

# Пять прорывных технологий 5G.

## Часть 1. Архитектура, частотные диапазоны, MIMO

Новые направления исследований приводят к фундаментальным изменениям в дизайне будущих сотовых сетей пятого поколения (5G). В статье описаны пять технологий, которые могут привести как к архитектурным, так и к компонентным прорывным изменениям: устройство-ориентированная (device-centric) архитектура, миллиметровые диапазоны волн, массивы антенн MIMO, интеллектуальные устройства, а также встроенная поддержка M2M-коммуникаций. Рассматриваются ключевые идеи для каждой технологии наряду с их потенциальным воздействием на 5G, а также исследуются проблемы, от которых пока не уйти.

**Федерико Боккарди**  
(Federico Boccardi)

federico.boccardi@vodafone.com

**Роберт Хелт-мл.**  
(Robert W. Heath Jr.)

rheath@utexas.edu

**Анхель Лозано (Angel Lozano)**  
angel.lozano@upf.edu

**Томас Марцетта**  
(Thomas L. Marzetta)

tim@research.bell-labs.com

**Петар Поповски (Petar Popovski)**  
petarp@es.aau.dk

Перевод: Алексей Осотов

### Введение

Будет ли 5G только эволюцией 4G, или новейшие технологии приведут к потрясениям, которые потребуют массового переосмысления укоренившихся принципов мобильных сетей?

Мы рассматриваем влияние новых технологий, используя модель Хендерсона — Кларка (модель классификации инноваций. — *Прим. перев.*), следующим образом (рис. 1):

- Эволюция дизайна. Незначительные изменения как узлового, так и архитектурного уровней (например, введение классификаторов и сигнализации, поддержка большего числа антенн).
- Компонентные изменения. Прорывные изменения в дизайне класса сетевых узлов (например, введение новых волновых форм).
- Архитектурные изменения. Прорывные изменения в системной архитектуре (например,

введение новых типов узлов или введение новых функций в уже существующие).

- Радикальные изменения. Прорывные изменения, оказывающие влияние на узлы и уровни архитектуры.

Ориентир на прорывные (компонентные, архитектурные, радикальные) технологии обусловлен, по нашему убеждению, чрезвычайно высокой совокупной скоростью передачи данных и низкой задержкой, требующихся для 5G, что не может быть достигнуто лишь простой эволюцией статус-кво. Кратко поясним, о каких именно пяти прорывных технологиях повествуется в статье.

### Устройство-ориентированная архитектура

Архитектура, ориентированная на базовые станции (БС) сотовых систем, может измениться в 5G. Возможно, пришло время пересмотреть



Рис. 1. Прорывные технологии 5G, классифицированные в соответствии с моделью Хендерсона — Кларка

концепции восходящей и нисходящей линий связи, а также контрольных каналов и каналов данных, для улучшения путей прохождения информации с разным приоритетом и целями в сторону (использования) различных узловых устройств (наборов узлов) внутри сети.

**Миллиметровые диапазоны**

Хотя спектры испытывают дефицит на сверхвысоких (микроволновых) частотах, есть еще достаточно много свободного места в областях миллиметровых волн. Это спектральное «Эльдорадо» привело к «золотой лихорадке»: сейчас исследователи из различных областей активно изучают разные аспекты передачи миллиметровых волн. Будучи далеко не полностью изученными, такие технологии уже стандартизированы для сервисов малой дальности (стандарт IEEE 802.11 AD), а также развернуты для нишевых приложений, таких как транспортные сети связи посредством «малых сот».

**Массивы MIMO**

Массивы MIMO<sup>1</sup> (Multiple-Input/Multiple-Output) предполагают использование большого количества антенн для мультиплицирования сообщений на несколько устройств в каждом частотно-временном источнике, когда излучаемая энергия фокусируется в сторону предполагаемого направления при минимизации интерференции. Массивы MIMO могут потребовать серьезных изменений в архитектуре, в особенности в дизайне макробазовых станций (Macro Base Station, MBS), а также могут привести к появлению новых типов развертывания.

