

Ключевые технологии радиодоступа сетей 5G

и проблемы их тестирования

Компании, работающие в сфере беспроводной связи, тесно сотрудничают с учеными в исследованиях ключевых технологий, позволяющих перейти к системам связи пятого поколения. В этой статье обсуждены движущие силы технологии 5G, а также то, что делает ее революционной по сравнению с предыдущими поколениями радиосвязи. Описаны основные технологии, отличающие сети 5G от предыдущих систем. С учетом этих системных изменений и технологических новшеств рассмотрены новые методы измерений и тестирования. Предложены несколько идей, способных помочь разрешить контрольно-измерительные проблемы в системах 5G, и проиллюстрированы тремя примерами.

Хонгвей Конг (Hongwei Kong)
Hong-wei_kong@keysight.com

Пятое поколение (5G) систем беспроводной связи можно представить в виде набора коммуникационных технологий, которые будут использоваться в сетях общего пользования, начиная примерно с 2020 г. Развитие сетей 5G стимулируется значительным ростом требований, предъявляемых к мобильной связи. Диапазон этих требований простирается от реализации необходимой скорости передачи данных до обеспечения нужного числа подключений, эффективного использования спектра и экономного расхода энергии, малых задержек, а также хорошего приема, гарантируемого пользователю [1]. Данные требования влекут за собой радикальные изменения сетей, устройств и компонентов. В общем, 5G — это революция, а не эволюция.

Чтобы достичь ключевых характеристик, ожидаемых от сетей 5G, потребуется фундаментально обновить сетевое и абонентское оборудование. Ниже перечислены основные изменения в 5G, позволяющие добиться поставленных целей.

Новая архитектура сети

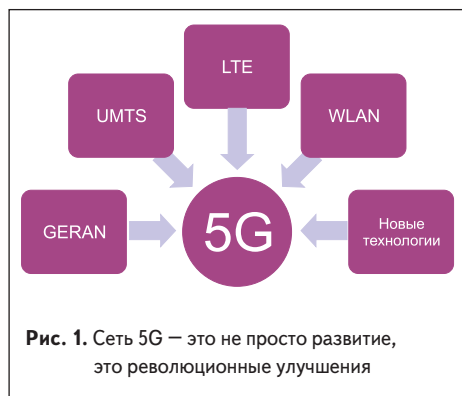
Сеть 5G нацелена на поддержку в 1000 раз более интенсивного обмена данными. Один из способов достижения таких скоростей заключается в повышении плотности размещения базовых станций. Однако для эффективной поддержки мобильности и расширения покрытия придется наряду с малыми сотами, обеспечивающими высокую плотность сети, использовать и макросотовые базовые станции. В результате этого сеть приобретает многоуровневую структуру. Сети 5G ориентированы на то, чтобы гарантированно предоставлять поль-

зователю хороший прием в любом месте, а это значит, что на границах соты не должны ухудшаться характеристики, как это наблюдается сейчас из-за взаимных пограничных помех. Таким образом, архитектура сети будет переходить от традиционной сотовой к многослойной [2].

Новый радиointерфейс

Предполагается, что к сетям 5G будут подключаться не только абонентские устройства и терминалы, но и машины, способные обмениваться информацией. К сети будет подключено больше машин, абонентских устройств. Между тем взаимодействие между машинами (M2M) зачастую бывает спорадическим, с небольшим трафиком и т. п. Существующие сейчас сотовые сети поддерживают одновременное подключение нескольких абонентов путем передачи специальных сигналов между пользователем и базовой станцией. Это обеспечивает синхронизацию сигналов, передаваемых пользователями в сторону базовой станции. Также осуществляется установленное распределение ресурсов, выделяемых каждому из абонентов. Для спорадического, небольшого по объему трафика, типичного для взаимодействия M2M, сигнализация для установки синхронизации и процесс распределения ресурсов могут приводить к слишком большому накладным расходам, а также трудно установить их зависимость от количества поддерживаемых машин. В результате в сетях 5G будут сосуществовать всевозможные приложения с очень разными требованиями к их качеству, что порождает необходимость в новом радиointерфейсе, эффективно поддерживающем предъявляемые требования [3].

