ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ терагерцового диапазона частот в сетях 6G

Часть 2

В.Тихвинский, д.э.н., академик РАЕН, проф. МВТУ им. Н.Э.Баумана и МУИТ (Республика Казахстан), главный научный сотрудник ФГБУ НИИР / vtniir@mail.ru,
Е.Девяткин, к.э.н., директор Центра исследований перспективных беспроводных технологий связи (ЦИ ПБТС) ФГБУ НИИР / deugene@list.ru,
Ю.Смирнов, к.т.н., начальник отдела НИИ Минобороны РФ / syy1969@mail.ru,
М.Иванкович, к.т.н., заместитель директора ЦИ ПБТС ФГБУ НИИР / ivankovich@mail.ru,
В.Веерпалу, д.т.н., директор ЦА ЭМС ФГБУ НИИР

УДК 621.391.82, DOI: 10.22184/2070-8963.2022.108.8.10.16

Одним из важных отличий сетей мобильной связи 6G по сравнению с поколением 5G Advanced станет использование для оказания ряда ключевых услуг спектра суб-терагерцовых (суб-ТГц) и терагерцовых частот 6G. Приводится анализ особенностей использования суб-терагерцовых и терагерцовых диапазонов волн в сетях мобильной связи 6G на основе видения развития и облика таких сетей международными и национальными проектами сетей 6G, а также перспектив развития электронной компонентной базы для этих диапазонов частот.

Приложения и услуги, реализуемые в ТГц-диапазоне

Исходя из ключевых услуг сетей связи 6G [27] – MBRLLC (Mobile Broadband Reliable Low Latency Communication – мобильные широкополосные услуги передачи данных с низкой задержкой), HCS (Human-Centric Services – человеко-центричные услуги) и IoE (Internet of Everything – интернет всего), – будущее использование суб–ТГц и ТГц-диапазонов определят их уникальные характеристики:

1. **Квазиоптическая часть терагерцового диапазона:** электромагнитные свойства ТГц-диапазона из-за близости к квазиоптическому диапазону создают определенные ограничения в допустимых дальностях связи и зонах покрытия формируемых сот сетей 6G. Эффект молекулярного поглощения рассматривается как фактор, ограничивающий распространение ТГц-волн. Вместе с тем молекулярное поглощение открывает возможности приема сигналов, которых нет в других частотных диапазонах. Однако последнее "оплачивается" уменьшением дальности связи.

2. **Архитектура 6G, адаптированная к ТГц-диапазону:** развертывание сетей 6G в ТГц-диапазоне позволяет обеспечить:
   - более высокую плотность базовых станций 6G;
   - более короткие расстояния связи;
   - способность предоставлять новую ключевую мультицелевую услугу MPS, объединяющую несколько функций 3CLS (зондирование, связь, формирование изображений), услуги

беспроводной передачи энергии и набор уникальных условий канала.

Эти факторы требуют использования более гибких сетевых архитектур [27], адаптированных к ТГц-диапазону, которые могут использовать преимущества терагерцовых систем. Таким образом, растет важность использования архитектуры "сети без сот", а также возникают сопутствующие решения и технологические возможности. Кроме того, в ТГц-сетях [24–26] исследуется ключевая роль реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (RIS), их возможности для голографической связи из-за небольшого размера зоны покрытия в ТГц-диапазоне, их массивные чувствительные многоэлементные антенные решетки (Ultra Massive MIMO), а также возможности и проблемы обеспечения связи в ближнем поле антенн.

3. **Синергия ТГц-диапазона и более низких частотных диапазонов:** сети связи на ТГц-частотах будут развернуты в радиочастотном спектре, который уже сильно перегружен технологиями в диапазонах ниже 6 ГГц и ММДВ. Ожидается, что сети ТГц-диапазона будут обладать определенным уровнем синергии (совместное использование и бесшовное соединение) с беспроводными технологиями в более низких диапазонах частот.

   Например, ряд вариантов применения, такие как расширенная реальность XR (иммерсивное присутствие), могут использовать все доступные сетям мобильной связи частоты для обеспечения взаимодействия. Таким образом, может быть обеспечено совместное использование ТГц-диапазона частот с полосами, услугами и инфраструктурой миллиметрового и диапазонов ниже 6 ГГц. Поэтому синергия между различными частотными диапазонами может обеспечить возможности как для общения (связи абонентов), так и услуг восприятия человеческих чувств и эмоций через виртуальную реальность.

