

ТЕХНОЛОГИЯ МИМОКАК ПРЕДПОСЫЛКА РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ 5G

© Л. К. Хаджиева, Х. Э. Таймасханова, М. Ш. Элиханова

ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

В статье определены особенности развития технологии МИМО в сетях 5G и рассмотрено их применение на практике. Также приведены имеющиеся на данный момент данные о применении технологии МИМО в сетях 5G. Рассмотрены проблемы реализации технологии МИМО и их решение. Определена роль данной технологии в будущем беспроводных коммуникаций.

Возрастающие темпы развития телекоммуникаций и радикальные изменения потребностей и ожиданий абонентов сетей сотовой связи вновь и вновь диктуют развитие с последующей сменой технологических партнеров.

Мобильные устройства перестали быть просто средством коммуникации, они стали умным инструментом информационного потребления, расширяя возможности человека. Процессы, такие как повсеместное распространение смартфонов и планшетов, разработка облачных сервисов и социальных сетей, резко изменили привычки и поведение пользователей. Сегодня мобильные абоненты ожидают от беспроводных сетей те же, если не больше, возможности как от проводного интернета. Основные доходы мобильных операторов все чаще поступают от голосовых услуг к услугам передачи данных.

Ключевые слова: технология МИМО, сети 5G, беспроводные сети, Massive МИМО.

В последнее время растет интерес к беспроводным системам передачи информации. Поэтому возникает вопрос об увеличении пропускной способности, что не снижает качество предоставляемых услуг связи. Эта проблема может быть решена с помощью технологии MultipleInputMultipleOutput (МИМО).

С момента своего создания около десяти лет назад концепция МИМО из простой академической идеи превратилась в одну из самых популярных тем для исследования в сообществе беспроводных коммуникаций.

И время Massive МИМО наступило именно сейчас по двум причинам: во-первых, традиционные технологии оказались неспособны обеспечить спектральную эффективность, к которой стремятся приложения 5G. Во-вторых, уверенность в безусловной ценности данной технологии быстро распространилась, поскольку реальные прототипы оказались по-настоящему впечатляющими и продемонстрировали рекордную спектральную эффективность, а также была подтверждена надежная работа с радиочастотными и низкочастотными схемами низкой сложности [1].

По оценкам исследователей, около 5% провайдеров услуг начнут предлагать услуги беспроводной связи 5G в недалеком будущем, что представляет собой значительный прогресс в испытаниях концепций 5G. Но 5G не сможет достичь требований ИТМ-2020 20 Гбит/с, без каких-либо серьезных прорывов. На данный момент ещё не ясно, какие технологии будут наиболее эффективны для 5G в долгосрочной перспективе, но уже появилось несколько фаворитов. И безусловным лидером среди них является технология Massive МИМО.

Технология пространственного кодирования сигнала МИМО. МИМО – это метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала, при котором для передачи данных используются две и более антенны и такое же количество антенн для приёма.

И, если в сетях 4G используется МИМО 2×2 , то в технологии 5G число антенн должно увеличиться. Эта технология имеет сразу два весомых аргумента для применения: скорость передачи данных возрастает практически про-

порционально количеству антенн, при этом качество сигнала улучшается за счет приема сигнала сразу несколькими антеннами.

Использование большого количества дополнительных антенн поможет сфокусировать энергию на более мелкие области пространства, что, в свою очередь, положительно скажется на увеличении пропускной способности и эффективности использования излучаемой энергии. В IEEE указывают также и другие преимущества использования Massive MIMO, – это более дешевое производство отдельных компонентов антенной системы, более низкие задержки в сети и упрощение работы на уровне MAC (физическом уровне модели OSI).

