости с помощью простых алгоритмов. Требование применять именно простые алгоритмы приема обусловлено повышенными требованиями по скорости передачи информации в системах 6G.

Информация об авторах:

Бакулин Михаил Германович, Московский технический университет связи и информатики, доцент кафедры ТЭЦ, к.т.н., Москва, Россия
Крейнделин Виталий Борисович, Московский технический университет связи и информатики, заведующий кафедрой ТЭЦ, профессор, д.т.н., Москва, Россия

Для цитирования:

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

For citation:

Bakulin M.G., Kreyndelin V.B. (2020) The problem of spectral efficiency and capacity increase in perspective 6G communication systems. T-Comm, vol. 14, no.2, pp. 25-31. (in Russian)

Введение

В последние годы наблюдается чрезвычайно быстрый (можно сказать, «взрывной») рост объема трафика в сетях беспроводной связи. Имеют место следующие тенденции развития сетей мобильной связи: увеличение количества абонентов до 4,9 млрд в 2019 г, увеличение числа подключений до 10 млрд (8 млрд персональных абонентских устройств и 2 млрд межмашинных соединений), рост скоростей передачи данных до 2,5 Мбит/с в 2019 г. [1].

Для того, чтобы передача таких объемов трафика стала возможной, необходимо решить проблему разработки систем связи, обеспечивающих значительно (в несколько раз) более высокую эффективность использования спектра, чем существующие системы 4G стандарта LTE/LTE Advanced.

Решение проблемы резкого увеличения спектральной эффективности систем связи является крайне сложным из-за наличия известной границы Шеннона [2]. Примерно 20 лет назад была предложена технология MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output), предполагающая использование нескольких передающих и нескольких приемных антенн. Эта технология дает потенциальную возможность резко повысить эффективность использования спектра в системе связи, поскольку для нее граница Шеннона лежит значительно выше, чем у традиционных систем связи с одной антенной на передающей стороне и одной антенной на приемной стороне [3], [4].

Поскольку число абонентских устройств в системах беспроводной связи также быстро увеличивается с течением времени, то требования к емкости таких систем также быстро возрастают. Традиционные методы многопользовательского доступа (FDMA, TDMA, CDMA и OFDMA) относятся к категории ортогональных методов доступа и не позволяют получить требуемую высокую емкость системы связи. Ограничение возможной емкости системы связи является серьезным барьером на пути развития Интернета Вещей (IoT), который предполагает одновременную и независимую работу на сети связи огромного количества абонентских устройств [1].

Использование неортогональных методов многопользовательского доступа (NOMA – Non-Orthogonal Multiple Access) открывает широкие возможности увеличения емкости системы связи [5], [19]. Основными причинами, долгое время препятствующими использованию неортогональных методов доступа, являются:

- отсутствие теоретической базы синтеза сигналов и оптимизации сигнально-кодовых конструкций для систем NOMA;
- высокая вычислительная сложность алгоритмов демодуляции.

В настоящее время при использовании высоких скоростей передачи информации, интервал времени, в течение которого должна осуществляться процедура демодуляции, оказывается весьма мал (менее 1 мкс). Это приводит к дополнительным трудностям при разработке алгоритмов демодуляции для систем связи, использующих технологию NOMA. Кроме того, дополнительные проблемы возникают при совместном использовании технологий NOMA и MIMO. Такое использование должно позволить совместить достоинства обеих технологий, т.е. одновременно достичь большой емкости системы связи при высокой эффективности использования спектра.

В настоящее время рассматриваются следующие основные пути развития технологии NOMA [13], [16], [19]:

- Разработка сигналов специальной формы, методов их синтеза и оптимизации для увеличения емкости системы с технологией NOMA.

- Разработка квазиоптимальных алгоритмов демодуляции, имеющих близкие к оптимальным характеристики помехоустойчивости при значительно более низкой вычислительной сложности.

Пути развития технологии MIMO представляются следующими:

- Разработка методов комбинирования технологий MIMO и NOMA.

- Синтез новых пространственно-временных матриц, позволяющих получить требуемый компромисс между высокой спектральной эффективностью и высокой энергетической эффективностью.

- Разработка новых методов прекодирования, позволяющих получить требуемый уровень энергетической эффективности при заданной высокой спектральной эффективности и при заданной скорости передачи в обратном канале.