4. **Многоцелевые услуги зондирования и связи в ТГц-диапазоне:** благодаря квазиоптической природе ТГц-диапазонов может быть сформировано гармоничное сочетание услуг высокоскоростной связи и зондирования с высоким разрешением (MPS). Следовательно, роль совместных услуг связи и датчиков для будущих сетей мобильной связи ТГц-диапазона будет расти, как и эффективность взаимной обратной связи между функциями восприятия и связи может улучшить общую производительность сети. Естественно, принятие таких конфигураций может помочь преобразовать беспроводные сети в новое поколение универсальных сетей, которые могут предлагать своим пользователям многоцелевые услуги, тем самым открывая дверь для новых услуг MPS и вариантов их использования для ТГц-диапазона.

5. **Процедуры физического уровня PHY в ТГц-диапазоне:** пространственно-разреженный ТГц-канал низкого ранга налагает определенные ограничения на процедуры физического уровня PHY, такие как оценка беспроводного канала и начальный доступ. Чтобы преодолеть эти проблемы необходимо использовать новые методы оценки качества канала связи на основе методов генеративного глубокого обучения (Deep learning) для прогнозирования состояния ТГц-канала связи. Кроме того, будет также возрастать роль зондирования в сети радиодоступа 6G RAN для обеспечения улучшенной инициализации доступа в сеть 6G для абонентских устройств ТГц-диапазона.

6. **Методы доступа к спектру в ТГц-диапазоне:** традиционные схемы множественного доступа, принятые в предыдущих поколениях мобильных сетей связи, не могут быть напрямую применены к ТГц-полосам частот из-за аппаратных ограничений и уникальной природы среды распространения в терагерцовом диапазоне. Следовательно, к возможным методам радиодоступа, которые будут применяться для сетей ТГц-диапазона, относятся методы неортогонального множественного доступа (NOMA). Это усиливает синергию между использованием ТГц-диапазона и множественным доступом NOMA за счет их совместного применения с реконфигурируемыми интеллектуальными поверхностями RIS на этих частотах.

7. **Оптимизация сети в реальном масштабе времени:** услуги сетей 6G, такие как расширенная реальность XR, голография и цифровые двойники DT, требуют разработки услуг передачи энергии на расстояния (MPS), обеспечивающие услуги связи, управления и вычислительные функции из набора услуг 3CLS. Обеспечение связи и восприятия услуг в ТГц-диапазоне позволяет использовать новые алгоритмические подходы и методы, которые оптимизируют сети ТГц-диапазона, позволяя им соответствовать строгим требованиям приложений 6G, выходящих за рамки возможностей сетей 5G.

   Переход к реальному использованию ТГц-диапазона в качестве частотного ресурса при

предоставлении услуг связи для приложений MBRLLC, HCS и IoE в сетях 6G сталкивается с множеством проблем управления спектром, сетевого анализа, проектирования и оптимизации архитектуры этих сетей.

Во-первых, характеристики ТГц-частот требуют использования инновационных технологий радиодоступа в архитектуре сети 6G, чтобы увеличить на порядок спектральную эффективность передаваемых сигналов, учесть сильно меняющееся ослабление сигналов в канале за счет влияния атмосферы, малую дальность действия ТГц-каналов и зависимость затухания в канале от наличия прямой видимости (LoS).

Во-вторых, архитектура сети 6G в ТГц-диапазоне, которая будет состоять из распределенных и гетерогенных микробазовых станций, требует новых подходов к оценке ТГц-канала связи, обеспечения максимального покрытия терагерцовой сети и синхронизации системных ресурсов ТГц-каналов с другими полосами частот (ММДВ и ниже), используемыми в сети 6G.

В-третьих, ключевые услуги сетей 6G предъявляют значительно более строгие требования к надежности, времени ожидания и скорости, чем в сетях 5G. В свою очередь, выполнение этих требований подразумевает внедрение новых подходов к зондированию, оптимизации и планированию работы сети радиодоступа в реальном времени. В результате успешный переход к развертыванию сетей Интернета вещей на основе концепции IoE в ТГц-диапазоне потребует значительных преобразований обычного физического (PHY) уровня сети радиодоступа и сетевых процедур.

