

УДК 004.73:621.396.24

АНАЛИЗ И ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СТАНДАРТА МОБИЛЬНОЙ СЕТИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

Гурский С.М., Баев В.А., Дьяков А.В.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»
Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург,
e-mail: sergeygurskiy2018@yandex.ru, bovasss@mail.ru, eceh4ik@gmail.com

Статья посвящена комплексному анализу и исследованию модели мобильной сети пятого поколения. Рассматриваются технологии, используемые в реализации данной модели сети и её основные характеристики. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов. Метод пространственного кодирования сигнала. Технологии совместного использования спектра. Разъясняются фундаментальные понятия теории мобильных сетей. Поднимаются вопросы применения и использования нового стандарта мобильной сети в различных областях деятельности человека, а также конфликтов, возникших при разработке модели данной мобильной сети. В статье предложены технические решения адаптивных цифровых модулей антенных решёток радиотехнических систем, в том числе и систем цифровой связи пятого поколения, которые могут улучшить условия обнаружения полезных сигналов на фоне помех при появлении механических повреждений элементов антенно-волноводных трактов. Указанное улучшение условий обнаружения достигается тремя путями. Во-первых, предложен метод синтеза алгоритмов факторизируемого пространственно-временного обнаружителя нефакторизируемых (широкополосных в пространственно-временном смысле) сигналов с использованием многоканальной частотной фильтрации в каждом пространственном канале на основе математического аппарата матричных кронекеро-тензорных произведений. Показано, что внедрение предложенного метода в практику создания цифровых аналого-цифровых модулей сможет обеспечить величину выигрыша в отношении сигнал – помеха не менее (8–12) дБ по сравнению с известными устройствами, использующими, например, подрешетки антенной системы. Во-вторых, размещение волноводного тракта адаптивных цифровых модулей цифровых антенных решёток в токопроводящую оболочку на резиновой основе, способную закрывать механические повреждения и препятствовать излучению через них электромагнитной энергии в пространство. В-третьих, использование модулей цифровых антенных решёток радиотехнических систем, в том числе и систем цифровой связи пятого и шестого поколений, в качестве объекта автоматической коррекции амплитудно-частотных характеристик, которые могут изменяться при появлении механических повреждений в процессе эксплуатации. Таким образом, использование предлагаемых технических решений может позволить повысить отношение сигнал – шум на выходе приёмных модулей цифровых антенных решёток в системах военной связи с технологиями MIMO-OFDM в условиях локальных вооружённых конфликтов в сравнении с известными решениями.

Ключевые слова: мобильная сеть, пятое поколение, трафик, короткие волны, развитие, модуляция, формирование лучей, маленькие соты, будущее

ANALYSIS AND MAIN TECHNOLOGIES OF THE FIFTH GENERATION MOBILE NETWORK STANDARD

Gurskiy S.M., Baev V.A., Dyakov A.V.

Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education
«The Mozhaisky Military Space Academy» of the Ministry of Defence of the Russian Federation,
Saint-Petersburg, e-mail: sergeygurskiy2018@yandex.ru, bovasss@mail.ru, eceh4ik@gmail.com

The article is devoted to a comprehensive analysis and study of the fifth generation mobile network model. The technologies used in the implementation of this network model and its main characteristics are considered. Orthogonal frequency division multiplexing. The method of spatial coding of the signal. Spectrum sharing technologies. The fundamental concepts of the theory of mobile networks are explained. The questions of application and use of the new standard of the mobile network in various areas of human activity, as well as conflicts that arose during the development of the model of this mobile network, are raised. The article proposes technical solutions for adaptive digital modules of antenna arrays of radio engineering systems, including fifth-generation digital communication systems, which can improve the conditions for detecting useful signals against interference due to mechanical damage to elements of antenna-waveguide paths. The indicated improvement in detection conditions is achieved in three ways. First of all. A method for synthesizing the algorithms of a factorizable space-time detector of non-factorizable (broadband in the space-time sense) signals using multi-channel frequency filtering in each spatial channel based on the mathematical apparatus of matrix kronecker-tensor products is proposed. It is shown that the introduction of the proposed method into the practice of creating digital analog-to-digital modules will be able to provide a gain in terms of signal-to-noise of at least (8–12) dB in comparison with known devices using, for example, antenna array sublattices. Secondly, the placement of the waveguide path of adaptive digital modules of digital antenna arrays in a conductive sheath on a rubber basis capable of covering mechanical damage and preventing electromagnetic radiation from emitting through them into space. Thirdly, the use of modules of digital antenna arrays of radio engineering systems, including fifth and sixth generation digital communication systems, as an object of automatic correction of amplitude-frequency characteristics that can change when mechanical damage occurs during operation. Thus, the use of the proposed technical solutions can make it possible to increase the signal-to-noise ratio at the output of the receiving modules of digital antenna arrays in military communication systems with MIMO-OFDM technologies in local armed conflicts in comparison with known solutions.