**Интеллектуальные устройства**

Сотовые сети 2G/3G/4G строились исходя из предполагаемого полного контроля над инфраструктурой. Мы утверждаем, что проектировщикам систем 5G стоит отбросить этот постулат и использовать интеллект устройств в рамках различных уровней стекового протокола, например позволяя устройствам подключаться по интерфейсу D2D (Device-to-Device) или использовать мобильное смарт-кэширование. Хотя эта философия дизайна требует, в основном, изменений на уровне узлов (компонентные изменения), это также скажется и на архитектурном уровне.

**Встроенная поддержка M2M-взаимодействия**

Встроенное включение M2M-взаимодействия в 5G предполагает удовлетворение трех принципиально различных требований, связанных с разными классами низкоскоростных сервисов передачи данных: поддержку большого количества низкоскоростных устройств, обеспечение минимальной скорости передачи данных практически в любых условиях и очень малую задержку передачи данных. Удовлетворение этих требований в 5G требует новых методов и идей как на компонентном, так и на архитектурном уровнях.

В первой части статьи мы подробно рассмотрим архитектуру, частотные диапазоны и массивы MIMO. Вторая часть будет посвящена интеллектуальным устройствам и встроенной поддержке M2M-коммуникаций.

**Устройство-ориентированная архитектура**

Сотовый дизайн исторически основывался на аксиоматической роли «сот» в качестве основных единиц сети радиодоступа. При таком конструктивном постулате сервис устройству предоставляется путем установления нисходящей и восходящей линий связи (Downlink/Uplink, DL/UL), несущих контрольный трафик и трафик данных, через БС, сообщающую сотам, где именно расположено устройство. Последние несколько лет различные тенденции указывают на нарушения этой «ячейко-ориентированной» структуры:

- Плотность размещения БС быстро растет, что обусловлено ростом гетерогенных сетей. Хотя уже при их наличии была стандартизирована 4G, но эта архитектура изначально не была предназначена для такой поддержки. Уплотнение сетей может потребовать некоторых серьезных изменений в 5G. Развертывание БС со значительно различающимися передающими мощностями и зонами покрытия вызывает, например, необходимость разделения нисходящей и восходящей линий связи таким образом, чтобы соответствующей информации проходить через различные узловые станции [5].

- Потребность в дополнительном спектре неизбежно приводит к сосуществованию частотных диапазонов с кардинально различными характеристиками распространения в рамках одной и той же системы. В этом контексте предлагается концепция фантомных ячеек (cot), когда уровни данных и контроля разделяются: контрольная информация отправляется на высокоомощные узлы на микроволновой частоте, а полезные данные передаются на маломощные узлы на частотах миллиметровых волн [6].
- Новая концепция, называемая «централизованной базовой полосой» (centralized baseband), связана с понятием облачных сетей радиодоступа и применима там, где виртуализация приводит к разделению между узлами и оборудованием, управляющим обработкой этих узлов [7]. Аппаратное обеспечение, например, может динамически выделяться в пуле различных узлов в зависимости от показателей, определенных оператором.
- Новые классы сервисов могут потребовать полного пересмотра архитектуры. Текущие работы, если взглянуть на дизайн архитектуры, ранжируются от централизации или частичной централизации (например, посредством агрегаторов) до полного распределения (например, с помощью сжатого зондирования и/или многоскачковым образом (multihop — «передача с переприемом»)).
- Парадигмы совместных коммуникаций, таких как совместные многоточечная (Cooperative Multipoint, CoMP) или ретрансляционная, которые, хотя и потерпели неудачу, несмотря на первоначальный ажиотаж, тем не менее достаточно выгодны и могут потребовать пересмотра функций различных узлов [8]. В контексте ретрансляции, к примеру, последние разработки в беспроводном сетевом кодировании предполагают такие принципы передачи, которые дают возможность восстановления некоторых потерь, связанных с полудуплексной ретрансляцией [9]. Кроме того, недавние исследования указывают на вероятность использования полнодуплексных узловых точек для коммуникации малой дальности уже в не столь отдаленном будущем.
- Использование интеллектуальных устройств может повлиять и на сети радиодоступа. В частности, и интерфейс D2D, и «умное» кэширование (смарт-кэширование) вызывают переосмысление всей архитектуры, когда центр притяжения перемещается от ядра сети к ее периферии (устройства, локальные беспроводные прокси, ретрансляторы).