Ключевые технологические характеристики Massive MIMO:

1. Полностью цифровая обработка; каждая антенна имеет свою собственную радиочастотную и цифровую цепь основной полосы частот. Сигналы от всех антенн на каждой базовой станции обрабатываются когерентно вместе. Основные преимущества полностью цифровой обработки включают в себя исключение конкретных предположений о канале распространения, возможность измерять полный отклик канала в восходящей линии связи и быстро реагировать на изменения в канале. Интересно, что недавние оценки показывают, что полная цифровая обработка может не только обеспечить превосходную производительность, но также и более высокую энергоэффективность, тенденция, которая может быть усилена продолжающимся развитием специализированных схем с низким энергопотреблением.

2. Зависимость от взаимности распространения и работы TDD, позволяющая оценивать каналы нисходящей линии связи по пилот-сигналам восходящей линии связи, и устраняющая необходимость в предварительных или структурных знаниях канала распространения.

3. Недорогие в вычислительном отношении алгоритмы предварительного кодирования /декодирования, принимающие форму максимального отношения (известное также как сопряженное формирование луча) или обработку с нулевым форсированием. Massive MIMO

одинаково хорошо работает с передачей на одной несущей и OFDM.

Примечательно, что сопряженное формирование луча с OFDM эквивалентно обращению времени в системе с одной несущей.

4. Коэффициент усиления массива, приводящий, в принципе, к расширению бюджета канала с обратной связью, пропорционально количеству антенн базовой станции.

5. Упрочнение канала, которое эффективно устраняет эффекты быстрого замирания. В рабочем состоянии каждая линия терминала – базовой станции становится скалярным каналом, усиление которого стабилизируется до детерминированной и независимой от частоты постоянной. Это значительно упрощает проблемы распределения ресурсов.

6. Обеспечение одинаково хорошего качества обслуживания для всех терминалов в соте – облегчается улучшение бюджета линии, предлагаемым усилением массива и возможностью подавления помех, обеспечиваемой пространственным разрешением массива. Типичные базовые алгоритмы управления мощностью обеспечивают максимальную справедливость среди терминалов.

7. Автономная работа базовых станций без обмена данными полезной нагрузки или информацией о состоянии канала с другими сотами и без требований точной синхронизации времени.

8. Возможность снижения точности и разрешения внешних интерфейсов приемопередатчиков, а также цифровая обработка и представление чисел в вычислениях.

Системы MIMO требуют комбинации расширения антенны и сложных алгоритмов. Он многогранен, но MIMO уже давно используется в беспроводной связи – и для мобильных устройств, и для сетей характерно наличие нескольких антенн для улучшения возможности соединения и повышения скорости и удобства работы пользователей. Алгоритмы MIMO вступают в игру, чтобы контролировать, как данные передаются на антенны и где сфокусировать энергию в космосе. И сетевые, и мобильные устройства должны тесно взаимодействовать друг с другом, чтобы заставить работать MIMO.

Теперь, с проектированием новых сетей 5G NR, MIMO становится «массовым» и решающим для развертываний 5G NR.

Massive MIMO, который является расширением MIMO, выходит за рамки устаревших систем, добавляя гораздо большее количество антенн на базовой станции. «Огромное» количество антенн помогает сфокусировать энергию, что резко повышает пропускную способность и эффективность. Наряду с увеличением количества антенн как сетевые, так и мобильные устройства реализуют более сложные конструкции для координации операций MIMO. Все это говорит о том, что все эти улучшения направлены на повышение производительности, необходимое для поддержки опыта 5G, которого ожидают потребители в эту новую эру.

Проблемы Massive MIMO. Проблемой в Massive MIMO является то, что данные должны быть доступны каждому процессору для вычисления обратных матриц и других подобных алгоритмических функций. Если система оснащена центральным процессором, то все данные должны быть направлены на него. Если конфигурация включает в себя распределенную обработку, каждый процессор должен иметь доступ ко всем данным постоянно, что требует тех же требований к пропускной способности, что и для центрального процессора.

Чтобы понять требуемую пропускную способность, давайте рассчитаем, какова будет минимальная пропускная способность данных для центрального узла обработки для системы MIMO 100×100 с полосой пропускания 28 МГц с использованием стандартной тактовой частоты дискретизации LTE 30,72 МГц и 12-битных выборов.