Keywords: mobile network, fifth generation, traffic, shortwave, development, modulation, beamforming, small cells, future

Таблица 1

Эволюция мобильной связи

Поколение мобильной связи	Технологии	Скорость	Функции	Год начала использования
3G – широкополосная цифровая сотовая связь	CDMA 2000, UMTS и др.	до 3,6 Кбит/с	+ доступ в интернет	2002
4G – быстрее	LTE, WiMAX и др.	до 1 Гбит/с	+ видеостри-минг	2010
5G – еще быстрее	IMT-2020	до 20 Гбит/с	+ UltraHD и 3D-видео	2018

Вопросы развития и совершенствования цифровых систем мобильной связи являются актуальными. Поэтому особое внимание уделяется совершенствованию существующих и разработке новых поколений мобильной связи. Каждое из них в свое время явилось новым витком в развитии мобильных технологий. В настоящее время используются четыре стандарта мобильной связи (табл. 1) – стандарты первого 1G, второго 2G, третьего 3G и четвертого 4G поколений [1–3].

Четвертое поколение сотовой связи только-только набрало обороты, а ученые и разработчики телекоммуникационного оборудования уже активно приступили к работе над пятым (и даже шестым) поколением мобильной связи. В рамках Еврокомиссии начал работу консорциум METIS (Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society), координатором консорциума выступает компания Ericsson. Участники этого проекта объединены в 8 рабочих групп, главной задачей которых является интеграция усилий для достижения всемирного технологического консенсуса [1–3].

Другой проект ведется на базе английского университета The University of Surrey, проект носит название 5GIC. Целью этого проекта является разработка новых решений, связанных с существенным расширением пропускной способности сетей связи и радиочастотного спектра. Кроме вышеуказанных известны работы, координируемые компанией Intel (проект ISRA) [1].

Исследование концепции системы 5G находится в стадии разработки, но уже сегодня ясно, что создание такой системы должно осуществляться в рамках естественного развития предыдущих систем и разработки новых технологий беспроводной связи [1, 2].

По оценкам экспертов, поколение 5G должно стать ответом на вызовы будущего: значительный рост пропускной способности (более чем в 1000 раз); значительный рост скорости передачи данных (минимальная скорость 1 Гбит/с); возможность подключения к сети значительно большего

числа разнообразных конечных устройств (увеличение в 10–100 раз); резкое снижение энергопотребления устройств (до 10 раз); существенное улучшение качественных показателей оборудования и сетей [1, 2].

Для достижения этих целей потребуются: разработать новые подходы к использованию радиочастотного спектра; создать принципиально новое радиочастотное и коммутационное оборудование; реализовать новые принципы построения архитектуры и организации сетей; найти новые подходы к управлению трафиком; существенно повысить уровень «интеллектуализации» всей телекоммуникационной системы [1].

Предполагается, что потребность перехода к пятому поколению ожидается в 2020 г. [1–3].

Цель исследования: дать комплексный анализ основных технологий стандарта мобильной сети связи пятого поколения и рассмотреть перспективы их развития.

Комплексный анализ основных технологий стандарта мобильной связи пятого поколения 5G. В основу проведенного анализа положены основные результаты работ следующих специалистов в области алгоритмов обработки сигналов для систем беспроводной связи: докторов технических наук профессоров Виталия Борисовича Крейнделина [2, 4, 5] и Олега Александровича Шорина [1]; кандидатов технических наук Михаила Германовича Бакулина [2], Михаила Сергеевича Лохвицкого [1], Дениса Юрьевича Панкратова [2], Александра Степановича Сорокина [1], Антона Николаевича Степутина [3]. В том числе рассмотрен ряд интернет-ресурсов, в том числе работы [6, 7]. В своих работах профессор В.Б. Крейнделин сформулировал основные требования к системам 5G и привёл основные радиотехнологии, используемые в системах 5G: минимально гарантированная скорость передачи данных 100 Мбит/с; задержки в канале не более 1 мс; пиковая скорость передачи данных 10 Гбит/с; скорость движения абонентов 500 км/ч; в 5...15 раз эффективнее использование спектра, чем в системах 4G [2, 4, 5].

Основные радиотехнологии, используемые в системах 5G: технология MIMO с большим числом антенн (Massive MIMO); полный дуплекс; альтернативные методы множественного доступа: неортогональный множественный доступ (NOMA); множественный доступ с разреженным кодовым разделением (SCMA); новые методы модуляции и кодирования [2, 4, 5].

Технология SCMA – это развитие идеи прореживания кодовых последовательностей. Прореженность последовательностей позволяет использовать методы демодуляции, характеристики которых близки к характеристикам оптимальных методов приёма.

Неортогональный доступ позволяет работать в ситуациях, когда число абонентов больше, чем число ортогональных ресурсов.