Базируясь на этих тенденциях, мы считаем, что «ячейко-ориентированная» архитектура (архитектура, ориентированная на соты) должна трансформироваться в устройство-центричную: любые носимые (человеком или машиной) устройства должны иметь возможность коммуницировать, обмениваясь при этом разнообразными информационными потоками посредством нескольких возможных устройств (приемников) в гетерогенных узловых точках. Иными словами, совокупность сетевых узлов, обеспечивающих возможность подключения к данному устройству, а также функции этих узловых точек при определенном сеансе связи должны быть адаптированы к конкретному устройству

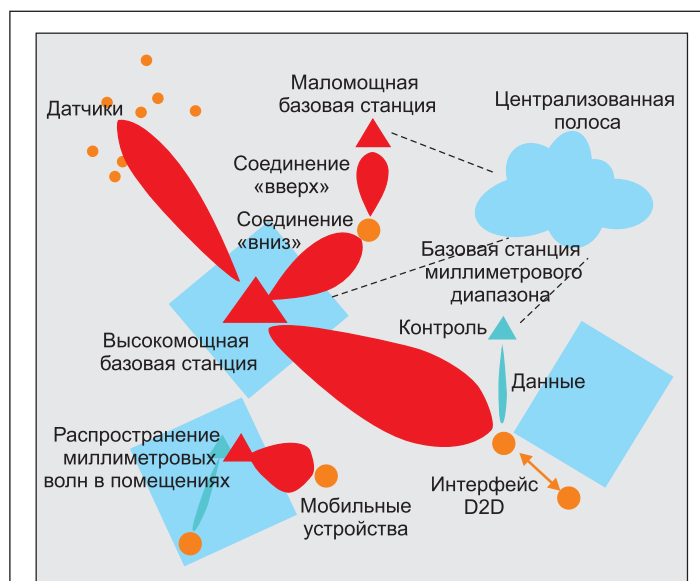


Рис. 2. Пример устройство-ориентированной архитектуры

<sup>1</sup> Основная работа в массивах MIMO происходит на частотах 5 ГГц или менее. Пока такие же принципы могут оказаться полезными и при использовании волн миллиметровой длины, но удачное соединение массивов MIMO и миллиметровых волн может принять существенно иную форму.

и сессии. Согласно этой концепции, понятия восходящей и нисходящей линий связи, а также каналы управления и данных должны быть пересмотрены (рис. 2).

Хотя необходимость прорывных изменений в дизайне архитектуры и представляется очевидной, по-прежнему необходимы серьезные научные усилия, чтобы преобразовать полученные знания в последовательные и реалистичные предложения. Поскольку история инноваций показывает, что изменения в архитектуре часто приводят к крупным технологическим разрывам [1], мы считаем, что вышеперечисленные тенденции могут оказать серьезное влияние на развитие 5G.

## Соединения на миллиметровых волнах

Микроволновая сотовая система имеет очень небольшой объем спектра: в настоящее время используется диапазон шириной около 600 МГц, и они делятся между всеми операторами [10]. Существует два способа получить доступ к более широкому микроволновому спектру:

- Переформировать спектр. Это уже произошло во всем мире с пере профилированием эфирного телевизионного спектра в сторону таких приложений, как широкополосный доступ в сельских местностях. К сожалению, такое пере профилирование не освободило достаточно много спектра (всего около 80 МГц), кроме того, сопряжено с высокими затратами.
- Поделиться используемым спектром, например с помощью техники когнитивного радио. На когнитивное радио изначально возлагались большие надежды, однако теперь они относительно погасли вследствие того, что сотрудники оказались не вполне готовы к такой кооперации, что является основным препятствием для повышения эффективности использования спектра для вторичных пользователей.