Требования к электронной компонентной базе и оборудованию ТГц-диапазона

Одной из самых больших проблем использования терагерцового спектра будет разработка приемопередатчиков, поскольку существующие конструкции приемопередатчиков сетей 5G миллиметрового диапазона не подходят для частот ТГц-диапазона в сетях 6G [18].

Использование полупроводниковых технологий ЭКБ за пределами 100 ГГц в суб-терагерцовом диапазоне, охватывающем верхнюю часть W-диапазона, на основе кремний-германий (SiGe), нитрида галлия (GaN), арсенида галлия (GaAs) и фосфида индия (InP) является одними из популярных вариантов компонентной базы для создания генераторов и детекторов ТГц-сигналов [17, 19]. Однако дальность передачи сигналов приемопередатчиков 6G, построенных на основе технологий ЭКБ GaN, GaAs и InP, пока недостаточна.

В табл.1 [16] и на рис.6 представлен обзор характеристик полупроводниковых технологий, способных работать в суб-ТГц и ТГц-диапазонах на частотах выше 100 ГГц.

Анализ этих данных показывает, что основными технологическими классами высокочастотных транзисторов в суб-ТГц и ТГц-диапазонах являются биполярные транзисторы с гетеропереходом (HBT), полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) и полевые транзисторы металл-оксид-полупроводник (MOSFET). Полевой транзистор MOSFET для работы на этих частотах обычно реализуется как кремний на изоляторе в технологии "металл-оксид-полупроводник" (КНИ КМОП, или SOI CMOS) (рис.6).

Доступные в настоящее время технологии интегральных схем еще недостаточно развиты или экономичны для передачи данных со скоростями в несколько Тбит/с на расстояние 1 км (см. рис.6). Так, скорость передачи данных в несколько десятков Гбит/с в диапазоне ниже 120 ГГц в пределах 10 м достигается при использовании CMOS. При использовании передатчика с ИС на основе технологии InP и антенн с высокой направленностью 51 дБи обеспечивает сопоставимая скорость на расстоянии до 1 км.

Ключевым параметром полупроводниковых элементов для интегральных схем MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) на основе технологии MOSFETявляется размер элемента CMOS, поскольку транзистор с меньшими габаритами элемента может поддерживать более высокие частоты. Как правило, схемы рассчитаны на работу ниже $f_{MAX}/3$, где f_{MAX} – частота, при которой коэффициент усиления по мощности транзистора равен единице.

Можно значительно приблизить рабочую частоту к f_{MAX}, но, в зависимости от технологии, это может привести к снижению энергоэффективности и усложнению конструкции. Другими важными свойствами материала являются минимальный коэффициент шума (NF_{min}) и напряжение пробоя (V_{br}), которые определяют чувствительность приемника и максимальную передаваемую мощность. Генерация мерцающего шума, эффекты памяти и поведение температуры не включены в табл.1, но их также следует учитывать. Максимальная передаваемая мощность и минимальный коэффициент шума ограничивают усиление системы. Были опубликованы исследования усилителей мощности на основе технологий GaAs, InP и SiGe, обеспечивающих выходную мощность более 10 дБм за пределами