Требования к сетям 5G определяются с помощью следующих ключевых показателей эффективности (Key Performance Indicators, KPI): пиковая скорость передачи данных 10 Гбит/с, минимальная гарантированная скорость передачи данных для одного абонента 100 Мбит/с, величина задержки в радиоканале 1 мс, скорость движения абонентов до 500 км/ч.

Кроме того, в сетях связи 5G планируется достичь увеличения в 5–15 раз эффективности использования спектра по сравнению с существующими системами 4G стандарта LTE / LTE Advanced.

Для достижения указанных выше характеристик при разработке систем 5G требуется переосмысление известных принципов работы систем связи и, возможно, разработ-

ка новых технологий формирования и обработки сигналов. Сети связи 5G должны соответствовать следующим основным общим требованиям: обеспечивать более высокую пропускную способность и более полную зону покрытия по сравнению с сетями 4G при меньшей стоимости развертывания; иметь гибкую и масштабируемую архитектуру, чтобы обеспечить удовлетворение различных потребностей абонентов; обеспечить гибкое и эффективное использование различных полос частот в различных диапазонах; обеспечивать возможность одновременной работы различных устройств в рамках межмашинного взаимодействия; обеспечивать интеллектуальную оптимизацию на основе использования информации о поведении абонентов и об оказываемых им услугах; обеспечивать реализацию концепции неограниченного доступа к информации в любом месте в любое время для всех абонентов.

Перечислим основные компоненты, определяющие физический уровень и уровень управления доступом к среде в системах связи 5G [1, 2].

Используемые полосы и диапазоны частот. В системах 5G предполагается широкое использование сантиметровых и миллиметровых волн вплоть до частот 100 ГГц. Причина для перемещения вверх по частоте – наличие гораздо более широких полос частот по сравнению с используемыми в системах 4G диапазонами частот от 1450 МГц до 6 ГГц. Однако системы 5G предполагается использовать также в диапазонах частот ниже 6 ГГц (рис. 1) [2, 6, 7].

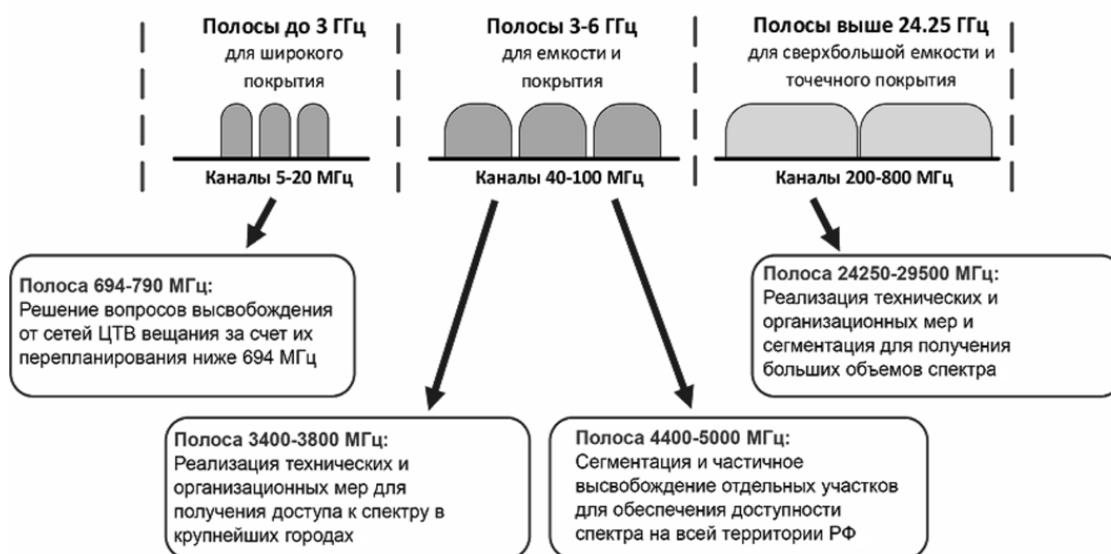


Рис. 1. Выделение новых частот для мобильной связи пятого поколения 5G в России

Форма сигналов и методы множественного доступа. По состоянию на февраль 2017 г. органы по стандартизации 3GPP и IEEE не определились с выбором между радиоинтерфейсами с одной несущей или с несколькими несущими.

Структура кадра. Выбор структуры кадра оказывает существенное влияние на задержку и на обратную совместимость с существующими технологиями, например LTE. В LTE длительность кадра была выбрана такой же, как и в системах 3G, чтобы упростить передачу обслуживания (хэндовер) между системами 4G и 3G.

Помехоустойчивое кодирование. Обеспечение очень низкой вероятности ошибки при высокой спектральной эффективности является целью разработки помехоустойчивых кодов для систем связи 5G. Среди возможных вариантов рассматриваются коды LDPC и турбокоды.