Расчеты следующие: для покрытия 28 МГц, частоты дискретизации $2 \times 30,72$ МГц требуется 61,44 MSPS в соответствии с теоремой Найквиста (когда основано на стандартном тактовом сигнале LTE 30,72 МГц). Каждая выборка имеет 12 битов, поэтому скорость передачи данных для одной радиостанции составляет 737,28 Мбит / с. Умножив это на 100, чтобы охватить все радиостанции, мы увидим, что пропускная способность центрального процессора составляет 73,7 Гбит / с при покрытии только полосы пропускания 28 МГц.

Целевая полоса пропускания 100 МГц требует пропускной способности не менее 320 Гбит / с [2].

Большинство телекоммуникационных систем основаны на FPGA. За исключением Virtex-7, FPGA Xilinx поддерживают только PCIeGen 1. IP-ядро RTDExNutaq обеспечивает поддержку PCIeGen 14x на Perseus AMC на базе Virtex-6. Этот интерфейс обеспечивает проверенную поддерживаемую пропускную способность около 6 Гбит / с.

Одним из возможных решений является распараллеливание маршрутизации данных. Другими словами, можно было бы либо стремиться к ячеистой архитектуре между узлами распределенной обработки, либо иметь несколько каналов, маршрутизирующих данные от подгрупп радиостанций в системе к блоку обработки параллельно.

Распараллеливание каналов передачи данных требует изменения интерфейса с PCIe на другой, более адаптированный интерфейс. В случае с оборудованием Nutaq, Aurora используется через разъемы для дисков miniSAS, обеспечивая до 7×16 Гбит / с на каждую подгруппу из 4 радиоканалов. Дисковые разъемы miniSAS находятся на модуле заднего перехода (RTM) и установлены в шасси MTCA. 4. Чтобы увеличить количество каналов, Nutaq создает подгруппы радиоканалов.

Преимущества Massive MIMO. Massive MIMO является ключевым фактором, обеспечивающим чрезвычайно высокую скорость передачи данных 5G, и обещает поднять потенциал 5G на новый уровень. Основные преимущества Massive MIMO для сети и конечных пользователей можно обобщить следующим образом:

Увеличенная пропускная способность сети – пропускная способность сети определяется как общий объем данных, который может быть предоставлен пользователю, и максимальное количество пользователей, которые могут быть обслужены с определенным уровнем ожидаемого обслуживания. Massive MIMO в первую очередь способствует увеличению пропускной способности, позволяя развертывание 5G NR в более высоком частотном диапазоне на частоте менее 6 ГГц (например,

3,5 ГГц); и во-вторых, используя MU-MIMO, где несколько пользователей обслуживаются с одинаковыми временными и частотными ресурсами.

Улучшенное покрытие – благодаря Massive MIMO пользователи получают более единообразный доступ по всей сети, поэтому пользователи могут ожидать высокую скорость передачи данных практически везде. Кроме того, трехмерное формирование луча обеспечивает динамическое покрытие, необходимое для перемещения пользователей (например, пользователей, путешествующих на автомобилях или подключенных автомобилях), и регулирует покрытие в соответствии с местоположением пользователя, даже в местах с относительно слабым покрытием сети.

Опыт пользователя. В конечном счете, два вышеуказанных преимущества улучшают общее взаимодействие с пользователем: пользователи могут передавать большие файлы данных или загружать фильмы, а также использовать приложения, требующие данные, на ходу, где бы они ни потребовались [3].

Как упоминалось ранее, MIMO используется в беспроводной связи в течение многих лет. Но теперь, в контексте 5G NR, Massive MIMO радикально меняет то, как и когда мы решим использовать наши мобильные устройства. Нам больше не нужно гадать, находимся ли мы в хорошей области для загрузки или передачи больших файлов. С помощью данной технологии пользовательский опыт собирается сделать огромный шаг вперед.