- Разработка квазиоптимальных алгоритмов демодуляции, имеющих приемлемую вычислительную сложность.

1. Традиционные способы повышения спектральной эффективности систем связи

Рассмотрим традиционную систему связи, в которой на передающей стороне используется только одна антенна, а на приемной стороне также используется только одна антенна. Структура этой системы связи показана на рис.1. Такие системы связи получили название систем SISO (Single-Input-Single-Output) [3], [4].

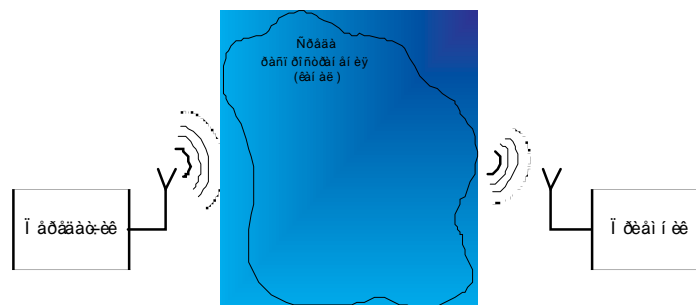


Рис. 1. Традиционная система связи с одной передающей и одной приемной антеннами (SISO)

При разработке перспективных систем связи особое значение имеет решение проблемы повышения скорости передачи информации. Известно, что обеспечить низкий уровень вероятности ошибки в системе связи возможно, если скорость передачи информации не превышает некоторого предела, называемого пропускной способностью канала связи [2], [6]. Очевидно, что увеличение пропускной способности канала связи открывает возможность повышения спектральной эффективности системы связи, использующей этот канал связи. Поэтому важным является проанализировать имеющиеся возможности увеличения пропускной способности.

Известна следующая формула Шеннона для пропускной способности канала связи с шумом [2], [6]:

$$C = F \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right) \quad (1)$$

где F – ширина полосы частот канала связи (Гц); $\frac{P_s}{P_n}$ – отношение сигнал/шум, т.е. отношение мощности передаваемого сигнала P_s к мощности шума P_n в канале связи; C – пропускная способность канала связи (бит/сек).

Из формулы (1) следует, что принципиально возможны следующие способы повышения пропускной способности, а следовательно, и спектральной эффективности системы связи:

- Способ 1. Увеличение ширины полосы частот F канала связи.
- Способ 2. Увеличение мощности передаваемого сигнала P_s .
- Способ 3. Уменьшение мощности шума в канале связи P_n .

Способ 1, очевидно, является неперспективным, поскольку частотный ресурс является ограниченным природным ресурсом, и при большом числе абонентов в данной системе связи, а также в других системах связи, этим способом воспользоваться весьма затруднительно. Кроме того, увеличение ширины полосы частот канала связи увеличивает пропускную способность системы, но не улучшает спектральную эффективность системы связи, которая определяется отношением (C/F) .

Способ 2 может принести очень небольшой эффект, поскольку:

- Значительное увеличение мощности передаваемого сигнала приводит к очень незначительному увеличению пропускной способности канала связи (а следовательно, и к незначительному увеличению спектральной эффективности системы связи) из-за логарифмического характера зависимости в (1). Например, если мощность сигнала P_s увеличивается в 1000 раз, то пропускная способность C увеличивается только в 10 раз.
- Существенно увеличить мощность передаваемого сигнала P_s практически невозможно, поскольку это значительно увеличивает стоимость передающего оборудования, увеличивает его энергопотребление.
- Увеличение мощности сигнала одного абонента приводит к автоматическому увеличению мощности остальных абонентов что, в свою очередь, приводит к возрастанию уровня помех для всех абонентов системы связи.

Способ 3 также на практике трудно осуществить, поскольку снизить мощность шума в канале связи можно только, уменьшив одну его составляющую – тепловой шум. Однако, уменьшения мощности теплового шума можно достичь путем применения дорогостоящих малошумящих усилителей, что приведет к повышению стоимости оборудования связи. Другие составляющие – помехи различного рода – уменьшить весьма затруднительно.

Таким образом, можно сделать вывод, что проблема повышения спектральной эффективности системы связи в силу формулы Шеннона (1) носит трудноразрешимый характер.