Модуляция. Известно, что от метода модуляции зависит максимально достижимая скорость передачи данных. Однако модуляция более высокой кратности (например, 64-QAM) требует более высокого отношения сигнал – шум, чем модуляция низкой кратности (т.е. BPSK или QPSK) [2]. Современные системы стандарта LTE поддерживают модуляцию 256-QAM при работе в малых сотах. В системах 5G могут использоваться методы модуляции более высокой кратности.

MIMO и формирование луча. Поскольку длина волны в сантиметровом и миллиметровом диапазонах частот становится меньше, чем длина волны в используемом в системах 4G сантиметровом диапазоне, то это позволяет использовать антенны меньших размеров. Предполагается, что в системах 5G будут использоваться антенные решетки как на стороне базовой станции, так и на стороне абонентского устройства. Планируется также использовать технологии формирования лучей диаграммы направленности, чтобы компенсировать высокие потери в тракте распространения. В диапазонах частот ниже 6 ГГц значительное увеличение пропускной способности может быть получено за счет использования многопользовательского MIMO (MU-MIMO) [5].

Режим дуплекса. При использовании сантиметрового и миллиметрового диапазонов частот целесообразно применять дуплекс с временным разделением (Time Division Duplex, TDD), поскольку в этом случае свойство взаимности характеристик канала связи может быть использовано для формирования узконаправленного луча или для других вариантов прекодирования при передаче основного трафика данных.

Краткое сравнение основ стандартов четвертого 4G и пятого 5G поколений. Одно из различий между 5G и 4G состоит в том, что низкое энергопотребление достигается адаптивностью к передаваемому трафику, когда устройства не используются или работают на низких скоростях, а затем при необходимости переключаются на более высокие скорости. Крайне высокие частоты – это не только плюсы, но и минусы, выраженные в ограниченных пределах прямой видимости между антеннами передающей и приёмной – приемным устройством. К тому же в данном диапазоне электромагнитные волны сильно затухают при передаче на дальние дистанции, так как их энергия поглощается средой, через которую они проходят. Таким образом, установка антенн в сетях пятого поколения 5G должна быть детально продумана: это будут небольшие антенны на каждом здании или мобильные ретрансляторы, чтобы обеспечивать поддержку 5G на большие расстояния. Визуально эволюция сетей мобильной связи от четвертого 4G к пятому поколению 5G мобильной связи представлена на рис. 2, иначе говоря, на данном рисунке приведены ключевые возможности сетей 5G в сравнении с возможностями LTE-A [3].

Численные значения, приведенные на рис. 2, являются целевыми показателями и могут быть изменены по результатам будущих исследований. Таким образом, ожидается что сети мобильной связи пятого поколения 5G обеспечат потребности абонентов в большей степени, чем проводные сети [2–4].

Радиотехнологии, которые предполагается использовать в системах связи 5G. В последнее время предложен ряд технологий формирования и обработки сигналов для систем 5G. Кратко перечислим основные из них.

Технология банка фильтров со многими несущими (Filter Bank Multicarrier, FBMC) и с последовательным подавлением помех (Serial Interference Cancellation, SIC). Эта технология использует для передачи информации неортогональные сигналы, разделение которых на приемной стороне осуществляется с помощью нелинейного последовательного подавления помех.

Технология MIMO с большим числом антенн (Massive MIMO). Технология Massive MIMO позволяет получить одновременно высокую спектральную эффективность и высокую энергетическую эффективность системы связи. Теоретически сигналы на линии «вниз» и на линии «вверх» различных абонентов в системе Massive MIMO почти ортогональны, что позволяет значительно снизить уровень помех между сотами и вну-

три отдельной соты [2, 3]. Следует отметить, что на пути к практическому применению в системах 5G технологии Massive MIMO имеется немало проблем. К их числу относятся проблемы синтеза алгоритмов оценки параметров канала MIMO, учета свойства взаимности канала MIMO, организации работы обратного канала и др. [2, 3, 5]. В системах 5G планируется использовать на базовой станции антенные решетки Massive MIMO, содержащие не менее 128 антенных элементов.

Полный дуплекс (Full Duplex). Полный дуплекс обеспечивает одновременную передачу и прием на одной и той же частоте. Это позволяет в два раза увеличить спектральную эффективность системы связи.

Нужно отметить, что для практической реализации полного дуплекса необходимо обеспечить подавление собственной помехи не менее чем на 120 дБ.

В качестве первого шага к применению полного дуплекса рассматривается использование адаптивного дуплекса (flexible Division Duplex, XDD), который объединяет временной дуплекс (Time Division Duplex, TDD), частотный дуплекс (Frequency Division Duplex, FDD) и полный дуплекс с учетом текущей загрузки сети.

Объединение технологий полного дуплекса и MIMO является серьезной проблемой, требующей своего решения.

Различные альтернативные методы множественного доступа. Схемы мно-

жественного доступа, которые являются наиболее фундаментальным аспектом физического уровня, рассматриваются как определяющие технические функциональные возможности каждого поколения систем сотовой связи и постоянно совершенствуются при переходе к каждому поколению сотовой связи от FDMA, TDMA в 1G и 2G к CDMA в 3G и OFDMA/SC-FDMA в 4G [1, 2].