Вплоть до 1990-х годов пространственное разнесение часто ограничивалось системами, которые переключались между двумя антеннами или объединяли сигналы для обеспечения наилучшего сигнала. Также были реализованы различные формы переключения лучей, но с учетом уровней обработки и доступных степеней обработки, системы, как правило, были относительно ограниченными.

Однако с появлением дополнительных уровней вычислительной мощности, которые стали доступны, стало возможным использовать как пространственное разнесение, так и полное пространственное мультиплексирование.

Первоначальная работа над системами MIMO была сосредоточена на базовом пространственном разнесении – здесь система MIMO использовалась для ограничения ухудшения, вызванного многолучевым распространением. Однако это был только первый шаг, поскольку система затем начала использовать многолучевое распространение, чтобы превратить дополнительные сигнальные тракты в то, что можно эффективно рассматривать как дополнительные каналы для переноса дополнительных данных [4].

Два исследователя: Arogyaswami Paulraj и Thomas Kailath были первыми, кто предложил использовать пространственное мультиплексирование с использованием MIMO в 1993 году, а в следующем году их патент США был выдан.

Однако Bell Labs первыми продемонстрировали лабораторный прототип пространственного мультиплексирования в 1998 году.

С тех пор данная технология претерпела много изменений, были совершены действительно удивительные прорывы, которые я привела ниже.

Массовые прорывы в MIMO. Технология Massive MIMO уже используется коммерчески в Китае и Японии в контексте 4G LTE. Сеть Softbank этой страны развернула первую коммерческую сеть Massive MIMO ближе к концу 2016 года.

В начале сентября 2017 года Эрикссон объявил о запуске нового радио FDD (Frequency Division Duplexing) с поддержкой 5G и Massive MIMO. Он заявил, что это сократит разрыв между 4G и 5G, повысит пропускную способность существующих 4G LTE и сформирует основу для 5G [4].

Китайские сетевые технологические компании ZTE и Huawei объявили о новых европейских тестах Massive MIMO в октябре 2017 года.

Также в 2017 году Vodafone и Huawei объединились в Австралии, чтобы продемонстрировать технологию Massive MIMO в реальных условиях. Им удалось использовать существующий частотный спектр Vodafone, а также активный антенный блок 5G от Huawei (с 32 внутренними передатчиками и приемниками) для

достижения скорости передачи 717 Мбит / с на восьми устройствах.

В начале 2018 года Nokia сделала шаг к усовершенствованию самой технологии антенн Massive MIMO, выпустив чипсет ReefShark. Будучи меньше, легче и энергоэффективнее своих предшественников, Nokia заявляет, что ReefShark уменьшает размер огромной антенны MIMO вдвое и снижает потребление энергии в модулях основной полосы частот на 64%.

Корейский технологический гигант Samsung также занимался технологией Massive MIMO. В своей штаб-квартире в Сувоне, Корея, компания создала так называемый «5G City», чтобы дать некоторое представление о том, на что может быть похожа жизнь, когда 5G будет запущен.

Одним из основных элементов этого 5G City был так называемый «5G Stadium», который конкретно продемонстрировал, как Massive MIMO может позволить одновременно передавать HD-видео без каких-либо задержек или перерывов [5].

Тестирование производительности нескольких параллельных сигналов на самом деле было довольно сложной задачей для телекоммуникационной отрасли. Компания CobhamWireless решила эту проблему в марте 2018 года с помощью многолучевого решения для тестирования производительности Massive MIMO, разработанного совместно с Китайским институтом мобильных исследований. Он позволяет проводить испытания в виртуализированной среде, которая имитирует реальные условия, что было шагом вперед по сравнению с предшествующими лабораторными испытаниями ограниченного масштаба.

На MWC 2019 в Барселоне Эрикссон получил награду за лучшую инфраструктуру мобильной сети благодаря широкополосному MIMO MIMO 5G. Это первое в истории коммерческое расширенное мобильное широкополосное решение, работающее на миллиметровых волнах, или более высоких частотных диапазонах, которые будут определять 5G.