Например, для того, чтобы получить спектральную эффективность 10 бит/сек/Гц, необходимо использовать моду-

ляцию 1024-QAM. Реализация системы связи с модуляцией такой высокой кратности достаточно сложна в силу наличия неизбежных аппаратных ошибок при формировании и приеме сигнала. Кроме того, использование модуляции высокой кратности требует высокого отношения сигнал/шум, что трудно осуществить на практике.

Поэтому традиционные системы связи SISO (см. рис. 1) имеют ограниченный потенциал развития и не позволяют обеспечить требуемую в современных и перспективных системах 6G высокую спектральную эффективность (приближающуюся к уровню 10 бит/сек/Гц, и, тем более, превышающему этот уровень).

2 Системы связи с несколькими антеннами

Формула Шеннона (1) для системы связи с одной передающей антенной и одной приемной антенной ставит фактически непреодолимый барьер на пути существенного повышения спектральной эффективности традиционных систем связи SISO. Однако, около 20 лет назад, в 1998-1999 гг. было найдено решение этой проблемы [7]. Предложенное тогда решение и последующее его развитие основаны на использовании на передающей и на приемной сторонах нескольких антенн вместо одной антенны. Такие системы известны под названием MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) [3], [4]. Пример системы MIMO показан на рис. 2.

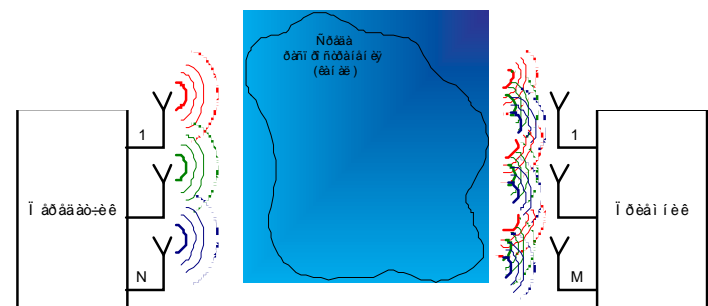


Рис. 2. Система связи с несколькими передающими и несколькими приемными антеннами (MIMO)

Системы MIMO позволяют получить очень важный для практики выигрыш в скорости передачи информации без увеличения занимаемой полосы частот (т.е. спектральной эффективности). Увеличение скорости передачи информации обеспечивается за счет одновременной передачи (мультиплексирования) нескольких цифровых потоков через различные передающие антенны. В приемнике эти потоки выделяются и затем объединяются в один скоростной поток данных. Выигрыш в спектральной эффективности пропорционален минимальному числу среди числа передающих и числа приемных антенн [2], [7].

В таблице 1 приведены значения спектральной эффективности (без учета помехоустойчивого кодирования) традиционной системы связи SISO с одной передающей антенной и одной приемной антенной при различных методах модуляции.

В таблице 2 приведены значения спектральной эффективности системы связи MIMO для распространенного на практике случая, когда число передающих антенн и число приемных антенн равны N , при модуляции 16-QAM.

Таблица 1

Вид модуляции	Спектральная эффективность, бит/сек/Гц
BPSK	1
QPSK	2
16-QAM	4
64-QAM	6
256-QAM	8

Таблица 2

Число антенн N	Спектральная эффективность, бит/сек/Гц
1	4
2	8
3	12
4	16
5	20
6	24

Из данных, приведенных в табл. 1 и 2, видно, что системы MIMO позволяют получить очень высокую спектральную эффективность, недостижимую для традиционных систем SISO. Например, для достижения спектральной эффективности 24 бит/сек/Гц в традиционной системе SISO нужно использовать модуляцию 2^{24} -QAM, т.е. порядок модуляции должен быть равен $2^{24} = 16777216 \approx 1.68 \cdot 10^7$. Реализация модулятора и демодулятора с использованием модуляции такого высокого порядка при существующем уровне развития техники и элементной базы невозможна.

3. Ортогональный многопользовательский доступ

Обратимся теперь к проблеме многопользовательского доступа в системах связи [2], [6]. Необходимо обеспечить такую связь между пользователями (абонентами), чтобы между ними не было взаимных помех. Каждому пользователю выделяется сигнал своей собственной уникальной формы, т.е. формы сигналов всех пользователей различны. Для того, чтобы обеспечить выполнение условия отсутствия помех между пользователями, нужно, чтобы сигналы всех пользователей были взаимно ортогональны [8], [9].