В целом, представляется, что лучший вариант удвоения текущей пропускной способности сот связан как раз со сверхвысокими частотами. Также существует большой спектр миллиметровых волн в диапазоне частот 3–300 ГГц. Многие диапазоны здесь представляются перспективными, в том числе ближайшее локальное многоточечное распределение сервисов в диапазоне 28–30 ГГц, бесплатные лицензии в диапазоне 60 ГГц и полосы группы E<sup>2</sup> 71–76, 81–86 и 92–95 ГГц. Предположительно, несколько десятков гигагерц могут стать доступными для 5G, что обеспечит куда более масштабный прирост относительно того, что доступно на данный момент. Нелишним будет сказать, что рабочей необходимостью является проведение такой политики в области спектров, которая предоставит эти диапазоны для сотовой мобильной связи.

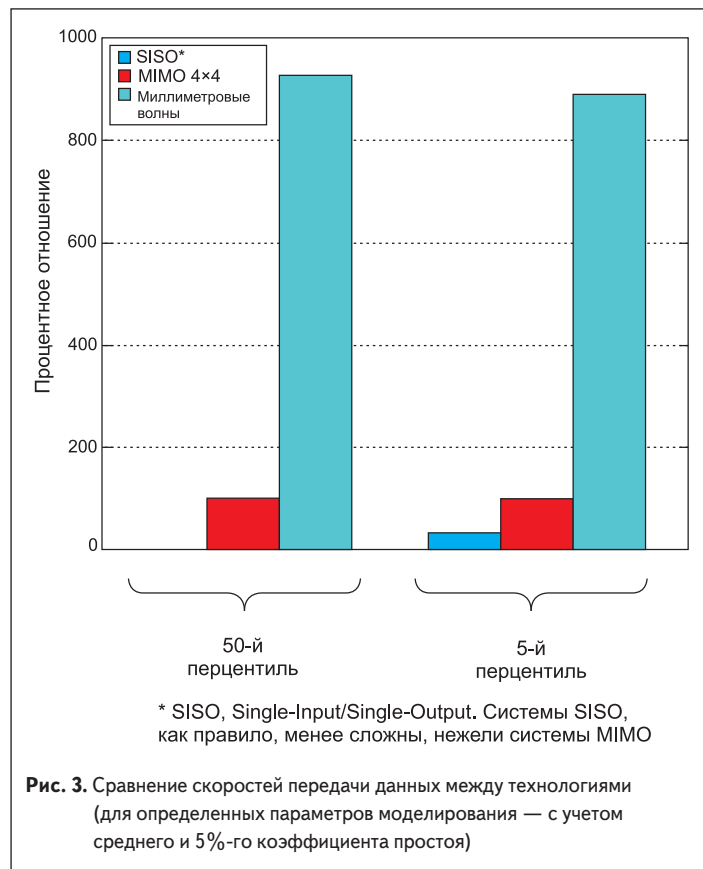
Распространение таких волн не является непреодолимой проблемой. Последние измерения показывают схожие общие характеристики с микроволновыми частотами, в том числе относительно потерь, связанных с расстоянием, пройденным волной, а также относительно возможности коммуникации с устройствами вне поля видимости. Главная разница между микроволнами и миллиметровыми волнами заключается в чувствительности к препятствиям: в [11], например, уровень потерь оценивается в два раза при распространении в поле видимости и в четыре (плюс дополнительные потери мощности) — при распространении вне поля видимости. При исследованиях сотовых миллиметровых волн необходимо учитывать эту чувствительность к препятствиям, анализировать более сложные модели каналов, а также изучить влияние таких составляющих, как инфраструктура высокой плотности и наличие ретрансляторов. Еще одним фактором является разделение между уровнем контроля и уровнем данных, о чем уже упоминалось выше.