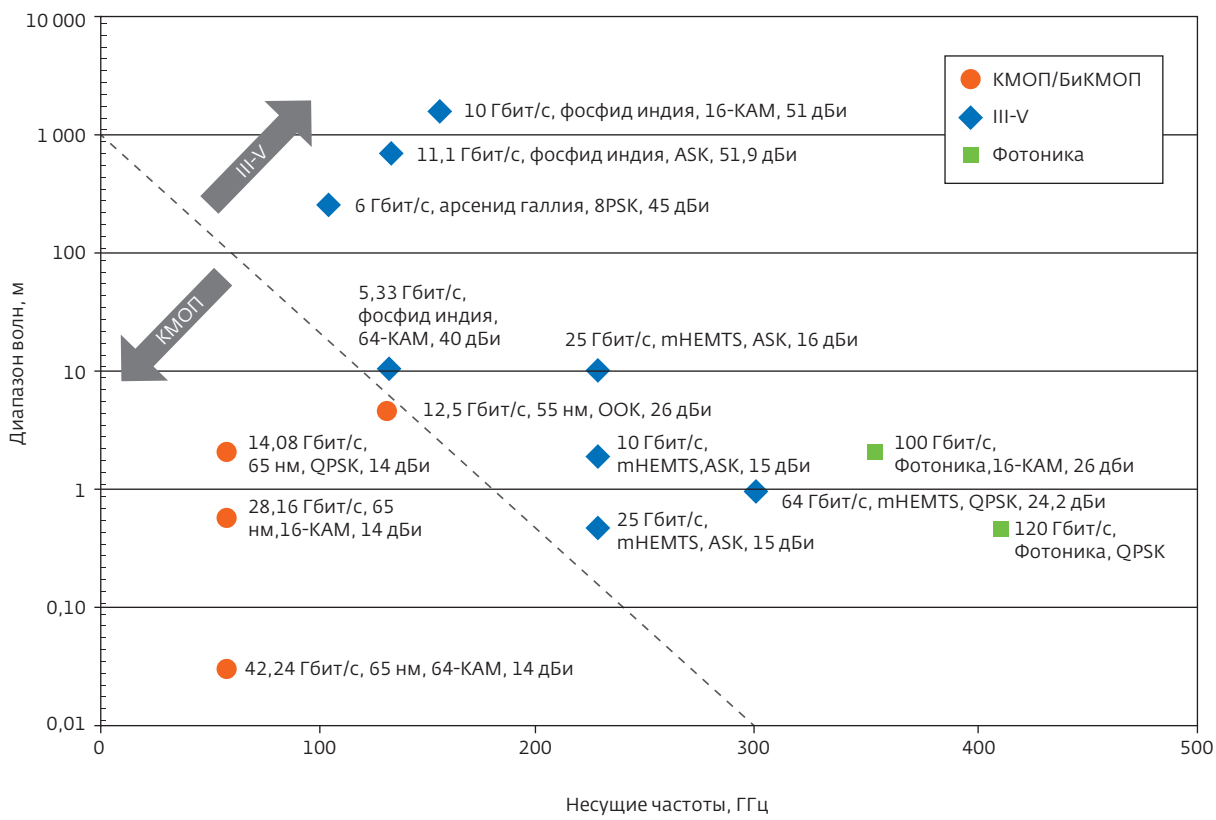

Рис.6. Характеристики полупроводниковых технологий [19]

130 ГГц. Технология арсенида галлия GaAs для псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов (pHEMT) обеспечивает высокое напряжение пробоя и низкий коэффициент шума, а также ожидается, что ЭКБ на основе арсенида галлия через несколько лет сможет поддерживать D-диапазон.

При использовании технологий арсенида галлия GaAs для метаморфических транзисторов с высокой подвижностью электронов (mHEMT), фосфида индия InP с технологиями псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов pHEMT и DHBT (биполярный транзистор с двойным гетеропереходом GaAs/InGaAsN/GaAs) могут поддерживать очень высокие частоты у ЭКБ, предназначенной для оборудования 6G. Эти технологии сегодня широко используются в аэрокосмических системах, но их

Таблица 1. Характеристики полупроводниковых технологий

Технология	Размер, нм	fMAX, ГГц	Vbr, В	Nfmin, дБ, для 50 ГГц	Произведен или стартап
GaAspHEMT	100	185	7	0,5	Готов
GaAsmHEMT	70	450	3	0,5	Стартап
GaAsmHEMT	35	900	2	1	Через год
InP HEMT	130	380	1	<1	Через год
InP HEMT	30	1200	1	<1	Через год
GaN HEMT	60	250	20	1	Через год
GaN HEMT	40	400	42	1,2	Через год
SOI SMOS	45	280	1	2-3	Готов
SiGe-HBT	55	400	1,55	1,5	Готов
SiGe-HBT	130	400	1,4	2	Готов
InP DHBT	250	650	4	3	Стартап
InP DHBT	130	1100	3		Через год

коммерческая доступность ограничена. При этом из-за их высоких характеристик они оказались ценными для предварительных разработок (стартапов) ЭКБ в D-диапазоне.