Принимая во внимание весьма строгие требования к системам 5G (например, тысячекратное увеличение скорости передачи информации), традиционный ортогональный множественный доступ уже не является подходящим. Поэтому для достижения высоких показателей пропускной способности в системах 5G предполагается использование неортогональных схем множественного доступа. В настоящее время рассматриваются следующие варианты схем множественного доступа: множественный доступ с помощью разделения битов (Bit Division Multiplexing, BDM) [1, 2]; множественный доступ коллективного пользования (Multi User Shared Access, MUSA) [1, 2]; неортогональный множественный доступ (power domain Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) [2]; множественный доступ с разделением с помощью шаблонов (Pattern Division Multiple Access, PDMA) [1, 2]; множественный доступ с разреженным кодовым разделением (Sparse Code Multiple Access, SCMA) [1, 2].

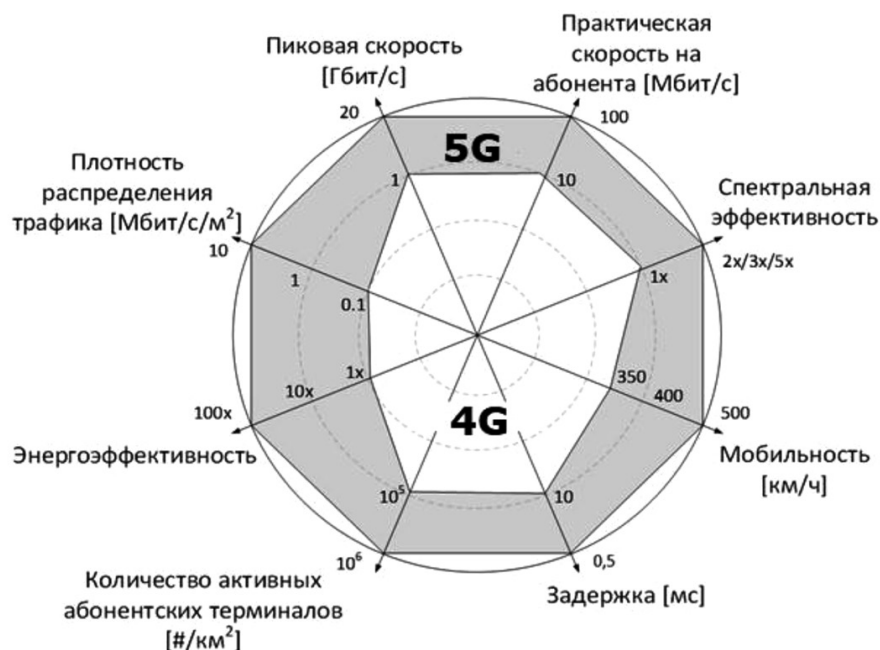


Рис. 2. Расширение ключевых показателей от LTE-A 4G до 5G

Следует также отметить, что возможны комбинации некоторых из указанных методов множественного доступа.

Разработка алгоритмов приема неортогональных сигналов, в том числе алгоритмов демодуляции и оценивания параметров канала связи в системах ММО, является сложной задачей, которая должна быть решена в процессе внедрения будущих систем 5G.

Ниже даны некоторые пояснения к схемам множественного доступа.

Технология Bit Division Multiplexing (BDM) позволяет нескольким абонентам распределять битовые ресурсы среди одного или нескольких созвездий символов.

Технология Multi User Shared Access (MUSA) основывается на известном принципе кодового разделения сигналов. С помощью расширяющих кодовых последовательностей с хорошими корреляционными свойствами и современных методов многопользовательской демодуляции технология MUSA позволяет достичь хороших характеристик системы связи, особенно при высоких коэффициентах загрузки (более 300%) [2].

Технология Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) предусматривает разделение сигналов абонентов на основе разницы их мощностей.

Технология Pattern Division Multiple Access (PDMA) основана на полной оптимизации многопользовательской системы связи, включая как передатчик, так и приемник. Эта технология позволяет увеличить в 1,5–2 раза спектральную эффективность системы связи.

Технология Sparse Code Multiple Access (SCMA) является неортогональной технологией множественного доступа на основе прореженных кодовых последовательностей и обеспечивает высокую спектральную эффективность при низкой сложности демодуляции.

Упомянутые выше альтернативные методы множественного доступа могут обеспечить следующие преимущества по сравнению с существующими методами [2, 4, 5]: повышение спектральной эффективности системы связи; высокая помехоустойчивость при больших скоростях движения абонентов; обратная совместимость с существующими технологиями OFDMA/SC-FDMA; возможность совместного использования с технологией ММО.

Нужно отметить, что существует ряд проблем, затрудняющих практическое использование упомянутых в данном разделе методов: сложность приемника, выбор распределения мощности между абонентами и др.