Антенные решетки являются ключевым элементом в системах миллиметровых волн. Большие массивы могут быть использованы для поддержания постоянной антенной апертуры, устраняя частотную зависимость путевых потерь относительно всенаправленных антенн (при использовании их на одной стороне линии) и обеспечивая выигрыш в противостоянии крупным тепловым помехам (шумам) для пропускной способности сетевых решеток (при использовании с обеих сторон линии). Адаптивные решетки с узкими пучками лучей также уменьшают влияние интерференции, а это означает, что системы на миллиметровых

волнах чаще могут работать в условиях ограниченных шумов, нежели в условиях ограниченных помех. Поскольку полноценное соединение может происходить только при достаточном количестве решеток, для этого необходимы новые протоколы случайного доступа, когда передатчики могут излучать только в определенных направлениях, а приемники могут получать информацию только с определенных направлений. Потребуется также адаптивные алгоритмы обработки массивов, которые смогут быстро приспосабливаться, если пучки блокируются препятствиями или несколько антенных устройств закрываются собственным телом пользователя.

Системы миллиметровых волн также имеют различные аппаратные ограничения. Одним из основных является высокое энергопотребление различных сигнальных компонентов, и здесь речь, в основном, идет об аналого-цифровых преобразователях (АЦП) и цифро-аналоговых преобразователях (ЦАП). Например, обычная микроволновая архитектура, когда каждая антенна подключена к высокоскоростному АЦП/ЦАП, вряд ли может быть применима для миллиметровых волн, если не будет сделан огромный скачок вперед в области полупроводниковых технологий. Одной из альтернатив является гибридная архитектура, при которой формирование луча осуществляется в аналоговых радиочастотах и многочисленные потоки лучей подключаются к небольшому количеству АЦП или ЦАП; при такой альтернативе для управления аналоговыми мощностями формирования лучей потребуются соответствующие алгоритмы обработки сигналов. Другой альтернативой является подключение каждой радиочастоты к однобитному АЦП/ЦАП с очень низкой потребляемой мощностью; в этом случае лучи будут формироваться в цифровом виде, но с весьма «зашумленными» данными. Существует множество исследований проблем оптимизации различных трансиверных стратегий, а также анализа их потенциала, включая многопользовательские возможности и использование такой характеристики канала, как разреженность.

На рис. 3 приведено сравнение скоростей сотовой передачи данных между микроволновыми системами, использующими полосу пропускания 50 МГц (однопользовательская единичная антенна и однопользовательский MIMO), и системами миллиметровых волн с полосой пропускания 500 МГц (единичный пользователь). Результаты представлены с точки зрения прироста (в %) с привязкой к базовому уровню MIMO 4×4. Более подробно о сравнении рассказано в [12].



<sup>2</sup> E-band — радиочастоты электромагнитного спектра в диапазоне миллиметровых волн. В 2003 г. Федеральная комиссия по связи (FCC) постановила, что спектры 71–76, 81–86 и 92–95 ГГц станут доступными для услуг фиксированной беспроводной связи высокой плотности в США. — Прим. перев.

В пояснение рисунка следует заметить, что результаты, приведенные в данной статье, были получены с учетом современного понимания рассматриваемых технологий. Однако мы подчеркиваем, что на данный момент пока невозможно дать полностью реалистичную оценку и провести сравнение с развернутыми 4G-системами. Беспорно, некоторые исследования все еще находятся в так называемой «ажиотажной» фазе, и предстоит проделать большую работу, прежде чем устойчивое понимание функционирования 5G и необходимых вспомогательных средств сможет быть достигнуто.

Использование миллиметровых волн обеспечивает очень высокие показатели по сравнению с двумя различными микроволновыми системами. Выгоды десятикратно превышают рост спектра из-за повышенной мощности сигнала и снижения взаимных помех благодаря направленным лучам — как в приемнике, так и в передатчике.

Из приведенного выше обсуждения, а также ссылаясь на модель Хендерсона — Кларка, мы заключаем, что использование миллиметровых волн потребует радикальных изменений в системе, поскольку оно окажет сильное влияние как на дизайн компонентов, так и на дизайн архитектуры. Следовательно, мы рассматриваем использование миллиметровых волн в качестве потенциально прорывных технологий для 5G, которые, если вышеописанные проблемы будут решены, могут привести к непревзойденной скорости передачи данных и совершенно другому опыту пользователей.