Кремниевые технологии, такие как интегральные схемы SOICMOS и SiGe-HBT, сегодня применимы до W-диапазона (от 92 до 114,5 ГГц), хотя максимальная выходная мощность ограничена из-за низкого напряжения пробоя кремния, а коэффициент шума хуже по сравнению с GaAs и технологией InP. Более новые поколения технологий SiGe / BiCMOS имеют f_{MAX} в диапазоне от 300 до 400 ГГц, дальнейшее увеличение f_{MAX} (выше 400 ГГц) находится в стадии изучения, однако, как показано на рис.6, технология nMOS (КНИ КМОП), по-видимому, имеет оптимум f_{MAX} на уровне 28 нм, поэтому может не догнать по своим возможностям технологию SiGe / BiCMOS.

В связи с этим разработчиками ЭКБ и оборудования мобильной связи предпринимаются постоянные усилия по решению указанных выше проблем и освоению ТГц-диапазона. Например, программа Агентства перспективных оборонных исследовательских проектов США (DARPA) "Технологии для смешанных сверхмасштабируемых интегральных схем" (T-MUSIC) направлена разработку транзистора для частот 400–600 ГГц с цифровой комплементарной технологией "металл-оксид-полупроводник" (КМОП) и исследует интеграцию схем SiGe HBT, CMOS/SOI и BiCMOS, а также создание усилителя мощности в полосе частот 500–750 ГГц [28].

Кроме того, от электронной промышленности потребуются новые конструкции для антенных решеток с высокой плотностью, чтобы преодолеть ограничения, связанные с очень короткой длиной волны и физическими размерами ВЧ-транзисторов, сравнимыми с расстоянием между элементами в терагерцовых решетках. Необходимо будет решить вопросы подавления чрезмерного затухания при распространении, характерного для частот терагерцового диапазона, а также такие вопросы, как высокая мощность, высокая чувствительность и низкий коэффициент шума при изготовлении приемопередатчиков с поддержкой ТГц-диапазона. Кроме того, приемопередатчики ТГц-диапазона ограничены по производительности с точки зрения мощности передачи (и расстояния).

Разработка приемопередатчиков для базовых и абонентских станций сетей 6G в терагерцовом диапазоне стала насущной необходимостью для вендоров на ближайшие годы. Проблема несовершенных характеристик оборудования приемопередатчиков, включая нелинейный усилитель, фазовый шум, ограниченный индекс модуляции [29] и т. д., может серьезно ухудшить качество передаваемых сигналов 6G. Также могут возникнуть проблемы с конструкцией антенн

и формами сигналов 6G, а также с энергоэффективной обработкой сигналов. Таким образом, новые приемопередающие технологии стали необходимы для изготовления современных терагерцовых передатчиков (аппаратных средств), особенно для средней и высокой части терагерцового диапазона (>300 ГГц) [17, 30]. Исследования показывают, что в новых конструкциях приемопередатчиков для устройств ТГц-диапазона могут использоваться как традиционная КМОП-технология, так и недавно созданные наноматериалы, такие как графен [19].

Заключение

Возросшие требования к скоростям передачи сигналов и сетевым задержкам для новых видов ключевых услуг в сетях 6G заставляют разработчиков оборудования радиодоступа 6G RAN подниматься в суб-ТГц и ТГц-диапазоны частот, для которых требуются разработки новой ЭКБ и методов управления радиочастотным спектром. Активное освоение этих диапазонов производителями современной ЭКБ показывает широкие возможности ее применения в суб-ТГц и ТГц-диапазонах, при этом, она имеет большие ограничения на использование в сетях 6G, интегрирующих территориально-распределенную компоненту мобильных сетей и воздушно-космическую компоненту на основе STIN-архитектуры.

Главной проблемой освоения суб-ТГц и ТГц-диапазонов частот для сетей 6G на ближайшие пять лет станет разработка эффективной ЭКБ, позволяющей обеспечивать мощностные и другие технические требования будущих сетей 6G.

ЭКБ для оборудования сетей 6G в зависимости от используемых диапазонов частот будет включать как электронные, так и фотонные компоненты, которые базируются на последних достижениях СВЧ-электроники и это потребует создания новой национально-ориентированной электронной промышленности, обеспечивающей достижения мирового уровня в производстве ЭКБ.