Основные перспективы развития в области 5G. Принципы построения систем связи 5G будут основаны на переосмыслении ряда известных фактов теории и техники связи: теории К. Шеннона, касающейся пропускной способности каналов связи; концепции построения сотовых систем Ring & Young; сигнализации и управления; антенной техники; радиоинтерфейса (включая методы модуляции и кодирования); выбора формы сигнала и разработки радиоинтерфейсов. Рассмотрим более подробно эти вопросы [2, 4, 5].

Теория К. Шеннона пропускной способности каналов связи. Классическая теория Шеннона около 60 лет определяет направления развития систем связи. Обобщение теории Шеннона на случай матричных каналов связи (т.е. каналов связи ММО), сделанное за последние 20 лет, дало дополнительный толчок развитию систем беспроводной связи.

Традиционная формула К. Шеннона предполагает, что спектральная эффективность системы связи (или пропускная способность канала связи) логарифмически зависит от отношения сигнал – шум в канале связи. Это значит, что путем даже многократного увеличения отношения сигнал – шум можно получить лишь незначительное увеличение пропускной способности. Обобщение формулы К. Шеннона на случай ММО позволило получить существенное увеличение пропускной способности.

В последнее время были обнаружены дополнительные возможности, лежащие в области поиска компромисса между спектральной эффективностью (или пропускной способностью) и энергетической эффективностью. Эти возможности основаны на том, что энергетическая эффективность системы связи определяется не только излучаемой мощностью, но и потребляемой мощностью. С уменьшением размера соты доля потребляемой мощности увеличивается, а доля излучаемой мощности уменьшается. Учет этого эффекта при разработке системы связи может дать дополнительные возможности, но он требует проведения исследований.

Нужно также отметить, что использование пространственной корреляции трафика дает возможность дополнительно оптимизировать систему связи.

Концепция построения сотовых систем Ring & Young. Концепция сотовых систем связи была предложена в 1947 г. двумя исследователями из Bell Labs, Douglas H. Ring и W. Rae Young [2]. Начиная с первого поколения стандартов систем сотовой связи (1G), эта основанная на ячейках (сотax)

структура сохранялась в каждом новом поколении стандартов, включая 4G. Проблемы, связанные с потреблением энергии, возрастающим уровнем помех, обеспечением высокой мобильности, а также с сильными изменениями уровня трафика, становятся более серьезными из-за меньшего расстояния между сотами. Таким образом, становится очевидным, что традиционное построение мобильной сотовой сети с однородными сотами не является оптимальным.

Планируется осуществлять построение сетей 5G по принципу «без сот» (No More Cells, NMC), отклоняясь от основанного на сотах покрытия, управления ресурсами и обработки сигналов. При этом для каждого абонента доступные ресурсы радиосвязи от множества базовых станций (точек доступа) могут быть использованы совместно. Чтобы уменьшить помехи, потребуются совместное использование большого количества информации о состоянии радиоканала между базовыми станциями в режиме реального времени.

Сигнализация и управление. Сигнализация и управление в существующих сетях 4G осуществляются по радиоканалу. В сетях 5G характеристики сигналов абонентов и трафика будут очень разнообразными, а среда распространения сигналов будет очень сложной. Поэтому должны быть разработаны интеллектуальные и адаптивные механизмы сигнализации и управления. Например, при низкой нагрузке должен быть использован специально приспособленный радиоинтерфейс, чтобы снизить издержки оператора связи.

Антенная техника. Сети 5G будут ориентированы на значительное повышение пропускной способности. В частности, с целью повышения пропускной способности планируется использование технологии Massive MIMO (т.е. MIMO с большим числом антенн). Технология Massive MIMO позволит значительно уменьшить помехи между сотами и помехи внутри сот, что, в свою очередь, позволит повысить спектральную эффективность и энергетическую эффективность. Рассматривается также использование Massive MIMO с нерегулярным расположением антенных элементов. Кроме того, возможно применение различных схем формирования лучей диаграммы направленности.

В рамках совершенствования антенной техники предложены технические решения адаптивных цифровых модулей антенных решёток радиотехнических систем, в том числе и систем цифровой связи пятого поколения, которые могут улучшить условия обнаружения полезных сигналов на фоне

помех при появлении механических повреждений элементов антенно-волноводных трактов [8]. Указанное улучшение условий обнаружения достигается тремя путями [9–11].

Во-первых, предложен метод синтеза алгоритмов факторизуемого пространственно-временного обнаружителя нефакторизуемых (широкополосных в пространственно-временном смысле) сигналов с использованием многоканальной частотной фильтрации в каждом пространственном канале на основе математического аппарата матричных кронекеро-тензорных произведений. Показано, что внедрение предложенного метода в практику создания цифровых аналого-цифровых модулей сможет обеспечить величину выигрыша в отношении сигнал – помеха не менее (8–12) дБ по сравнению с известными устройствами, использующими, например, подрешетки антенной системы [9].