Новая конструкция терминалов



В сети 5G-терминал поддерживает несколько технологий радиодоступа (ТРД), например 3G/4G/5G, 802.11n или 11ac и т. п. (рис. 1). Поэтому устройства должны быть совершеннее, чем сейчас, чтобы суметь решить, какую из ТРД использовать для достижения нужной производительности и снижения потребляемой мощности. Чтобы терминал быстрее среагировал, нужно повысить точность определения местоположения. Информация о местоположении будет учитываться при принятии решения о том, к какой ТРД подключаться и т. п. В сетях 5G-устройства смогут взаимодействовать непосредственно между собой (D2D), не используя для передачи данных базовую станцию. Поддержка большего числа ТРД, расширенные функции определения местоположения и D2D приведут к тому, что терминалы станут сложнее и потребуют более интегрированной системы на кристалле (SoC) с применением улучшенных технологий управления потребляемой мощностью [4, 12].

Новые метрики для оптимизации сети, а также новые метрики для оценки восприятия пользователем

Для оптимизации сетей 5G будут применяться новые метрики, которые окажут серьезное влияние на их структуру. Во-первых, эти новые метрики обеспечат гарантированную скорость передачи данных в любом месте, что приведет к пересмотру сотовой архитектуры. Во-вторых, увеличится число устройств, поддерживаемых в данной области. В-третьих, будет эффективнее использоваться энергия. В-четвертых, задержки между конечными точками станут миллисекундными и т. п. Пользователи сетей 5G получат новое, недоступное прежде качество услуг, например чрезвычайно малые задержки, гарантированное качество связи в любом месте для каждого абонента, продолжительное время работы от аккумулятора и т. п. [1].

Новые модели ведения бизнеса и новые приложения

С появлением технологий и сетей 5G (рис. 2) могут возникнуть и новые модели ведения бизнеса. Например, благодаря малым задержкам и гарантированно высокой скорости беспроводного соединения операторы смогут сдавать беспроводные каналы в аренду коммерческим организациям. Кроме того, технология D2D

будет способствовать возникновению новой модели ведения бизнеса, в которой оператор и пользователи смогут совместно обеспечивать высокое качество локального обмена данными. Для сетей 5G можно предоставить множество новых приложений, например беспроводное дистанционное управление станками, расширенную виртуальную реальность через сеть 5G, приложения D2D, M2M и т. п. [6].

Новые ключевые технологии для поддержки основных изменений в сетях радиодоступа 5G

Новая архитектура сети

Недавние исследования [7] показали, что многоуровневая архитектура сети вполне отвечает требованиям 5G. Многоуровневая сеть имеет два уровня: уровень базовой станции макросоты, который используется для поддержания мобильности и покрытия, и уровень малых сот высокой плотности в той же макросоте. Оба они обеспечивают высокоскоростной доступ пользователей. Многоуровневая архитектура сети должна разрешить проблемы помех. Для этого предлагается использовать обработку сигналов сверхбольших систем MIMO с предварительным кодированием, технологию mmWave для малых сот высокой плотности, координацию и подавление помех и т. п. Для поддержки многоуровневой архитектуры сети и эффективного применения упомянутых выше технологий потребуются инфраструктура централизованной обработки модулирующих сигналов. В настоящее время широко обсуждается применение с этой целью концепции CRAN (централизованной сети радиодоступа или облачной сети радиодоступа) [8].

Сверхбольшая система MIMO

Сверхбольшая система MIMO является одной из ключевых технологий в сетях 5G. Она применяется и в многоуровневой архитектуре сети, и в базовых станциях макросот. Благодаря огромному числу антенн базовой станции