Vodafone стала первой европейской мобильной сетью, которая развернула Massive MIMO, когда в июне 2017 года начала модернизацию ряда своих сайтов в Великобритании.

Почти год спустя, в апреле 2018 года, Vodafone провел первое в Великобритании испытание спектра на частоте 3,4 ГГц с использованием технологии Massive MIMO.

В октябре 2018 года Vodafone запустил первое полное 5G британское испытание в Солфорде. Это был первый аппарат с полным 5G по коммерческой сети, в котором использовалась технология Massive MIMO в сочетании со спектром 3,4 ГГц. С тех пор он провел эти тесты в Бирмингеме, Бристоле, Кардиффе, Глазго, Ливерпуле и Лондоне.

Британская сеть EE также работает с массивной технологией MIMO. В ноябре 2017 года он использовал Massive MIMO для демонстрации скорости загрузки 2,8 Гбит / с в сквозной тестовой сети 5G. Материнская компания BT также работает с Nokia над внедрением вышеупомянутого чипсета ReefShark в свою сеть [5].

Выводы. Технологии сотовой связи не стоят на месте, и с каждым днем мы все ближе к переходу к 5G-технологиям, уже сейчас в Южной Корее и княжестве Монако появилась сеть 5G, а многие другие государства уже заключили договора с поставщиками, в том числе и Россия. Из более чем 562 отдельных демонстраций и испытаний 5G по всему миру по меньшей мере 94 из них были связаны с тестированием Massive MIMO в контексте 5G. Что в очередной раз доказывает, что за технологией MIMO будущее сетей 5-го поколения. Подводя итог всему вышесказанному, на данном этапе мы не прошли и середины пути к глобальному переходу к сетям пятого поколения, мы находимся в начале этого пути, но использование технологии Massive MIMO в ходе дальнейшего совершенствования сетей 4G позволит значительно улучшить эффективность использования спектра, особенно в сценариях большого трафика и улучшения покрытия, что даст стандарту 4G возможность удовлетворить растущий спрос на услуги передачи данных в эпоху 4.5G. Эта технология предусмотрена и требуется для развертывания сетей 5G.

Революционные возможности данной технологии уже сегодня закладывают прочную основу для развития 4G и будущего развертывания сетей 5G и способствуют развитию телекоммуникационной индустрии в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Маглицкий Б. Н.* Основы технологий множественного доступа в сетях сотовой связи: учебное пособие. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2011. 140 с. ISBN 2227-8397. Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. URL: <http://www.iprbookshop.ru/45496.html> (дата обращения: 17.11.2019). Режим доступа: для авторизир. пользователей.
2. *Маглицкий Б. Н.* Методы передачи данных в сотовых системах связи: учебное пособие. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2013. 178 с. ISBN 2227-8397. Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. URL: <http://www.iprbookshop.ru/45479.html> (дата обращения: 17.11.2019). Режим доступа: для авторизир. пользователей.
3. *Деарт В. Ю.* Мультисервисные сети связи. Протоколы и системы управления сеансами (Softswitch/IMS). М.: Московский технический университет связи и информатики, 2010. 198 с. ISBN 2227-8397. Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. URL: <http://www.iprbookshop.ru/61507.html> (дата обращения: 17.11.2019). Режим доступа: для авторизир. пользователей.
4. *Винокуров В. М.* Сети связи и системы коммутации: учебное пособие. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. 304 с. ISBN 5-86889-215-1. Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. URL: <http://www.iprbookshop.ru/13972.html> (дата обращения: 17.11.2019). Режим доступа: для авторизир. пользователей.
5. *Удовикин В. Л.* Системы и сети связи с подвижными объектами: учебное пособие. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2012. 80 с. ISBN 2227-8397. Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. URL: <http://www.iprbookshop.ru/64574.html> (дата обращения: 17.11.2019). Режим доступа: для авторизир. пользователей.