На приемной стороне наблюдается сумма сигналов всех пользователей, а также шума. Источником шума на входе приемника является тепловой шум, промышленные и иные помехи со стороны других технических систем и систем связи. Существенно уменьшить уровень шума на приемной стороне невозможно.

Условие ортогональности означает, что при приеме каждого конкретного сигнала данного пользователя наличие сигналов других пользователей незаметно и поэтому не сказывается на качестве приема сигнала данного пользователя [8], [10]. В существующих системах беспроводной связи применяются следующие основные методы ортогонального многопользовательского доступа (OMA – Orthogonal Multiple Access) [6], [11]:

- Многопользовательский доступ с частотным разделением (FDMA);
- Многопользовательский доступ с временным разделением (TDMA);
- Многопользовательский доступ с кодовым разделением (CDMA);
- Многопользовательский доступ с ортогональным частотным мультиплексированием (OFDMA).

При использовании FDMA сигналы различных пользователей передаются на различных частотах, т.е. каждому пользователю выделяется своя полоса частот и спектры сигналов различных пользователей не пересекаются. В системе с TDMA сигналы различных пользователей передаются на различных интервалах времени, т.е. каждому пользователю выделяется свой интервал времени (временное окно). В системах CDMA сигналы различных пользователей передаются в одной и той же полосе частот и на одном и том же интервале времени (т.е. одновременно). Однако, за счет свойства ортогональности сигналов пользователей их возможно полностью разделить на приемной стороне. В качестве сигналов пользователей в системах CDMA используются различные кодовые последовательности [8].

В системах OFDMA сигналы пользователей передаются также одновременно, но их полосы частот пересекаются. В качестве сигналов пользователей в системах OFDMA используются отрезки синусоид, размещенных на частотной оси с равными интервалами, которые специально подобраны, чтобы обеспечить выполнение свойства ортогональности. Используя это свойство ортогональности, сигналы системы OFDMA также могут быть полностью разделены на приемной стороне [12].

К сожалению, количество ортогональных сигналов, существующих на заданном конечном интервале времени, также ограничено [2], [8]. Это значит, что увеличение количества одновременно работающих пользователей в системе связи возможно только путем расширения полосы частот. До последнего времени возможности увеличения емкости систем связи с ортогональным многопользовательским доступом еще оставались, но требования к характеристикам систем 5G оказались такими высокими, что разработчики стандартов 5G были вынуждены отказаться от использования ортогональных сигналов [11], [13]. Аналогичный подход используется при разработке методов формирования сигналов и для будущих систем 6G [16], [17].

4. Неортогональный многопользовательский доступ

Ортогональный многопользовательский доступ использует свойство ортогональности сигналов. Оно позволяет осуществить их разделение путём простой корреляционной обработки. Поэтому с точки зрения синтеза сигналов для ортогонального многопользовательского доступа проблем особых не было. Некоторое исключение было при использовании систем с кодовым разделением. В них допускалось использование квазиортогональных сигналов, т.е. сигналов с малым уровнем взаимной корреляции ($<0,05$), но при этом предполагалась их равная мощность [6], [14].

Использование кодового разделения с квазиортогональными сигналами могло обеспечить увеличение емкости системы на 10-25% при оптимальном или квазиоптимальном многопользовательском приеме, по сравнению с системой с ортогональными сигналами. Поскольку небольшой уровень взаимной корреляции мог быть обеспечен только при сигналах с базой, большей 64, то, соответственно, требовалась реализация многопользовательского демодулятора для порядка 80 активных сигналов. Это приводило к резкому возрастанию стоимости приемника из-за увеличения его сложности.

В настоящее время в системах 5G и в перспективных системах 6G предполагается использование неортогонального

многопользовательского доступ (NOMA – Non-Orthogonal Multiple Access) [13], [15], [16], [17].

Неортогональный многопользовательский доступ NOMA, как следует из самого названия, предполагает, что сигналы пользователей не являются взаимно ортогональными. При неортогональном доступе сигналы пользователей передаются на одной и той же частоте и на одном и том же временном интервале. Причем речь может идти о сигналах с уровнем взаимной корреляции 0,5 и более и необязательно с одинаковой мощностью. Известная теория разделения сигналов, основанная на корреляционном приеме, здесь не работает, так как в ней предполагается линейный прием и не учитывается дискретный характер передаваемой информации.