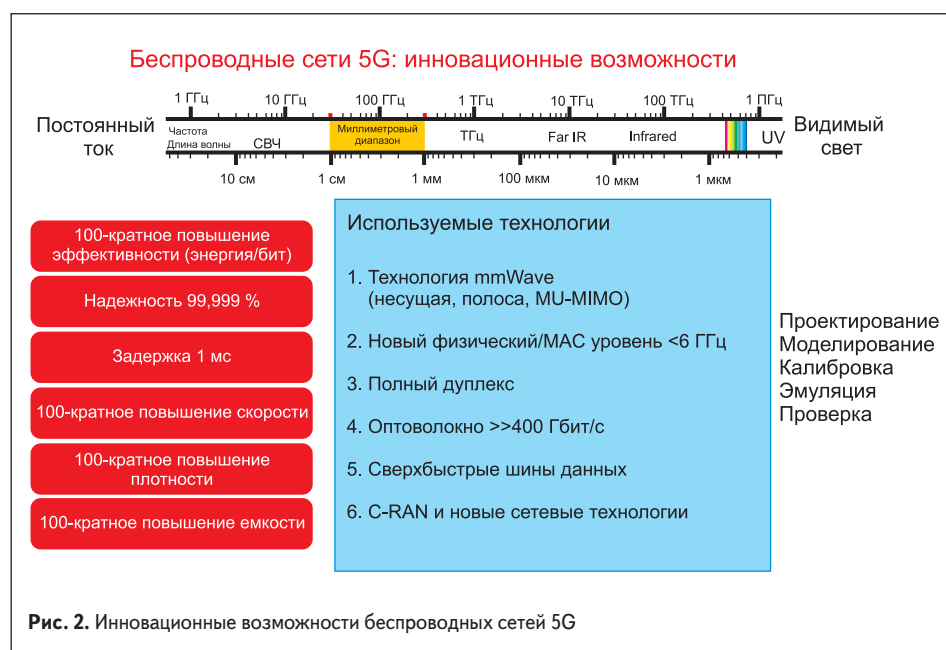
макросоты, а также обработке сигналов сверхбольшой системы MIMO, при благоприятном состоянии канала несколько пользователей могут, не мешая друг другу, одновременно использовать одни и те же частотные ресурсы [9]. Применение в многоуровневой архитектуре обработки сигналов сверхбольшой системы MIMO и технологии предварительного кодирования позволяет значительно снизить взаимные помехи базовых станций. Таким образом, сверхбольшая система MIMO может существенно улучшить эффективность использования как спектра, так и энергии.

Широкополосная связь в миллиметровом диапазоне

В миллиметровом диапазоне достаточно много свободного спектра для широкополосных приложений, которые весьма привлекательны для высокоскоростного доступа 5G. Недавние исследования [5] доказали, что, используя миллиметровые волны с управляемой узконаправленной антенной, можно решить проблему большого затухания в миллиметровом диапазоне. Было проведено множество исследований для изучения параметров распространения волн в миллиметровом диапазоне применительно к проектированию систем 5G.

Полный дуплекс

Все существующие сети 2G/3G/4G используют полудуплексную передачу из-за сильных помех передатчика, воздействующих на собственный приемник. Исследователи ищут способ, позволяющий применять в сетях 5G полнодуплексную передачу с применением технологий подавления собственных помех [11]. Полный дуплекс может повысить эффективность использования спектра и упростить его перераспределение. Он особенно привлекателен для решения проблемы транзитных соединений в малых сотах высокой плотности для многоуровневой архитектуры. Кроме того, подавление собственных помех способно существенно упростить конструкцию многополосных трансиверов.