Во-вторых, помещение волноводного тракта адаптивных цифровых модулей цифровых антенных решёток в токопроводящую оболочку на резиновой основе, способную закрывать механические повреждения и препятствовать излучению через них электромагнитной энергии в пространство (рис. 3) [10].

В-третьих, использование модулей цифровых антенных решёток радиотехнических систем, в том числе и систем цифровой связи пятого и шестого поколений, в качестве объекта автоматической коррекции амплитудно-частотных характеристик, которые могут изменяться при появлении механических повреждений в процессе эксплуатации [11].

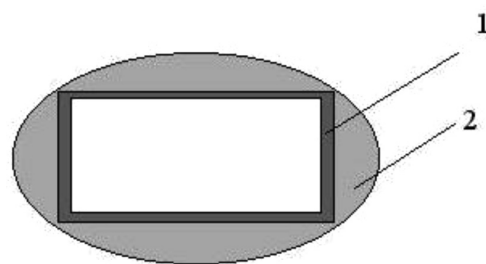


Рис. 3. Вид поперечного сечения предлагаемой конструкции элемента волноводного тракта адаптивного цифрового модуля антенной решетки: 1 – металлический волновод произвольной конфигурации; 2 – токопроводящая, эластичная оболочка, обладающая способностью затягивать образующиеся в результате осколочно-пулевого воздействия механические пробоины

Таким образом, использование предлагаемых технических решений [9–11] может

позволить повысить отношение сигнал – шум на выходе приёмных модулей цифровых антенных решёток в системах военной связи с технологиями MIMO-OFDM в условиях локальных вооружённых конфликтов в сравнении с известными решениями.

Радиоинтерфейс. Методы модуляции и кодирования. Чтобы обеспечить высокую скорость передачи данных с возможностью доступа к спектру всех абонентов, радиоинтерфейс систем 5G должен обеспечивать гибкую конфигурацию в соответствии с различными требованиями к оказанию различных услуг.

Традиционный подход, когда один радиоинтерфейс подходит во всех случаях, должен пройти фундаментальное переосмысление. Многообещающим представляется использование технологии полного дуплекса (Full Duplex) для повышения эффективности использования спектра.

Планируется широкое использование программно конфигурируемого радиоинтерфейса (Software Defined Air Interface, SDAI), позволяющего выбирать нужную конфигурацию радиоинтерфейса (включая структуру кадра, режима дуплекса формы сигналов и схемы множественного доступа, схемы модуляции и кодирования, пространственной обработки и т.д.).

Выбор формы сигнала и разработка радиоинтерфейсов. Выбор формы сигнала играет важную роль при разработке радиоинтерфейса систем связи 5G. Идеальная форма сигнала должна отвечать следующим требованиям [2]: высокая эффективность использования спектра; минимальное отношение пиковой мощности к средней мощности (Peak-To-Power Ratio, PAPR), которое позволяет получить высокий коэффициент полезного действия усилителя мощности передатчика; устойчивость к доплеровскому сдвигу частоты для обеспечения работоспособности системы связи при быстром движении абонентов; поддержка асинхронной передачи и приема.

Заключение

В настоящей работе был представлен анализ состояния работ по созданию и внедрению нового поколения мобильной связи пятого поколения. На основе проделанной работы следует, что трудно говорить о точных сроках и возможностях реализации сетей пятого поколения 5G мобильной связи, так как пока интенсивно разрабатываются соответствующие технологии и методы их внедрения. Для реализации этой перспективы потребуется решить проблему распространённости его в местах только с повышенными требованиями к присоеди-

нению сетей связи и пропуска телефонного трафика.

После появления стандартов для систем мобильной связи четвертого поколения 4G (LTE, LTE-Advanced, LTE-Advanced Pro) мировое сообщество в настоящее время разрабатывает стандарты для следующего, пятого поколения мобильной сети 5G. Запуск в коммерческую эксплуатацию новых систем связи 5G планируется в 2020 г. В настоящее время во всем мире, в том числе и в России, проводятся научные исследования, направленные на разработку новых способов формирования и обработки сигналов для систем 5G.

В рамках проводимых научных исследований, направленных на совершенствование антенной техники мобильных систем связи пятого поколения, в настоящей статье предложены технические решения адаптивных цифровых модулей антенных решёток радиотехнических систем, в том числе и систем цифровой связи пятого поколения, которые могут улучшить условия обнаружения полезных сигналов на фоне помех при появлении механических повреждений элементов антенно-волноводных трактов [8]. Указанное улучшение условий обнаружения достигается тремя путями [9–11].

Во-первых, предложен метод синтеза алгоритмов факторизуемого пространственно-временного обнаружителя нефакторизуемых (широкополосных в пространственно-временном смысле) сигналов с использованием многоканальной частотной фильтрации в каждом пространственном канале на основе математического аппарата матричных кронекерово-тензорных произведений. Показано, что внедрение предложенного метода в практику создания цифровых аналого-цифровых модулей сможет обеспечить величину выигрыша в отношении сигнал – помеха не менее (8–12) дБ по сравнению с известными устройствами, использующими, например, подрешетки антенной системы [9].