Могут использоваться, например, следующие критерии синтеза сигналов для таких систем [13]:

- максимум минимального евклидова расстояния между точками суммарного сигнала,
- максимум пропускной способности системы с дискретно-непрерывным каналом,
- минимум вероятности ошибки на символ, где под символом понимается суммарный сигнал, несущий дискретную информацию от всех пользователей.

При синтезе сигналов для NOMA должны использоваться критерии, учитывающие дискретный характер передаваемых сигналов. Это существенно усложняет задачу синтеза, так как в данных критериях используется перебор всех возможных комбинаций. Кроме того, эта задача усложняется также случайным характером многопользовательского канала связи (замираниями, фазовыми сдвигами, временными задержками и т.п.). Поэтому в настоящее время нет подходящей теории, имеющей практическое значения для построения систем связи с технологией NOMA. Этим объясняется большое количество предложений по реализации NOMA для стандарта 5G [11], [13].

В настоящее время известны следующие разновидности неортогонального многопользовательского доступа [11], [13]:

- Многопользовательский доступ с разреженными кодами (Sparse Code Multiple Access – SCMA);
- Многопользовательский доступ с разделением с помощью перемежения (Interleave Division Multiple Access – IDMA);
- Многопользовательский доступ с разделением по мощности (Power Domain NOMA);
- Многопользовательский доступ с разделением с помощью шаблонов (Pattern Division Multiple Access – PDMA);
- Многопользовательский доступ с битовым мультиплексированием (Bit Division Multiplexing – BDM);
- Многопользовательский доступ коллективного пользования (Multi User Shared Access – MUSA);
- Многопользовательский доступ с кодовым разделением с сигнатурами низкой плотности (Low Density Signatures CDMA – LDS-CDMA);
- Многопользовательский доступ с последовательным подавлением помех (Successive interference cancellation Amenable Multiple Access – SAMA).

Следует отметить ещё одну особенность выбора и оптимизации сигналов для технологии NOMA, отличающей её от аналогичной технологии ортогонального доступа. Как уже отмечалось, использование линейных демодуляторов на основе корреляционного приема в системах NOMA невозмож-

но. Здесь необходимо использовать демодуляторы, основанные на принципах многопользовательского приема с учетом дискретности принимаемых сигналов. Оптимальные приемники имеют экспоненциальную сложность в зависимости от числа пользователей. Поэтому в системах NOMA предлагается использовать небольшое число ортогональных ресурсов Q (частотных или временных каналов) для передачи сигналов $K > Q$ пользователей. Сейчас, наиболее активно рассматривается режим использования $Q=4$ ресурсов для передачи $K=6, 8$ или 12 пользователей, что соответствует степеням перегруженности системы 150%, 200% и 300%. При таком небольшом числе пользователей и невысоком порядке модуляции можно рассматривать даже использование оптимальных демодуляторов.

Другой особенностью выбора и оптимизации сигналов для технологии NOMA является ориентирование на конкретные упрощенные алгоритмы демодуляции. Существуют различного рода квазиоптимальные итерационные алгоритмы демодуляции, обладающие простотой реализации, но которые могут использоваться только для сигналов с особой структурой. Например, использование сигналов с разреженной (или низкоплотностной) структурой позволяет применить итерационную турбообработку [11], [18]. Эта особенность характерна для версий NOMA типа SCMA и LDS-CDMA.

Стандарты систем 5G и перспективных систем 6G будут основаны на технологии NOMA, поскольку именно неортогональный доступ позволяет обеспечить наибольшую емкость системы связи [13], [19].

5. Проблема вычислительной сложности реализации приемника системы связи, использующей технологию MIMO и NOMA

Сигнал, присутствующий в каждой приемной антенне системы MIMO, представляет собой сумму переданных всеми передающими антеннами сигналов и шума. Для того, чтобы оптимальным образом выделить в приемнике все переданные сигналы, необходимо на интервале длительности одного символа провести перебор всех возможных комбинаций символов, передаваемых всеми антеннами [3], [4], [20]. В таблице 3 приведены результаты подсчета числа таких комбинаций.