### Массивы МИМО

Массивы (также называемые «крупномасштабные МИМО» или «крупномасштабные антенные системы») являются одной из форм систем многопользовательского МИМО, в котором число антенн на БС намного больше, чем количество устройств для источников сигналов [14]. Благоприятное воздействие закона больших чисел сглаживает частотные зависимости в канале и, в целом, дает огромный выигрыш в спектральной эффективности, которая только может быть достигнута. На рис. 4 приведено сравнение скоростей сотовой передачи данных для приложений фиксированного доступа массивной МИМО. Массивы из 2048, 4096 или 8192 антенн, использующих 50 МГц и излучающих в общей сложности 120 Вт, обслуживают 1000 пользователей, расположенных случайным образом в секции радиусом 6 км. Результаты приведены в терминах (с точки зрения) прироста (в %) с привязкой к базовому уровню МИМО 4x4.

В контексте рамок модели Хендерсона — Кларка мы утверждаем, что массивные МИМО имеют прорывной потенциал для 5G по следующим причинам:

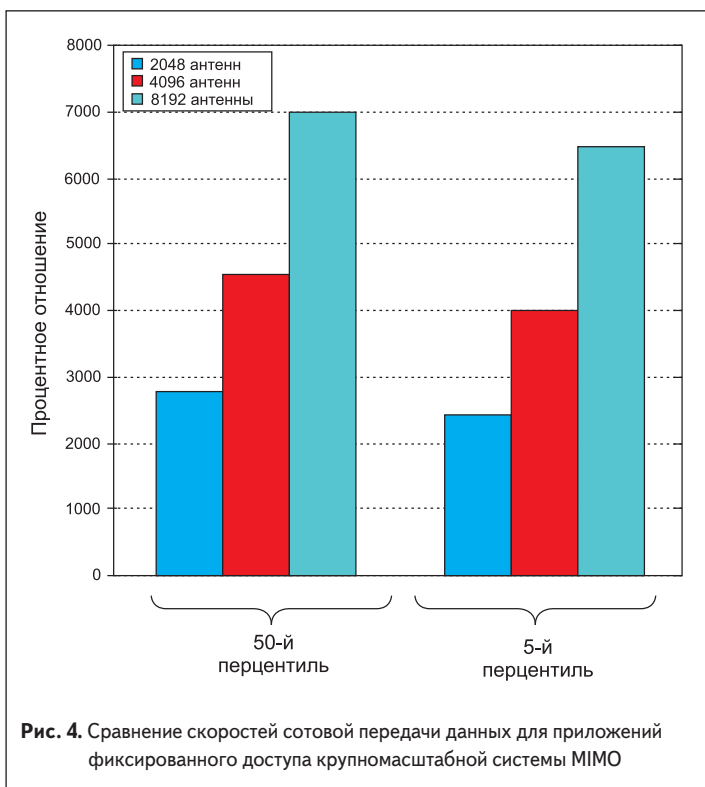


Рис. 4. Сравнение скоростей сотовой передачи данных для приложений фиксированного доступа крупномасштабной системы МИМО

- На уровне узлов это масштабируемая технология, которая тем и отличается от 4G, в которой дальнейшая секторизация неосуществима, поскольку существует ограниченное пространство для крупногабаритных азимутально-ориентированных антенн и имеется неизбежный угол распространения. В свою очередь, однопользовательская МИМО имеет ограничения на количество антенн, которые могут поместиться в определенных мобильных устройствах. При этом практически не существует ограничений на количество антенн БС в массивных МИМО — при условии, что разделенное во времени дуплексирование

#### Об авторах

**Федерико Боккарди (Federico Boccardi)** — главный инженер компании «Водафон», Великобритания (Vodafone Group). Магистр наук и доктор философии в области телекоммуникационной инженерии в Университете Падуи, Италия (Università degli Studi di Padova). Работал в центре «Лаборатория Белла», США (Bell Labs) с 2006 по 2013 г. Принимал участие в разработке различных проектов ЕС и в стандартизации 3GPP для LTE и LTE-Advanced («расширенный LTE»).