Во-вторых, помещение волноводного тракта адаптивных цифровых модулей цифровых антенных решёток в токопроводящую оболочку на резиновой основе, способную закрывать механические повреждения и препятствовать излучению через них электромагнитной энергии в пространство (рис. 3) [10].

В-третьих, использование модулей цифровых антенных решёток радиотехнических систем, в том числе и систем цифровой связи пятого и шестого поколений, в качестве объекта автоматической коррекции амплитудно-частотных характеристик, которые могут изменяться при появлении механических повреждений в процессе эксплуатации [8, 11].

Таким образом, использование предлагаемых технических решений [9–11] может позволить повысить отношение сигнал – шум на выходе приёмных модулей цифровых антенных решёток в специальных радиотехнических системах военной связи с технологиями MIMO-OFDM в условиях локальных вооружённых конфликтов в сравнении с известными решениями. Новизна предлагаемых технических решений подтверждается наличием трёх патентов [9–11] Российской Федерации на изобретения.

Результаты проводимых научных исследований в области систем мобильной связи пятого поколения обсуждаются на научно-технических конференциях, например 14 апреля 2020 г. в рамках работы конференции «Технологии разработки и отладки сложных технических систем» пройдет онлайн-сессия, на которой выступят представители ведущих компаний в области разработки беспроводных систем связи: Радио Гигабит, Promwad. В одном из докладов на тему «Разработка систем связи стандартов: 5G, Bluetooth, WI-FI, LTE» предполагается рассмотреть новейшие подходы и инструменты для разработки систем связи в соответствии со стандартами 5G, Bluetooth, Wi-Fi, LTE. Будет разобран рабочий процесс проектирования, охватывающий этапы анализа, моделирования, тестирования и аппаратной реализации систем и устройств беспроводной связи. В докладе также будут приведены примеры применения подобного рабочего процесса ведущими телекоммуникационными компаниями мира [12].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предложение к внедрению стандартов пятого поколения 5G возможно уже через несколько лет не только в гражданских, но и в военных телекоммуникационных системах. Недооценка необходимости работы в этом направлении может поставить под угрозу не только научную и экономическую сферы, но и информационную безопасность нашей страны.

Список литературы

1. Лохвицкий М.С., Сорокин А.С., Шорин О.А. Мобильная связь: стандарты, структуры, алгоритмы, планирование. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 264 с.
2. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Технологии в системах радиосвязи на пути к 5G. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 280 с.
3. Степутин А.Н., Николаев А.Д. Мобильная связь на пути к 6G. В 2 т. Москва–Вологда: Инфра-Инженерия, 2017. Т. 1. 380 с. Т. 2. 416 с.
4. Бакулин М.Г., Крейнделин М.Г., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2017. 352 с.
5. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология MIMO: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 242 с.
6. Системы связи 5G: новый физический уровень; большие антенные решётки; миллиметровые волны. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <http://exponenta.ru/5g> (дата обращения: 10.04.2020).
7. 5G в России: перспективы, подходы к развитию стандарта и сетей. Обзор исследования, май 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pwc.ru/ru/assets/5g-research.pdf> (дата обращения: 10.04.2020).
8. Гурский С.М. Математические модели элементов антенно-волноводных трактов радиолокационных систем с повреждениями // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 2. С. 43–46. DOI: 10.17513/snt.37406.
9. Гелесев А.И., Гурский С.М., Егоров Б.М., Панов С.Л., Сапрыкин С.Д., Ювченко И.В. Аналого-цифровой модуль // Патент РФ на изобретение № RU 2146076 С1. Патентообладатель Московское высшее училище радиозлектроники ПВО. 2000. Бюл. № 6. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/author_items.asp?authorid=658644 (дата обращения: 10.04.2020).
10. Гурский С.М., Тимофеев Г.С., Гелесев А.И., Гуштин А.И., Никишин В.Н., Филиппов О.Г. Гибкий волновод // Патент РФ № 2121735. Патентообладатель Московское высшее училище радиозлектроники ПВО. 1998. Бюл. № 31 (II часть). [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/author_items.asp?authorid=658644 (дата обращения: 10.04.2020).
11. Гурский С.М. Автоматический корректор амплитудно-частотной характеристики // Патент РФ 2248650. Патентообладатель Гурский Сергей Михайлович. 2005. Бюл. № 8. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/author_items.asp?authorid=658644 (дата обращения: 10.04.2020).
12. Усс М. Разработка систем связи стандартов: 5G, Bluetooth, WI-FI, LTE. Доклад на онлайн-сессии 4: Системы связи, запланирован к проведению в рамках конференции «Технологии разработки и отладки сложных технических систем». 14 апреля 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://exponenta.ru/events/session-communication> (дата обращения: 10.04.2020).