Таблица 3

Число антенн N	Число комбинаций символов при разных методах модуляции			
	BPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM
2	4	16	256	4 096
4	16	256	65 536	16 772 216
6	64	4 096	16 772 216	68 719 476 736

Из таблицы 3 видно, что при числе антенн $N \geq 4$ и при использовании модуляции относительно высокого порядка (16-QAM и 64-QAM) число комбинаций символов оказывается очень большим, что делает невозможной практическую реализацию оптимального приемника системы MIMO на существующей элементной базе. Однако, именно в этом случае (см. табл. 2) достигается необходимая высокая спектральная эффективность системы связи.

В настоящее время известен ряд квазиоптимальных алгоритмов приема сигналов MIMO, которые имеют более низкую сложность, чем оптимальный алгоритм. Однако, эти

алгоритмы имеют значительные энергетические потери, причем при большом числе антенн эти потери увеличиваются [4], [11], [20].

Сделаем теперь анализ сложности реализации оптимального приемника системы NOMA. При приеме неортогональных сигналов оптимальный алгоритм требует также как и при оптимальном приеме сигналов в системе MIMO, полного перебора всех возможных комбинаций символов сигналов всех активных пользователей [11]. Этот перебор должен быть осуществлен на интервале времени, равном длительности принятого символа [21]. С целью иллюстрации объема вычислительных затрат, необходимых для указанного перебора комбинаций, в табл. 4 приведены результаты подсчета числа таких комбинаций. Подсчет проведен для различных методов модуляции и для различного числа K активных пользователей, сигналы которых присутствуют на входе приемника.

Таблица 4

Число активных пользователей K	Число комбинаций символов при разных методах модуляции			
	BPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM
10	1024	1 048 576	$1.2 \cdot 10^{12}$	$1.2 \cdot 10^{18}$
20	1 048 576	$1.2 \cdot 10^{12}$	$1.5 \cdot 10^{24}$	$1.5 \cdot 10^{36}$
30	$1.1 \cdot 10^9$	$1.4 \cdot 10^{18}$	$1.9 \cdot 10^{36}$	$1.9 \cdot 10^{54}$

Из таблицы 4 видно, что даже при небольшом числе активных пользователей реализация оптимального алгоритма приема неортогональных сигналов невозможна не только на современной, но и на перспективной элементной базе. Как и в случае MIMO, для приема неортогональных сигналов известны более простые квазиоптимальные алгоритмы [11]. Эти квазиоптимальные алгоритмы приема имеют более низкие показатели помехоустойчивости, чем упомянутый оптимальный алгоритм. Однако, при большом числе пользователей K , даже более простые, чем оптимальный алгоритм, алгоритмы приема, имеют очень высокую сложность, что является препятствием их практической реализации в системах 5G и, тем более, в системах 6G.

Нужно подчеркнуть в заключение, что проблема высокой вычислительной сложности алгоритмов приема в значительной степени усугубляется при комбинировании в одной системе связи технологий MIMO и NOMA. Хотя именно такое комбинирование MIMO и NOMA позволяет одновременно получить высокую эффективность и емкость системы связи.

Выводы

1. Для повышения спектральной эффективности и емкости систем беспроводной связи требуется развивать технологии MIMO и NOMA.
2. Общая проблема, возникающая при реализации этих технологий – вычислительная сложность приемника.
3. Основное направление исследований – поиск алгоритмов приема с низкой вычислительной сложностью и поиск соответствующих сигналов, прием которых возможен с минимальными потерями с помощью простых алгоритмов. В ближайшие годы актуальность исследований в указанном направлении представляется очень высокой в силу необходимости подготовки предложений для стандартов перспективных систем 6G.

4. Актуальность данных исследований не будет снижаться и в перспективе ближайших 10-15 лет, поскольку при увеличении скоростей передачи информации требования к сложности алгоритмов демодуляции возрастают.