**Роберт Хелл-мл. (Robert W. Heath Jr.)** — профессор департамента электротехники и коммуникативной инженерии в Университете Остина, шт. Техас, США (Communications Engineering Department at the University of Austin), директор Группы беспроводных сетей и коммуникаций (Wireless Networking and Communications Group). Получил степени бакалавра и магистра наук в области электротехники в Университете Вирджинии (University of Virginia) и степень доктора философии в области электротехники в Стэнфордском университете (Stanford University). Президент и главный исполнительный директор (CEO) в Корпорации беспроводных МИМО (MIMO Wireless Inc.), главный эксперт по инновациям в ООО «Кума сигналс» (Kuma Signals LLC).

**Анхель Лозано (Angel Lozano)** — профессор и проректор по научной работе в университете им. Помпеу Фабры, Барселона (Universitat Pompeu Fabra). Получил степень доктора философии в Стэнфордском университете в 1998 г., работал в «Белл Лабс» в 1999–2008 гг. С 2005 по 2008 гг. состоял адъюнкт-профессором в Колумбийском университете (Columbia University). Председатель технического комитета коммуникационной теории стандарта IEEE и официальный член Совета директоров по IEEE Коммуникационного общества. Помощник редактора в ежемесячном рецензируемом научном журнале IEEE Transactions on Information Theory («Транзакции в теории информации»), активный участник стандартизации 3GPP, 3GPP2, и IEEE 802.20.

**Томас Марцетта (Thomas L. Marzetta)** получил докторскую степень в области электротехники в Массачусетском технологическом институте (Massachusetts Institute of Technology, MIT) в 1978 г. Присоединился к Bell Labs в 1995 г. В рамках бывшего Исследовательского центра математических наук (Mathematical Sciences Research Center) состоял на должности директора Департамента коммуникативных и статистических наук. Является одним из создателей массивов МИМО. В 1981 г. был удостоен премии в области ASSP (Application-specific standard product — «интегральные схемы с программируемой пользователем структурой»). В 2013 г. получил высшую премию имени Гульельмо Маркони (Guglielmo Marchese Marconi) по стандарту IEEE. В настоящее время является сотрудником научно-исследовательского центра Bell Labs, совмеща с работой в компании «Алкатель-Лусент», Франция — США (Alcatel-Lucent).

**Петар Поповски (Petar Popovski)** — в 1997 г. получил диплом инженера, а в 2000 г. — степень магистра в области коммуникационной инженерии в Университете Кирилла и Мефодия в Скопье (Македония), а затем, в 2004 г., докторскую степень в Ольборгском Университете (Aalborg Universitet, Дания). В настоящее время является профессором Ольборгского университета. Редактор ежемесячных рецензируемых научных журналов, таких как IEEE Communications Letters, IEEE JSAC (IEEE Journal on Selected Areas in Communications) и IEEE Transactions on Communications.

используется для того, чтобы позволить рассчитать канал посредством управления восходящей линией связи.

- Технология 5G позволит внедрить определенные нововведения и новую архитектуру. Хотя и возможно представить себе прямую замену макро-БС с решетками резонансных антенн низкого коэффициента усиления, следует понимать, что возможно также развертывание, например, равноугольных решеток на фасадах небоскребов или на поверхности резервуаров для воды в сельских местностях. Кроме того, те же принципы массивов ММО, регулирующие использование расставленных антенных решеток, применяются также к распределенным дислокациям, когда, например, кампус колледжа или целый город может быть покрыт множеством распределенных антенн, которые в совокупности служат многим пользователям (в этой конструкции централизованная полосная концепция, представленная ранее, является важным архитектурным механизмом реализации).

Будучи очень перспективными, массивы ММО, однако, представляют и ряд проблем для исследований. Расчет канала является критичным, и в настоящее время он служит основным источником ограничений. Передвижение пользователя устанавливает конечный когерентный интервал, в течение которого информация о канале должна быть получена и использована, и, следовательно, существует конечное число ортогональных стартовых последовательностей, которые могут быть выделены устройствам. Повторное использование стартовых последовательностей вызывает предварительные загрязнения и помехи связи, которые растут вместе с количеством антенн так же быстро, как и полезные сигналы. Смягчение последствий такого загрязнения является темой активных исследований. Кроме того, существует еще много тонкостей для изучения распространения массивов ММО, хотя пока что опыты подтверждают гипотезу квази-ортогональности канала.

С точки зрения применения, массивы ММО могут потенциально реализовываться с помощью модульного недорогого маломощного оборудования, когда каждая антенна функционировала бы полуавтономно, но по-прежнему требуются значительные усилия, чтобы продемонстрировать экономическую эффективность данного решения. Отметим, что на сверхвысоких частотах, рассмотренных в этом разделе, стоимость и потребление энергии АЦП/ЦАП заметно ниже, чем на частотах миллиметровых волн.

С учетом вышеизложенного, мы пришли к выводу, что принятие массивных ММО для 5G может представлять собой крупный шаг применительно к сегодняшнему состоянию системы и конструкции компонентов. Чтобы оправдать эти серьезные изменения, сторонникам массивов ММО необходимо продолжить работу по решению задач, изложенных выше, чтобы показать реальные улучшения про-

изводительности путем теоретических исследований, моделирования и стендовых экспериментов.

\*\*\*

Во второй части статьи будут рассмотрены интеллектуальные устройства и встроенная поддержка M2M-коммуникаций. Обращаем внимание, что в тексте сохраняется сквозная нумерация иллюстративных материалов. ■

*Продолжение следует.*

Оригинал статьи опубликован на сайте [http://cms.comsoc.org/SiteGen/Uploads/Public/Docs\\_TC\\_5GMWI/Five\\_Disruptive\\_Technology.pdf](http://cms.comsoc.org/SiteGen/Uploads/Public/Docs_TC_5GMWI/Five_Disruptive_Technology.pdf)

## Литература

1. A. Afuah. Innovation Management: Strategies, Implementation and Profits. Oxford Univ. Press. 2003.
2. J. Zander and P. M. Hönen. Riding the Data Tsunami in the Cloud: Myths and Challenges in Future Wireless access // IEEE Commun. Mag. 2013. Vol. 51. № 3.
3. D. Goodman et al. Infostations: A New System Model for Data and Messaging Services // Proc. IEEE VTC. 1997. Vol. 2.
4. N. Golrezaei et al. Femtocaching and Device-to-Device Collaboration: A new architecture for Wireless Video Distribution // IEEE Commun. Mag. 2013. Vol. 51. № 1.
5. J. Andrews. The Seven Ways HetNets Are a Paradigm Shift // IEEE Commun. Mag. 2013. Vol. 51. № 3.
6. Y. Kishiyama et al. Future Steps of LTE-A: Evolution towards Integration of Local Area and Wide Area Systems // IEEE Wireless Commun. 2013. Vol. 20. № 1.
7. C-RAN: The Road Towards Green RAN // China Mobile Research Inst. Beijing, China. White Paper. Oct., 2011.
8. A. Lozano, R. W. Heath Jr., and J. G. Andrews. Fundamental Limits of Cooperation // IEEE Trans. Info. Theory. 2013. Vol. 59. № 9.
9. C. D. T. Thai et al. Multi-Flow Scheduling for Coordinated Direct and Relayed Users in Cellular Systems // IEEE Trans. Commun. 2013. Vol. 61. № 2.
10. Z. Pi and F. Khan. An Introduction to Millimeter-Wave Mobile Broadband Systems // IEEE Commun. Mag. 2011. Vol. 49. № 6.
11. T. Rappaport et al. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! // IEEE Access. 2013. Vol. 1.
12. R. W. Heath Jr. What Is the Role of MIMO in Future Cellular Networks: Massive? Coordinated? mmWave? [http://users.ece.utexas.edu/~rheath/presentations/2013/Future\\_of\\_MIMO\\_Plenary\\_Heath.pdf](http://users.ece.utexas.edu/~rheath/presentations/2013/Future_of_MIMO_Plenary_Heath.pdf)
13. M. Weiser The Computer for the 21st Century. 1991. Sci. Amer.
14. T. L. Marzetta. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base