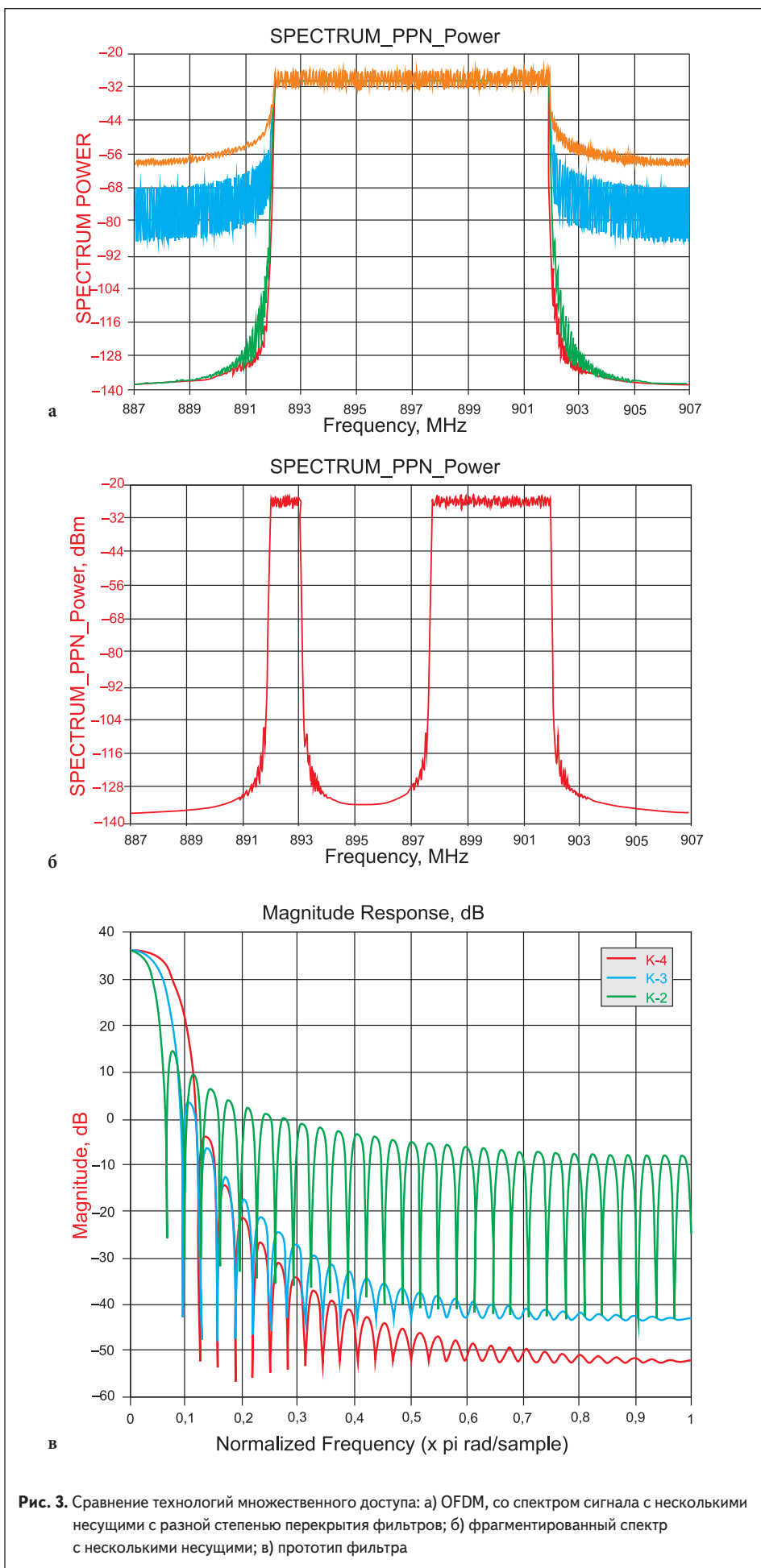


Рис. 3. Сравнение технологий множественного доступа: а) OFDM, со спектром сигнала с несколькими несущими с разной степенью перекрытия фильтров; б) фрагментированный спектр с несколькими несущими; в) прототип фильтра

Асинхронный множественный доступ

Как уже было отмечено, сети 5G должны поддерживать большое число машин, обменивающихся информацией по принципу M2M. Технология асинхронного множественного доступа [3] является ключом к эффективной поддержке взаимодействия M2M, поскольку не требует точной синхронизации. Это устраняет потребность в сигнализации, необходимой для хорошей синхронизации (рис. 3). В настоящее время исследуется множество таких технологий, к примеру, несколько несущих на основе банка фильтров (FBMC), неортогональный множественный доступ (NOMA) и т. п. Эти технологии асинхронного множественного доступа имеют и еще одно преимущество — они естественным образом поддерживают передачу сигнала в нескольких диапазонах.