Литература

1. *Jamil Y. Khan, Mehmet R. Yuce.* Internet of Things (IoT): Systems and Applications. USA, Jenny Stanford Publishing, 2019. 350 p.
2. *Прокис Дж.* Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред. Д.Д.Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 797 с.
3. *Jerry R. Hampton.* Introduction to MIMO Communications, UK, Cambridge University Press, 2014. 288 p.
4. *Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б.* Технология MIMO: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 280 с.
5. R1-1809974, “Updated offline summary of performance evaluations for NOMA” ZTE, RAN1#94.
6. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание: Пер. с англ. М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. 1104 с.
7. *Alamouti S.M.* A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications. IEEE Journal on Selected Areas of Communications. Vol. 16. № 8, October 1998, pp. 1451-1458.
8. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
9. *Зубарев Ю.Б., Трофимов Ю.К., Шлома А.М., Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б.* Новые алгоритмы формирования и обработки сигналов в системах подвижной связи // Электросвязь. 2004. № 3. С. 11-13.
10. *Тыртыйшиников Е.Е.* Матричный анализ и линейная алгебра. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
11. *Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю.* Технологии в системах радиосвязи на пути к 5G. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 280 с.
12. *Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П.* Технология OFDM. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 360 с.
13. *Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and beyond.* Edited by Mojtaba Vaezi, Zhiguo Ding and Vincent Poor. USA: Springer, 2019, 670 p.
14. *Иванов В.П.* Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М.: Радио и связь, 1992. 152 с.
15. *Sari H, Maatouk A., Caliskan E., Assaad M., Koca M., Gui G.* On the Foundation of NOMA and its Application to 5G Cellular Networks // Proc., WCNC, 2018, April, 2018, Barcelona, Spain.
16. *Clazzer, Federico & Munari, Andrea & Liva, Gianluigi & Lizaro, Francisco & Stefanovich Iedomir & Popovski, Petar.* (2019). From 5G to 6G: Has the Time for Modern Random Access Come? Электронный ресурс: <https://arxiv.org/pdf/1903.03063.pdf>.
17. *Stoica, Razvan-Andrei & Abreu, Giuseppe.* (2019). 6G: the Wireless Communications Network for Collaborative and AI Applications. Электронный ресурс: <https://arxiv.org/pdf/1904.03413v1.pdf>.
18. *Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П.* Турбообработка в системах с пространственно-временным кодированием // Радиотехника и электроника. 2010. Том 55. № 2. С. 206-214.
19. Электронный ресурс: <https://nag.ru/articles/article/32077/noma-novaya-tehnologiya-dlya-besprovodnyih-setey.html>.
20. *Clerckx B., Oestges C.* MIMO Wireless Networks: Channels, Techniques and Standards for Multi-Antenna, Multi-User and Multi-Cell Systems. Second Edition. UK: Elsevier, 2013. 733 p.
21. *Бен Режеб Т.Б.К., Смирнов А.Э.* Исследование эффективности методов демодуляции сигналов в системах связи с большим количеством антенн // Труды 70-й международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС-2015», посвященной дню Радио. Выпуск LXX. М.: Брис-М, 2015. С. 251-255.

THE PROBLEM OF SPECTRAL EFFICIENCY AND CAPACITY INCREASE IN PERSPECTIVE 6G COMMUNICATION SYSTEMS

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

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

Abstract

The problem of increase of spectral efficiency and increase of the number of users in perspective 6G communication systems is now the focus of extensive research all over the world. This problem is being solved in 3G, 4G and 5G systems mainly at the expense of both MIMO technology and orthogonal multiple access (OMA) methods. Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) and Code Division Multiple Access (CDMA) are such methods. However, since future 6G systems shall meet very high requirements to spectral efficiency, interference immunity and capacity, that orthogonal access OMA cannot already provide required system capacity at given interference immunity and spectral efficiency. Therefore, non-orthogonal methods of multiple access (NOMA) are being considered. If one use classic correlation reception theory to NOMA signals, then interference immunity of communication system will be not high. NOMA technique require the synthesis of new signals and new reception algorithms, since classic linear correlation reception theory cannot be implemented. Moreover, one needs to find new criteria for such synthesis, those should take into account computational complexity of signal demodulation. It is shown in the article, that general research direction for 6G development is to find quite novel reception algorithms with low computational complexity and search of corresponding novel signals, those can be received via low interference immunity loss with simple algorithms. The requirement to use simple reception algorithms is caused by high requirements to data transmission rate in 6G systems.

Keywords: MIMO technology, orthogonal access, non-orthogonal access, computational complexity, spectral efficiency, capacity, correlation reception.