MIMO TECHNOLOGY AS A BACKGROUND OF 5G NETWORK DEVELOPMENT

© L. K. Khadzhieva, H. E. Taymaskhanova, M. Sh. Elikhanova
GSTOU named after acad. M. D. Millionschikov, Grozny, Russia

The article defines the features of the development of MIMO technology in 5G networks and considers their application in practice. The data currently available on the use of MIMO technology in 5G networks are also presented. The problems of the implementation of MIMO technology and their solution are considered. The role of this technology in the future of wireless communications is determined.

The increasing pace of telecommunications development and the radical changes in the needs and expectations of subscribers of cellular networks again and again dictate development with the subsequent change of technological partners.

Mobile devices have ceased to be just a means of communication, they have become a smart tool for information consumption, expanding human capabilities. Processes, such as the ubiquity of smartphones

and tablets, the development of cloud services and social networks, have dramatically changed user habits and behavior. Today, mobile subscribers expect the same, if not more, capabilities from wireless networks as from wired Internet. The main income of mobile operators is increasingly coming from voice services to data services.

Keywords: MIMO technology, 5G networks, wireless networks, Massive MIMO.

REFERENCES

1. Maglitskii, B.N. (2011) *Osnovy tekhnologii mnozhestvennogo dostupa v setyakh sotovoi svyazi: uchebnoe posobie / B.N. Maglitskii. Tekst: elektronnyi // Elektronno-bibliotechnaya sistema IPR BOOKS : [sait]. [Fundamentals of multiple access technologies in cellular networks: a training manual. Text: electronic // Electronic Library System IPR BOOKS: [site]. Available at: URL: <http://www.iprbookshop.ru/45496.html> (accessed: 17.11.2019). Access Mode: for authorized users]. ISBN 2227-8397. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics. p. 140.*
2. Maglitskii, B.N. (2013) *Metody peredachi dannykh v sotovykh sistemakh svyazi: uchebnoe posobie. Tekst: elektronnyi // Elektronno-bibliotechnaya sistema IPR BOOKS: [sait]. [Methods of data transmission in cellular communication systems: a training manual. Text: electronic // Electronic Library System IPR BOOKS: [site]. Available at: URL: <http://www.iprbookshop.ru/45479.html> (accessed: 17.11.2019). Access Mode: for authorized users]. ISBN 2227-8397. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics. p. 178.*
3. Deart, V.Yu. (2010) *Mul'tiservisnye seti svyazi. Protokoly i sistemy upravleniya seansami (Softswitch/IMS) / V. Yu. Deart– Tekst: elektronnyi // Elektronno-bibliotechnaya sistema IPR BOOKS: [sait]. [Multiservice communication networks. Protocols and session management systems (Softswitch / IMS). Text: electronic // Electronic Library System IPR BOOKS: [site]. Available at: URL: <http://www.iprbookshop.ru/61507.html> (accessed: 17.11.2019). Access Mode: for authorized users]. ISBN 2227-8397. M.: Moscow Technical University of Communications and Informatics. p. 198.*
4. Vinokurov, V.M. (2012) *Seti svyazi i sistemy kommutatsii: uchebnoe posobie / V. M. Vinokurov. Tekst: elektronnyi // Elektronno-bibliotechnaya sistema IPR BOOKS: [sait]. [Communication networks and switching systems: a training manual. Text: electronic // Electronic Library System IPR BOOKS: [site]. Available at: URL: <http://www.iprbookshop.ru/13972.html> (accessed: 17.11.2019). Access Mode: for authorized users]. ISBN 5-86889-215-1. Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. p. 304.*
5. Udovikin, V.L. (2012) *Sistemy i seti svyazi s podvizhnymi ob'ektami: uchebnoe posobie. Tekst: elektronnyi. Elektronno-bibliotechnaya sistema IPR BOOKS: [sait]. [Communication systems and networks with mobile objects: a training manual. - Text: electronic // Electronic Library System IPR BOOKS: [site]. Available at: URL: <http://www.iprbookshop.ru/64574.html> (accessed: 17.11.2019). Access Mode: for authorized users]. ISBN 2227-8397. Tambov: Tambov State Technical University, EBS DIA. p. 80.*