Высокоскоростной радиодоступ высокой плотности

с использованием оптоволокну

Для сетей 5G существует огромный выбор радиоголовок, подключаемых оптическим кабелем к пулу обработки модулирующих сигналов [8]. Сверхбольшая система MIMO в совокупности с плотной сетью малых сот требует передачи большого объема данных I/Q между пулом модулирующих сигналов и радиоголовками. Например, для сверхбольшой антенной решетки MIMO из 128 антенн с полосой частот 500 МГц потребуется скорость передачи 256 Гбит/с, что, в свою очередь, потребует применения высокоскоростного соединения через оптический кабель.

Контрольно-измерительные проблемы

Ключевые технологии для сетей радиодоступа 5G порождают серьезные проблемы, связанные с измерениями и тестированием. Ниже будут рассмотрены некоторые из них.

Новая архитектура сети

Новая многоуровневая архитектура сети порождает серьезные проблемы, связанные с измерениями и тестированием. Во-первых, нужно измерить, насколько эффективно многоуровневая сеть поддерживает пользователя с точки зрения мобильности, зоны покрытия, производительности, задержки и т. п., что весьма проблематично. Во-вторых, необходимо оценить работу многоуровневой сети при подключении нескольких пользователей. Еще одна важная задача — определение и выполнение теста с максимальной нагрузкой для нескольких пользователей. В-третьих, для новой сетевой архитектуры важно разобраться с такой проблемой, как помехи. Да и тестирование работы сети вызывает немалые затруднения. Для многоуровневых сетей требуются контрольно-измерительные решения, помогающие выявлять и устранять проблемы, связанные с производительностью, также являющиеся очень сложными. И поскольку сети 5G еще долго будут сосуществовать с другими сетями, то возникает еще одна проблема, обусловленная необходимостью проверки совместной работы разных технологий радиодоступа.

Сверхбольшая система MIMO

Сверхбольшая MIMO является сложной системой, осуществляющей обработку модулирующего сигнала, которая включает в себя многоканальные радиоинтерфейсы, сверхбольшую антенную решетку MIMO и т. п. Ее производительность определяется всеми этими компонентами, что вызывает ряд проблем. Во-первых, каждый из этих компонентов требует соответствующего контрольно-измерительного решения. К тому же разные компоненты имеют различные контрольные интерфейсы. Во-вторых, для оценки системных характеристик, охватывающей все компоненты, необходимо выполнять также тест через радиоинтерфейс. Причем с учетом размера антенной решетки и требований к исследованию такого рода подобный тест получается достаточно сложным. В-третьих, для оценки производительности в тесте сверхбольшой системы MIMO нужно знать параметры канала. Эффективное моделирование и эмуляция параметров канала этой системы также весьма и весьма проблематичны. Сверхбольшие системы MIMO по своей природе являются многопользовательскими. Это порождает дополнительные трудности, связанные с измерением многопользовательских характеристик. Все контрольно-измерительные решения для сверхбольших систем MIMO сталкиваются со сложностью масштабирования до нужного числа каналов и с проблемой определения общей стоимости измерительной системы.

Широкополосная связь в миллиметровом диапазоне

Применение широкополосной связи в миллиметровом диапазоне порождает множество метрологических проблем. Во-первых, параметры широкополосного канала такого диапазона до сих пор не вполне ясны. Чтобы проектировать коммуникационные системы миллиметрового диапазона 5G с несколькими антеннами, нужно измерять параметры канала миллиметрового диапазона. Это требует широкополосного решения для первичного преобразования сигналов и измерения MIMO, охватывающего широкий диапазон частот с большим измерительным диапазоном и поддержкой непрерывных измерений в течение длительного времени. Во-вторых, широкополосная связь в миллиметровом диапазоне порождает серьезные затруднения, связанные с обеспечением необходимых характеристик контрольно-измерительного оборудования. Генераторы и анализаторы сигналов должны иметь полосу пропускания от 500 МГц до нескольких гигагерц. Для измерения характеристик широкополосных усилителей миллиметрового диапазона и их линеаризации приборы должны обладать втрое более широкой полосой для захвата продуктов интермодуляции, что является очень большой проблемой. В-третьих, развитие технологии КМОП делает возможной реализацию систем миллиметрового диапазона на одном кристалле. Однако из-за разброса параметров технологического процесса и других факторов процент выхода годных

изделий получается очень низким. Чтобы компенсировать этот разброс и устранить другие причины снижения процента выхода годных изделий, применяются специальные адаптивные схемы, например самокорректирующиеся системы [10]. Однако в настоящее время контрольно-измерительные решения для таких адаптивных систем еще не разработаны. А поскольку к характеристикам контрольно-измерительного оборудования для тестирования компонентов и систем миллиметрового диапазона предъявляются повышенные требования, идет активный поиск недорогих решений этой задачи, потому что имеющееся оборудование дешевым не назовешь.

Полный дуплекс

Полный дуплекс предъявляет строгие требования к параметрам подавления собственных помех. В зависимости от мощности передатчика может потребоваться подавление помех на 110 дБ и более. Обычно это достигается путем трехэтапного подавления: в антенно-фидерном тракте, в ВЧ-тракте и в тракте модулирующего сигнала. Для точного подавления полнодуплексные системы должны оценивать уровень собственных помех. Одна из проблем здесь заключается в том, что собственные помехи могут возникать в результате взаимодействия устройства с окружающей средой, характер которого может динамически изменяться. Регистрация и эмуляция динамического поведения устройства в реальных условиях являются очень сложными проблемами полнодуплексного тестирования. Еще одна проблема — обеспечение воспроизводимости параметров антенн, ВЧ-тракта и тракта модулирующего сигнала от модели к модели. Поскольку полнодуплексная система является адаптивной, возникает проблема, связанная с определением теста для наихудших усло-

вий и созданием решения для выполнения такого теста, которое гарантировало бы, что полнодуплексная система отвечает требованиям к характеристикам во всех заданных сценариях.

Асинхронный множественный доступ

Для тестирования асинхронного множественного доступа необходимы функции генерации и анализа сигналов. Однако в настоящее время такой доступ еще не стандартизован. Поэтому одной из метрологических проблем является эффективная поддержка и анализ сигналов специализированных систем асинхронного множественного доступа.

Высокоскоростной доступ по оптоволокну к радиоголовкам

Для подключения пула обработки модулирующего сигнала к радиоголовкам должен использоваться высокоскоростной доступ высокой плотности по оптоволокну, и потому его тестирование становится очень важным для обеспечения работоспособности систем 5G. Первой метрологической проблемой в этом случае является контрольно-измерительное решение для высокоскоростной комплексной оптической модуляции, которое позволяло бы оценить состояние высокоскоростного оптического канала и оптического волокна. Вторая метрологическая проблема заключается в измерении радиосигналов на оптическом интерфейсе высокой плотности, которое позволило бы оценить качество калибровки радиосигналов на разных оптических интерфейсах. Третья проблема состоит в том, что для измерения параметров радиоголовок и трактов модулирующего сигнала необходимо оснастить генераторы и анализаторы сигналов оптическими интерфейсами. В настоящее время оптический интерфейс радиоголовок имеет несколько стандартов, и разные производители



сетевого оборудования используют собственные расширения оптического интерфейса, что сильно усложняет определение стандартного интерфейса для контроля и измерений.

Решение контрольно-измерительных проблем 5G

Ранее мы обсудили контрольно-измерительные проблемы, касающиеся ключевых технологий радиодоступа 5G. Мы полагаем, что для их эффективного решения очень важны следующие подходы. Во-первых, для решения контрольно-измерительных проблем 5G нужно выгодно использовать метрологический опыт, накопленный в разных областях. Например, для решения проблем, возникающих в системах 5G, очень важны опыт и знания в области оптических сигналов, РЛС, радиосвязи, ИС и в работе с сигналами ВЧ и СВЧ. Во-вторых, нужно расширить существующие решения так, чтобы они охватывали новые сценарии применения и решали новые проблемы, связанные с этими сценариями. В-третьих, если существующее решение не работает и не может легко адаптироваться к новым сценариям, необходимо внедрять новые инновационные контрольно-измерительные методы.

Измерение характеристик сверхбольших систем MIMO

Тестирование сверхбольших систем MIMO требует поддержки множества контрольных точек с разными интерфейсами, а также наличия знаний и опыта в разных областях, таких как фазированные антенные решетки, сверхбольшие MIMO, тестирование через радиointерфейс и т. п.

Первичное преобразование сигналов канала миллиметрового диапазона

Для первичного преобразования сигналов канала миллиметрового диапазона можно применять те же методы, что и для канала MIMO, если это удовлетворит требования миллиметрового диапазона. Поэтому для получения таких сигналов мы используем приборы

миллиметрового диапазона с алгоритмами первичного преобразования для канала MIMO. Требования к потоковой передаче данных для первичного преобразования сигналов канала миллиметрового диапазона значительно выше, но это решается предварительной обработкой в режиме реального времени.

Измерение характеристик радиointерфейса сверхбольшей системы MIMO

Совершенно ясно, что существующие решения для тестирования радиointерфейсов не подходят для сверхбольших систем MIMO с точки зрения масштабируемости, скорости измерений и затрат. Поэтому для решения такой задачи нужны совершенно другие методы измерения.

Заключение

В данной статье рассмотрены движущие силы технологии 5G и то, что делает ее революционной по сравнению с предыдущими поколениями мобильной связи. Обсуждены ключевые технологии, позволяющие осуществить такие изменения. А также были представлены идеи о том, как можно разрешить проблемы измерений и тестирования оборудования 5G, и проиллюстрированы тремя примерами. ■

Автор выражает благодарность Бобу Калтеру (Bob Culter), Роджеру Николасу (Roger Nicholas) и Херве Оудину (Herve Oudin) за ценные рекомендации, позволившие повысить качество этой статьи.

Литература

1. IMT-2020, Общие сведения и требования к системам 5G, 2014. www.imt-2020.cn/en/documents/download/15
2. Хойдис Дж. Сверхбольшая система MIMO и HetNets: достоинства и проблемы // IMSS Communication Magazine, 2013.
3. 5GNOW: неортогональные асинхронные сигналы для будущих мобильных приложений / Г. Вундер и др. // IEEE Communication Magazine. 2014, февраль.

4. Сети и устройства для эры 5G / Б. Бангертер, С. Талвар, Р. Арефи и К. Стюарт // IEEE Communication Magazine. 2014, февраль.
5. Формирование диаграммы направленности в миллиметровом диапазоне как ключевая технология сотовой связи 5G: теоретическая осуществимость и результаты испытаний прототипа / У. Рох, Дж. Сеол, Дж. Парк и др. // IEEE Communication Magazine. 2014, февраль.
6. Сценарии для мобильной и беспроводной связи 5G: представление проекта METIS / А. Оссейран, Ф. Боккарди, В. Браун и др. (www.metis2020.com/wp-content/uploads/publications/IEEEComMag_Osseiran_et_al_METIS_overview_scenarios_201405.pdf)
7. Мудрое применение дополнительных антенн: сверхбольшая система MIMO, малые соты и TDD / Дж. Хойдис, К. Хоссейни, С. Т. Бринк и М. Дебба // Bell Labs Technical Journal. 2013.
8. К зеленому и гибкому: перспективы 5G / К.-Л. И, К. Роувелл, С. Хан, З. Ксу, Г. Ли, З. Пан // IEEE Communication Magazine. 2014, февраль.
9. Сверхбольшая система MIMO для радиосистем следующего поколения / Е. Ларссон, О. Эдфорс, Ф. Туфвессон, Т. Л. Марпзетта // IEEE Communication Magazine. 2014, февраль.
10. Лин Дж. Я., Беренгуер Р., Чанг М. Ф. Самокорректирующийся усилитель миллиметрового диапазона с адаптивной линеаризацией амплитуды и фазы, выполненный по технологии КМОП 65 нм // IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, Т. 60. 2012, № 5.
11. Подавление собственных помех в системах 5G и последующих / С. Хонг, Дж. Бранд, Дж. И. Чой и др. // IEEE Communication Magazine. 2014, февраль.
12. Техрани М. Н., Юсал М., Яникомроглу Х. Связь между устройствами в сотовых сетях 5G: проблемы, решения и будущие направления // IEEE Communication Magazine. 2014, февраль.