References

1. Jamil Y. Khan, Mehmet R. Yuce. (2019). *Internet of Things (IoT): Systems and Applications*. USA, Jenny Stanford Publishing. 350 p.
2. Prokis J. (2000). *Digital communications*. Edited by D.D.Klovsky. Moscow: Radio and communications. 797 p. (In Russian)
3. Jerry R. Hampton. (2014). *Introduction to MIMO Communications*, UK, Cambridge University Press. 288 p.
4. Bakulin M.G., Varukina L.A., Kreyndelin V.B. (2014). *MIMO technology: principals and algorithms*. Moscow: Goryachaya linia – Telecom. 280 p. (In Russian)
5. R1-1809974, "Updated offline summary of performance evaluations for NOMA" ZTE, RAN1#94.
6. Sklyar B. (2003). *Digital communications. Theoretical basis and practical implementation*, 2-nd edition. Moscow: Izdatelskiy dom "Viliams". 1104 p.
7. Alamouti S.M. (1998). A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*. Vol. 16. No. 8, October 1998, pp. 1451-1458.
8. Varakin L.E. (1985). *Communication systems with pseudo-noise signals*. Moscow: Radio I svyaz. 384 p. (In Russian)
9. Zubarev Y.B., Trofimov Y.K., Shloma A.M., Bakulin M.G., Kreyndelin V.B. (2004). New algorithms of signal generation and processing in mobile communication systems. *Electrosvyaz*. No. 3, pp. 11-13. (In Russian)
10. Tyrtshnikov E.E. (2007). *Matrix analysis and linear algebra*. Moscow: Fizmatlit. 480 p. (In Russian)
11. Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Pankratov D.Y. (2018). *Technologies in radiocommunication systems on the road to 5G*. Moscow: Goryachaya linia – Telecom. 280 p. (In Russian)
12. Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Shloma A.M., Shumov A.P. (2016). *OFDM technology*. Moscow: Goryachaya linia – Telecom. 360 p. (In Russian)
13. *Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and beyond*. Edited by Mojtaba Vaezi, Zhiguo Ding and Vincent Poor. USA: Springer. 2019. 670 p.
14. Ipatov V.P. (1992). *Periodic discrete signals with optimal correlation properties*. Moscow: Radio I svyaz. 152 p. (In Russian)
15. H.Sari, A.Maatouk, E.Caliskan, M.Assaad, M.Koca, and G.Gui, (2018). On the Foundation of NOMA and its Application to 5G Cellular Networks. *Proc., WCNC*, April, 2018, Barcelona, Spain.
16. Clazzer, Federico & Munari, Andrea & Liva, Gianluigi & Lazaro, Francisco & Stefanovi?, Ledomir & Popovski, Petar. (2019). From 5G to 6G: Has the Time for Modern Random Access Come? Электронный ресурс: <https://arxiv.org/pdf/1903.03063.pdf>.
17. Stoica, Razvan-Andrei & Abreu, Giuseppe. (2019). 6G: the Wireless Communications Network for Collaborative and AI Applications. Internet resource: <https://arxiv.org/pdf/1904.03413v1.pdf>.
18. Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Shumov A.P. (2010). Turboprocessing in communication systems with space-time coding. *Radiotekhnika I elektronika*. Vol. 55. No. 2, pp. 206-214. (In Russian)
19. Internet resource: <https://nag.ru/articles/article/32077/noma-novaya-tehnologiya-dlya-besprovodnyih-setey.html>.
20. Clerckx B., Oestges C. (2013). *MIMO Wireless Networks: Channels, Techniques and Standards for Multi-Antenna, Multi-User and Multi-Cell Systems*. Second Edition. UK: Elsevier. 733 p.
21. Ben Rejeb T.B.K., Smirnov A.E. (2015). Study of efficiency of signal demodulation methods in systems with large number of antennas. *Proceedings of 70-th international conference "Radioelectronic devices and systems for infocommunication technologies - REUS-2015"*, devoted to Radio Day. Issue LXX. Moscow: Bris-M, pp. 251-255. (In Russian)

Information about authors:

Mikhail G. Bakulin, Ph.D., Ass.-Prof., Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Vitaly B. Kreyndelin, Dr. Tech. Sc. Prof. Chief of Department, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia