

СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ 5G: ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННАЯ ПАРАДИГМА, КОТОРАЯ ИЗМЕНИТ МИР

КРАТКИЕ ТЕЗИСЫ

И. Шахнович

Если вы хотите иметь то, что никогда не имели, – начните делать то, что никогда не делали.

Р.Бах

Термин "Сети мобильной связи пятого поколения" (5G) уже прочно вошел в лексикон специалистов по беспроводным коммуникациям. Что же скрывается за этим термином? Какие перспективы открывает новое поколение систем связи перед электроникой – общемировой и российской?

Впервые о сетях 5G в привязке к конкретным технологиям специалисты начали говорить на рубеже 2012–13 годов, хотя первые публикации о технологиях, которые сегодня относят к 5G, появились на несколько лет раньше [1–4]. Сегодня это направление обрело вполне зримые черты. Достаточно четко обрисовались задачи, решить которые призваны системы связи пятого поколения, и технологии, которые можно применять для создания сетей 5G. Конечно, пока никаких стандартов 5G нет – идет только обсуждение возможных подходов. Тем не менее, уже можно говорить о целях, средствах их достижения и движущих силах новой смены парадигмы систем беспроводной связи, а именно это и означает появление нового поколения системы связи. Очень кратко остановимся на них.

Но прежде чем рассуждать о 5G, давайте рассмотрим, что же такое "поколение" систем беспроводной связи, чем одно из них отличается от другого, почему происходит их смена.

ЧТО ТАКОЕ ПОКОЛЕНИЕ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

В технике связи одно поколение систем от другого должно отличаться качественно, причем на всех уровнях: как на техническом, так и на уровне потребления услуг. В свое время переход от технологий сотовой связи первого поколения (аналоговые системы) ко второму (GSM, CDMA, DAMPS) означал переход к цифровым технологиям на техническом уровне и к сервисам передачи данных (пусть и очень простым) – на пользовательском.

Переход к поколению 3G ознаменовал возможность передачи данных на скоростях, позволяющих смотреть видео, – это был качественно новый шаг. Технологически этот переход основывается на прорыве в создании малопотребляющих микроэлектронных средств обработки сигналов, как цифровых, так и аналоговых (например, высокочастотных малощумящих усилителей, приборов на основе GaAs и других перспективных полупроводниковых материалов, таких как GaN, InP). Вспомним: именно тогда, в середине 2000-х, началось бурное развитие цифровых микроэлектронных технологий глубокого субмикронного уровня (65–45 нм и ниже), обеспечивших радикальное снижение энергопотребления и увеличение функциональности в заданном объеме. Именно создание портативных устройств, в том числе телекоммуникационных, и было основной целью пресловутой "гонки за нанометрами".

Четвертое поколение систем беспроводной связи – это полноценный "офис в кармане". Именно на это были направлены требования, изначально сформулированные в рекомендации ITU-R M.1645 [5] комитета IMT-Advanced Международного союза электросвязи (ITU). Они диктовали необходимость обеспечить скорость в нисходящем канале (от базовой станции до абонента) до 100 Мбит/с для мобильных и 1 Гбит/с для номадических* и фиксированных абонентов. Такая

* Номадический абонент – способный перемещаться. Подразумевается, что такой абонент может устанавливать соединение в любой месте (в отличие от фиксированного), но поддержание связи во время движения не предусмотрено.

скорость позволяет устанавливать голосовые соединения и использовать различные информационные сервисы: выход в Интернет, обмен большими массивами данных, просмотра ТВ-трансляций (IPTV) и видео по запросу (VoD) и т.п. Все те сервисы, которые пользователь имел у себя дома или в офисе, становятся доступными в любом месте, причем за очень разумные деньги. Как сотовая телефония позволила разговаривать по телефону почти всегда и почти везде, так и системы 4G призваны обеспечить всех и каждого надежным высокоскоростным доступом к различным сетям передачи данных. К сетям 4G в полной мере можно отнести технологию LTE Advanced и WiMAX 2, но последняя, будучи полностью аналогичной, сошла с дистанции.

Тут есть один примечательный момент. Вроде бы для этого же создавались системы 3G. Но при всем стремлении производителей, 3G-технологии типа HSPA (High Speed Packet Access) не смогли конкурировать с технологией WiMAX и сменившей ее LTE – предтечами 4G (а если не придраться к отдельным "мелочам", их можно отнести к 4G). И это понятно: технологии 4G не просто обеспечивают принципиальную возможность передавать данные, как в 3G, – либо медленно, либо дорого, они позволяют забыть о привязке к конкретному информационному каналу. Пользователю становится безразлично, где он выходит в сеть – дома, в офисе, на прогулке или в автомобиле. И скорости, и стоимость услуг во всех этих случаях должны быть если и не одинаковы, то очень сопоставимы.

Отметим, что все эти возможности были не нужны, пока цифровые полупроводниковые технологии не развились настолько, что появились массовые дешевые абонентские устройства, обладающие вычислительной мощностью и средствами отображения на уровне стационарных компьютеров, но при этом относительно недорогие, компактные и легкие. Смартфоны и планшеты – вот конечное звено экосистемы 4G, без которого все заявленные скорости передачи не особо и нужны, ибо на экранчике сотового телефона образца начала – середины 2000-х годов видео не посмотришь.

Чтобы перейти к 4G, потребовалось коренное, принципиальное изменение в идеологии построения и архитектуре как сетей радиодоступа, так и опорных сетей. В беспроводных сетях было покончено с "телефонным наследием" сотовой связи: ведь даже системы 3G, по сути, являлись радиодлинителями, связывающими абонентов с АТС. Система 4G – это принципиально иная структура. Это плоская IP-сеть с пакетной передачей данных, с возможностью распределенной архитектуры, с каналами прямого обмена между базовыми станциями (БС) и т.п. Сотовый оператор, переходя от 3G к LTE, сохраняет только парк антенно-мачтовых

конструкций, все остальное нужно строить с нуля, включая опорные сети.

Казалось бы, и мобильный WiMAX, и вытеснившая его практически полностью аналогичная технология LTE с такой задачей справятся. И ни о каком пятом поколении не было бы в ближайшие годы и речи, если бы не два фактора – взрывной рост мобильного трафика и спектральный ресурс.

О чрезвычайно бурном росте трафика, в том числе беспроводного, сказано и написано немало. Он растет экспоненциально, и это факт. А возможности систем передачи ограничены законом Шеннона. И как бы ни развивалась электроника, какие бы маломощные усилители и прецизионные высокоскоростные АЦП ни создавались, какие бы методы цифровой обработки ни использовались, все это дает выигрывать в разы. А нужно – на порядки. Растет потребность в трафике для отдельных абонентов, продолжает расти число самих абонентов, еще быстрее – объем активных абонентских устройств. А что случится, когда пресловутый Интернет вещей станет обыденностью, даже страшно представить. Частотный ресурс уже стал золотым, и это полбеда, но в сантиметровом диапазоне, где действуют современные сети абонентского беспроводного доступа, он близок к исчерпанию. Это с одной стороны. С другой – производители полупроводниковых приборов подошли к возможности создания сверхмалопотребляющих терминальных устройств (как высоко-, так и низкопроизводительных), осваивая кремниевые технологии уровня 22–14 нм и ниже. А элементная база миллиметрового диапазона (до 100 ГГц), в том числе на основе кремниевых КМОП-технологий, стала промышленной реальностью. Такое предложение неизбежно рождает спрос. Но об этом – чуть ниже.

ЗАЧЕМ НУЖНЫ СЕТИ 5G?

Итак, какова цель создания сетей пятого поколения? Первая и очевидная причина – взрывной, экспоненциальный рост трафика в сетях абонентского доступа. По прогнозам [6], к 2016 году ежегодный объем трафика достигнет 1,1 зеттабайт (10^{21} байт) и к 2019 году превысит 2 зеттабайта. Объем мобильного трафика с 2014 по 2019 год вырастет на порядок (с 2,5 до 24,2 петабайт в месяц). И это вполне естественно – с развитием микроэлектронных технологий массовый пользователь получил в свое распоряжение недорогое устройство, обладающее огромной производительностью и выдающимися средствами отображения информации. Смартфон, планшет, другие гаджеты – это сложнейшие устройства, о которых еще 10 лет назад даже специалисты могли лишь мечтать (правда, часть из них не просто мечтала, но и воплощала мечты в реальность). И все эти устройства – потребители трафика. Чем выше

производительность и лучше экран, тем больше трафика. Пока мы видим, что закон Мура продолжает действовать, хоть топологическое разрешение полупроводниковых технологий уже и вплотную приблизилось к рубежу в 10 нм. Это значит, что тенденция создания все более мощных мобильных устройств продлится и в дальнейшем. Причем речь уже идет не только об увеличении разрешения видекартинки – хотя недалек тот час (если он уже не пробил), когда на мобильных устройствах все захотят иметь HDTV. Но ведь появится и мобильное 3D-видео, и средства передачи тактильных ощущений, и множество других мобильных сервисов.

Другая причина, требующая смены парадигмы сетей беспроводного доступа – Интернет вещей, или даже Всеобщий интернет, о котором сегодня столько говорят. С точки зрения телекоммуникаций это означает, прежде всего, взрывной рост активных приемопередающих устройств, причем беспроводных. И все они связаны в одну глобальную сеть – Интернет. Уже сам факт появления триллионов новых источников данных оказывает способен в корне изменить концепцию построения сети (есть прогнозы появления к 2017 году 7 триллионов беспроводных устройств – в 1000 раз больше, чем жителей Земли). А ведь речь идет не только о низкоскоростных потоках телеметрии и управления, но и о высокоскоростном трафике, например, видео. Меняется и сама структура каналов – становится актуальной концепция связи "машина-машина" (M2M) через сеть. Речь идет о глобальной связности, о взрывном росте не только скорости в канале, но и о числе таких каналов.

Еще одна тенденция, которая сегодня проявляется все ярче – это концепция облачных вычислений. Ее суть: процедуры сложной обработки, хранение больших массивов данных стремятся перенести "в облако", то есть в центры обработки данных, распределенные или локальные. И это уже больше чем тенденция – это индустриальный тренд, глобальная смена парадигмы промышленного управления (одно из названий которой – Industry 4.0). Игры и офисные приложения, системы управления промышленными объектами и базы данных из персональных устройств и локальных серверов уходят "в облака". Более того, эта тенденция коренным образом затронула и телекоммуникационные технологии: концепция программно-определяемых сетей SDN (Software-Defined Networks) – это ни что иное, как перенос функций сложной обработки из распределенных сетевых устройств (маршрутизаторов) в некий центр. А ведь сегодня все больше говорят и об облачных технологиях управления радиосетями доступа. В целом, облачные технологии означают, что наступает эра "больших аналоговых данных" – появляется огромное множество источников "сырых", необработанных данных, которые по телекоммуникационным каналам должны

передаваться в центры обработки. Причем, опять же, подавляющее большинство источников таких данных – беспроводные устройства.

Появление множества источников данных, постоянно растущие потребности в скорости в отдельно взятом канале передачи, рост числа базовых станций приводят к взрывному росту потребления электроэнергии сетями беспроводной связи. В системах связи появляется возникает задача, с которой уже столкнулась область сверхвысокопроизводительных вычислений (суперкомпьютеров) – энергоэффективность. И это не просто борьба за экологию – это реальная потребность. Так, крупнейший в мире оператор сотовой связи China Mobile в 2012 году израсходовал 14 млрд. кВт·ч электроэнергии в своей сети из 1,1 млн. базовых станций. А к 2014 году в сетях China Mobile добавилось еще 800 тыс. базовых станций, то есть энергопотребление выросло более чем на 70% [7].

Помимо скорости, все более важную роль играет время задержки передачи информации. Если раньше это острее всего сказывалось на биржевых операциях и любителях сетевых игр, то с наступлением эры Всеобщего Интернета, эры глобального управления через сеть, Industry 4.0 и т.п. время установления соединения, передачи данных и доставки отклика становится все более критичным. Например, для задач дистанционного управления технологическими процессами.

Наконец, новые скорости и новые объемы данных очевидно требуют самого дорогого, что есть у связи – спектрального ресурса. Он ограничен по определению, равно как и теоретический предел бит/с/Гц. Однако задача новых технологий связи – решить эту проблему.

Итак, сверхскорость (1–10 Гбит/с), сверхмалые задержки (менее 1 мс), сверхбольшое число активных физических соединений и их сверхвысокая плотность, энергетическая и спектральная сверхэффективность (по крайней мере в 10 раз выше сегодняшних) (см. таблицу) – вот, пожалуй, основные задачи, которые невозможно решить в рамках концепции сетей беспроводной связи 4G, таких как LTE Advanced. Сеть 5G должна обеспечивать доступ к данным везде и всегда, всем людям и каждому устройству. Как можно решить все эти задачи?

ТЕХНОЛОГИИ 5G: ПРОТИВОСТОЯНИЕ ИЛИ ВЗАИМОДОПОЛНЕНИЕ?

По большому счету, методов, потенциально позволяющих решить описанные задачи, не так и много (и это не удивительно, иначе эти задачи давно бы решились). Поэтому в контексте 5G речь идет о нескольких прорывных технологиях, реализация которых еще несколько

лет назад казалась фантастикой. На физическом уровне все сводится к следующим методам:

- работа в миллиметровом диапазоне длин волн (30–300 ГГц);
- использование пространственного разделения каналов и пространственной модуляции (что означает формирование узких диаграмм направленности в приемных и передающих устройствах, применение многоканальных антенных систем ММО);
- применение новых сигнально-кодовых конструкций, например, мультиплексирование с "неортогональным" частотным разделением каналов, что влечет усложнение алгоритмов обработки сигналов в устройствах;
- существенно более плотное расположение БС – то есть переход от макросот к микро- и пикосотам;
- применение действительно полнодуплексного режима (вместо временного и частотного дуплексирования, как в современных системах), то есть БС должна в одной частотной полосе принимать и передавать информацию от множества устройств. Это возможно, если использовать перспективные технологии подавления интерференции между приемными и передающими каналами.

Коренным образом меняются и сами принципы построения сети, их архитектура. Прежде всего, от сегодняшней сотово-центрической сети (основной элемент сети – базовая станция, где сосредоточены функции управления доступом) необходимо перейти к концепции "устройство-центрической" сети. Сами абонентские устройства становятся настолько интеллектуальными, что уже на них, а не на сеть, возлагается часть функций сетевого

управления (вход в сеть, установление соединения, хендовер и т.п.).

Меняется и принцип организации каналов связи. Если системы 2G и 3G допускали только канал "базовая станция – абонентское устройство", а в системах 4G появилась возможность (но именно возможность) прямой связи между БС, то в контексте 5G говорят о непосредственной связи устройство-устройство. Причем – и это принципиально – в рамках глобально-связанной сети. Речь идет о mesh-сетях, причем мобильных, динамически формирующихся и реконфигурируемых. Претерпевает радикальное изменение сама концепция соты. Это уже не нечто фиксированное – сегодня говорят о виртуальных сотах, о распределенных и гибких сотах, о динамически изменяющихся и даже мобильных сотах и т.п.

Основным становится принцип гетерогенных сетей. Причем неоднородность возможна по множеству параметров – и по используемым технологиям, и по частотным диапазонам, и по разделению функций между макро- и микросотовыми БС. Например, обмен данными идет через микро-БС, а управляющая информация – через макро-БС. Либо нисходящий канал реализован в миллиметровом диапазоне, в узком луче, формируемом БС, а восходящий – в сантиметровом.

Изменяются принципы управления сетью. Часть функций децентрализуется, часть переносится в облако. Появляется понятие облачной сети радиодоступа (C-RAN, cloud radio access network – некий идейный аналог технологии SDN).

При сверхплотном расположении БС (с шагом сетки в сотни метров) принципиально иную, ключевую роль начинают играть связывающие их опорные сети. Это

Некоторые ключевые показатели, которых необходимо достичь при создании систем 5G в рамках различных проектов [8]

Ключевые показатели	Требования ИТУ к 4G	Проект METIS (Европа)		5G Forum (Ю.Корея)	Future Forum (КНР)
		В целом	Сценарий TC1 (виртуальный офис)*		
Пиковая скорость, Гбит/с	1	×10-100	5 (на 20% зоны покрытия)	50	10
Скорость для пользователей на границах сот, Мбит/с	6	×10-100	1 (на 95% зоны покрытия)	1	0,1
Время задержки, мс	10	до 2	10	1	1
Скорость перемещения, км/ч	350	350	6	350	<500
Плотность соединений, 10 ⁶ /км ²	–	–	0,1	–	1
Плотность трафика, Гбит/с/м ²	–	×1000	0,1	–	0,01

* В документе ICT-317669-METIS/D1.1 [9] рассматривается 12 различных сценариев применения системы связи 5G.

могут быть высокоскоростные сети миллиметрового диапазона, радиорелейные системы с возможностями mesh-сетей и т.п. Более того, сама граница между опорными сетями и сетями радиодоступа начинает стираться.

Все это, безусловно, далеко не полный перечень концептуальных подходов к организации сетей 5G. Простое описание каждого из них потребует отдельной статьи. И любое из этих направлений – это независимая область исследований, которые велись и ведутся во всем мире.

ОСНОВА ОСНОВ – МИЛЛИМЕТРОВЫЙ ДИАПАЗОН

Сегодня все специалисты сходятся на том, что сети 5G будут строиться на работе в двух частотных областях – "ниже 6 ГГц" (т.е. в см-диапазоне) и "выше 6 ГГц". Последнее означает миллиметровый диапазон, в интервале от 28 до 95 ГГц. Причем если технологии связи в диапазонах ниже 6 ГГц – это, по сути, эволюционное развитие технологий 4G (например, переход от модуляции OFDM к неортогональному FDM), то работа в миллиметровом диапазоне – это принципиально новый подход к организации систем беспроводной связи. Отметим лишь ряд моментов, характеризующих эту новую парадигму построения сетей мобильной связи.

Прежде всего, миллиметровый диапазон – это огромный незанятый частотный ресурс (формально от 30 до 300 ГГц, реально – до 100 ГГц). Он позволяет работать с полосами свыше 1 ГГц, что обеспечивает скорость передачи 1–10 Гбит/с и выше. Однако связь в мм-диапазоне требует направленных антенных систем. При этом достигается существенный энергетический выигрыш по сравнению с традиционными системами беспроводной связи [10].

Благодаря малой длине волны физические размеры антенных систем мм-диапазона при высоком усилении очень малы. Поскольку шаг между элементами антенной решетки составляет половину длины волны, то есть несколько миллиметров (5 мм – для 30 ГГц, 2,5 мм – для 60 ГГц), активные решетки можно формировать на подложках микросхем, в их корпусах и т.п. Это существенно упрощает и удешевляет элементную базу и разработку систем связи в целом. Благодаря малым физическим размерам антенных решеток, их можно встраивать в абонентские устройства (например, в телефоны).

За счет высокой направленности антенных систем мм-диапазона достигается высокая пространственная селективность – соседние устройства могут работать на одной частоте, не мешая друг другу, то есть решается проблема высокоэффективного использования частотного ресурса. Высокое затухание электромагнитного

излучения в диапазоне 60 ГГц за счет резонансного поглощения на молекулах кислорода естественным образом решает проблему интерференции, что особенно важно для организации беспроводной опорной сети. Компактные устройства с перестраиваемой диаграммой направленности обеспечивают необходимую для концепции 5G гибкость.

Кроме того, системы связи мм-диапазона еще и более безопасны по сравнению с сегодняшними сотовыми телефонами – благодаря высокому затуханию в воде и большей энергетической эффективности, воздействие электромагнитного излучения мм-диапазона на жизненно важные органы человека существенно ниже, чем в системах связи см-диапазона (практически все излучение затухает на уровне внешних кожных покровов).

ФАНТАСТИКА, СТАВШАЯ РЕАЛЬНОСТЬЮ

Еще несколько лет назад подавляющее большинство специалистов очень скептически относились к возможности организации систем связи в мм-диапазоне. Действительно, это ведь "практически оптика", "только прямая видимость", "огромное затухание свободного пространства" и т.д. [10]. Миллиметры – это удел радиорелейных систем, фиксированной связи с узконаправленными параболическими антеннами, радиолокационных систем с жидкостным охлаждением. А главное, сколько будет стоить элементная база, какие массогабаритные характеристики окажутся у конечных устройств, каково будет их энергопотребление?

Все эти проблемы еще недавно выглядели неразрешимыми. Но именно потому мы и говорим о "новом поколении", что оно означает смену технологической парадигмы, переход к новой идеологии, которая еще поколение назад казалась ненаучной фантастикой. И реальностью эту фантастику делает принципиально новая элементная база и новая аппаратура на ее основе. Этой теме необходимо посвящать отдельную публикацию. Отметим лишь, что примерно с середины 2000-х в области элементной базы для мм-диапазона намечился прорыв, который сегодня можно считать воплощенным в серийной продукции. Появились не только дискретные СВЧ-компоненты, но и монолитные интегральные схемы (МИС), работающие в миллиметровом диапазоне. А затем в миллиметры устремились и кремниевые технологии СБИС, такие как БиКМОП (SiGe) и даже КМОП. Новая элементная база уже активно используется в системах радиорелейной связи E-диапазона (71–76, 81–86, 92–95 ГГц), в оборудовании локальных беспроводных сетей в диапазоне 60 ГГц (WiGig, IEEE 802.11ad, WirelessHD, IEEE 802.15.3c) [3]. Причем – и это принципиально – в силу малой длины волны антенные массивы зачастую формируют непосредственно на подложках интегральных схем.

Появляется новая категория элементной базы, где на одном кристалле или в одном корпусе интегрирована вся СВЧ-обработка, аналоговая и цифровая, а также антенная система, позволяющая формировать узкую перестраиваемую диаграмму направленности. Сложнейшие проблемы проектирования СВЧ-устройств решены на уровне СБИС/МИС и скрыты от разработчика аппаратуры. В его распоряжении оказываются компоненты с высокоскоростным цифровым интерфейсом и интегрированной антенной решеткой.

Все это предопределило интерес ведущих мировых производителей к миллиметровому диапазону на уровне систем абонентского беспроводного мобильного доступа – то есть на уровне решений 5G. Это и Samsung, и Nokia, и Huawei. Опубликованы результаты экспериментов по распространению радиосигналов в городских условиях в диапазонах 28, 38, 60, 72 ГГц. Сначала это были работы группы проф. Т.Раппопорта в Нью-Йоркском политехническом университете [11–13], а затем к ним присоединились другие исследователи, в частности, из компаний Nokia Siemens Networks [14] и Samsung Electronics [15]. И эти результаты оказались не просто обнадеживающие, они в 2013 году и позволили говорить о связи в мм-диапазоне как об одном из базовых подходов к поколению 5G.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ: ВСЕ ЕЩЕ ВПЕРЕДИ

Один из краеугольных камней в процессе внедрения любой глобальной технологии – стандартизация. Процесс сложный и длительный, поскольку требует учета интересов всех будущих игроков 5G, а это – ведущие мировые производители элементной базы и телекоммуникационного оборудования, острейшие конкуренты, каждый – со своим пулом патентованных решений. Необходимо выбрать оптимальное решение и при этом найти должный взаимный компромисс. Но пока в 5G о стандартизации речи не идет – просто нечего стандартизировать. Развитием технологий 5G занимаются во всем мире. В Европе достаточно назвать два крупных проекта – METIS и 5G NOW. Известны и другие крупные международные и национальные проекты, в которых участвуют альянсы ведущих производителей телекоммуникационного оборудования, научные центры и регуляторные органы.

На предстоящей в ноябре 2015 года Всемирной конференции по радиосвязи (WRC-2015) ITU предполагается лишь заслушать доклад о технологических тенденциях в области будущих систем связи. На этой конференции должен быть сформулирован план, по которому будет строиться работа в области стандартизации будущей сети. Начнется

работа по созданию концепции 5G (IMT for 2020 and beyond – концепция мобильных телекоммуникаций с 2020 года и далее) – аналог концепций IMT-2000 и IMT-Advanced), в ней должны быть сформулированы определения сетей 5G и требования к ним. На конференции WRC в 2019 году предполагается рассмотреть вопрос об использовании спектра.

Тем не менее, поскольку спектр – это едва ли не самый острый вопрос при формировании нового поколения систем беспроводной связи, самые первые подвижки в этом направлении уже есть [16]. Системы беспроводной связи, входящие в 5G, можно условно разделить на собственно сеть радиодоступа (БС – терминал пользователя, возможно – терминал-терминал) и опорные сети (связь между базовыми станциями, между базовыми станциями и сетевым оборудованием и т.п.). Для 5G последний тип сетей (backhaul) становится все более актуальным, особенно с учетом такого направления, как сверхплотные сети на основе малых сот. Более того, на основе модного сегодня тренда переноса функциональности в ЦОД и даже в "облако" появился новый термин – fronthaul. Это высокоскоростной, выделенный канал связи для передачи "сырых" данных от трансивера (вплоть до квадратурных составляющих непосредственно от модулятора) в центр обработки, где и выполняется вся обработка сигнала. Для беспроводной передачи данных в опорных сетях речь в основном идет о частотных диапазонах 60 ГГц для малых сот (в силу быстрого затухания) и о E-диапазоне (71–76, 81–86 и 92–95 ГГц), последний уже сегодня активно используется в системах связи "точка-точка" (радиорелейных системах).

В области сетей радиодоступа в мм-диапазоне разные исследователи, компании и организации называют достаточно различные диапазоны. Так, группа проф. Т.Раппопорта проводила исследования в тесном сотрудничестве с компанией National Instruments в диапазонах 28, 38 и 60 ГГц, а позднее, при участии Nokia Siemens Networks (ныне снова Nokia Solutions and Networks) – в диапазонах 72–73 ГГц. Компания Samsung Electronics, как один из лидеров направления систем связи в мм-диапазоне, продемонстрировала прототип в диапазоне 28 ГГц. Опубликованы результаты совместной работы Nokia Solutions and Networks и японской NTT DOCOMO над системой в диапазоне 73,5 ГГц [17]. В апреле 2015 на Бруклинском саммите 5G компания Nokia продемонстрировала скорость в 10 Гбит/с в диапазоне 73 ГГц. Кроме того, известны эксперименты NTT DOCOMO в области 5G на частотах 20 и 15 ГГц (последние – с Ericsson, скорость 5 Гбит/с, прототип демонстрировался на выставке MWC-2015 в Барселоне).

Национальные регуляторы пока практически не приступали к рассмотрению вопросов частотных ресурсов для 5G. Пионер в этом направлении, Федеральная комиссия связи США (FCC), в качестве приоритетных называет диапазоны 27,5–29,5; 37–40,5, 47,2–50,2; 50,4–52,6 и 59,3–71 ГГц [18]. Консалтинговая компания Quotient Associates в своем отчете для национального регулятора Великобритании Ofcom в качестве приоритетных указала диапазоны 66–71; 45,5–48,9; 40,5–43,5 ГГц [19].

Ряд международных организаций и объединений также приводят свои данные о возможных диапазонах для 5G. Так, европейский проект METIS рассматривает частоты от см-диапазонов до 86 ГГц. Как средне- и высокоприоритетные отмечены диапазоны 10; 28–29; 32–33; 43; 46–50; 56–60 и 81–86 ГГц. ITU условно называет следующие диапазоны в области 20–50 ГГц "приоритетными для рынка мобильных систем": 21,2–23,6; 25,25–29,5; 31–31,3; 36–40,5 и 42,5–50 ГГц (за вычетом полосы 40–40,2 ГГц). Однако все приведенные данные носят характер рекомендаций, которые предполагается обсуждать на Всемирной конференции по радиосвязи WRC в 2019 году.

* * *

Таким образом, говорить о появлении сетей 5G ранее 2020–2025 годов не приходится. И это хорошо – у российских производителей и исследователей есть время активно включиться в этот процесс. Иначе в очередной раз весь рынок поделят Samsung и Huawei, а сотня миллионов российских пользователей продолжит финансировать телекоммуникационные корпорации зарубежных стран.

А пока мир ищет подходы к реализации 5G, в умах исследователей рождаются новые идеи – призрачные, фантастические, нереализуемые, – которые через какое-то время лягут в основу концепций систем связи 6G. А затем воплотятся в массовом оборудовании, в гаджетах, без которых не будет мыслить себя ни один тинейджер образца 2030–2035 годов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zhouyue Pi and Farooq Khan.** An Introduction to Millimeter-Wave Mobile Broadband Systems // IEEE Communications Magazine. June 2011. P. 101–107.
2. **Zhouyue Pi, Farooq Khan, Jiazhong Zhang.** Techniques for millimeter wave mobile communication. – US Patent Application Publication № 61/299304, приоритет от 29 октября 2010 г.
3. **Вишневецкий В., Фролов С., Шахнович И.** Миллиметровый диапазон как промышленная реальность. Стандарт 802.15.3с и спецификация WirelessHD // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2010. № 3. С. 70–79.
4. **Вишневецкий В., Фролов С., Шахнович И.** Радиорелейные линии связи в миллиметровом диапазоне: новые горизонты скоростей // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2011. № 1. С. 90–97.
5. Recommendation ITU-R M.1645. Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000. – ITU, 2010.
6. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014–2019. URL: www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.html.
7. **Chih-Lin I, Corbett Rowell, Shuangfeng Han, Zhikun Xu, Gang Li, Zhengang Pan.** Toward Green and Soft: A 5G Perspective // IEEE Communications Magazine. 2014. № 2. February. P. 66–72.
8. **Tan Wang, Gen Li, Jiaxin Ding, Qingyu Miao, Jingchun Li, and Ying Wang.** 5G Spectrum: Is China Ready? // IEEE Communications Magazine. 2015. № 7 July. P. 58–65.
9. ICT-317669-METIS/D1.1. Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system. – Project METIS, 2013.
10. **Шахнович И.** Миф о затухании свободного пространства: чего не писал Г.Т.Фриис // Первая миля. 2014. № 2. С. 40–45.
11. **Rappaport T.S. et al.** Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! // IEEE Xplore Digital Library, May 2013.
12. **Rappaport T.S. et al.** Broadband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Models Using Adaptive-Beam Antennas for Outdoor Urban Cellular Communications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 61. №.4. April 2013. P. 1830–1839.
13. **Rappaport T.S. et al.** 73 GHz Millimeter-Wave Indoor and Foliage Propagation Channel Measurements and Results. – NYU WIRELESS: Department of Electrical and Computer Engineering, NYU Polytechnic School of Engineering, Tech. Rep. 2014–003, July 2014.
14. **Amitabha Ghosh.** Can Mmwave Wireless Technology meet the future capacity crunch // IEEE ICC, June 2013.
15. **Wonil Roh.** Performances and Feasibility of mmWave Beamforming Prototype for 5G Cellular Communications // IEEE ICC, June 2013.
16. **Тихвинский В., Бочечка Г.** Перспективы миллиметрового диапазона для 5G в России // Первая миля. 2014. № 2. С. 36–39.
17. **Mark Cudak, Tom Kovarik, Timothy A. Thomas, Amitava Ghosh, Yoshihisa Kishiyama, Takehiro Nakamura.** Experimental mmWave 5G Cellular System. – Globecom 2014 Workshop Mobile Communications in Higher Frequency Bands, p.377–381.
18. 5G Spectrum Recommendations. – 4G Americas, August 2015, www.4gamericas.org.
19. 5G Candidate Band Study. Study on the Suitability of Potential Candidate Frequency Bands above 6GHz for Future 5G Mobile Broadband Systems. – Final Report to Ofcom, March 2015, URL: www.quotientassociates.com.