Литература

1. Регламент Радиосвязи. Женева: МСЭ, 2020.
2. BRAVE: Back to Single-carrier for beyond-5G communications above 90 GHz,Del. 1.1 – Preliminary regulation status, 2020.
3. **Jornet J.M.** and **Akyildiz I.F.** Channel modeling and capacity analysis of electromagnetic wireless nanonetworks in the Terahertz band // IEEE Trans. Wireless Commun. 2011. Vol. 10. No. 10. PP. 3211–3221.

4. **Xing Y.** and **Rappaport T.S.** Propagation measurement system and approach at 140 Ghz-moving to 6G and above 100 Ghz // IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM). IEEE, 2018. PP. 1–6.
5. **Abbasi N.A.**, **Molisch A.F.**, and **Zhang J.C.** Measurement of directionally resolved radar cross section of human body for 140 and 220 Ghz bands // IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. Workshops (WCNCW). IEEE, 2020, PP. 1–4.
6. ITU, Report ITU-R M.2417, Technical and operational characteristics of land-mobile service applications in the frequency range 275–450 GHz, No. v. 2017. , available at: https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2417.
7. ITU, Report ITU-R F.2416, Technical and operational characteristics and applications of the point-to-point fixed service applications operating in the frequency band 275–450 GHz, No. V. 2017, available at: https://www.itu.int/pub/R-REP-F.2416.
8. ITU, Report ITU-R SM.2450, Sharing and compatibility studies between land-mobile, fixed and passive services in the frequency range 275–450 GHz, July 2019, available at: https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2450–2019.
9. ETSI EN 302 217-2 V3.3.0 (2021-06). Fixed Radio Systems; Characteristics and requirements for point-to-point equipment and antennas.
10. ETSI GR mWT 008. Groupe Report.Analysis of Spectrum, License Schemes and Network Scenarios in the W-band.2019.
11. ERC Report 25/ The European table of frequency allocations and utilisations in the frequency range 9 kHz to 13000 GHz
12. Отчет 282 СЕРТ ЕСС: Радиоканалы "точка-точка" в диапазонах частот 92–114,25 ГГц и 130–174,8 ГГц
13. Пересмотренная Рекомендация СЕРТ ЕСС (14)01: Планы размещения радиочастотных каналов для систем фиксированной службы, работающих в полосе 92–95 ГГц
14. Рекомендация СЕРТ ЕСС (18)01: Планирование радиочастотных каналов/частотных блоков для систем фиксированной службы, работающих в полосах 92–94 ГГц, 94,1–100 ГГц, 102–109,5 ГГц и 111,8–114,25 ГГц
15. Рекомендация СЕРТ ЕСС (18)02: Планирование радиочастотных каналов/частотных блоков для систем фиксированной службы, работающих в полосах 130–134 ГГц, 141–148,5 ГГц, 151,5–164 ГГц и 167–174,8 ГГц.
16. White paper on RF enabling 6G – Opportunities and challenges from technology to spectrum. 6G Research Visions, No. 13.April 2021
17. **Huq K.M.S.**, **Busari S.A.**, **Rodriguez J.**, **Frascolla V.**, **Bazzi W.** et al. Terahertz-enabled wireless system for beyond-5G ultra-fast networks: A brief survey // IEEE Network. 2021. Vol. 33. No. 4. PP. 89–95.
18. **Alsharif A.H. Kelechi M.A.**, **Albreem S.A. Chaudhry M.S.** et al. Sixth generation (6G) wireless networks: Vision, research activities, challenges and potential solutions // Symmetry. 2020. Vol. 12. P. 676.
19. **Waliwander T.** THz – To Be or Not To Be in 6G? //Microwave Journal. May 2022. PP. 54–68.
20. **Marcus M.J.** WRC-19 issues: Agenda item 1.15 and the use of 275–450 GHz // IEEE Wireless Communications. 2016. Vol. 23. No. 6. PP. 2–3.
21. **Fournier E.** RSPG Work Programme for 2022 and beyond. RSPG, 2022.
22. **Rajatheva N.**, Atzeni I, Bicais S E. et al. Scoring the Terabit/s Goal:Broadband Connectivity in 6G //IEEE Open Journal of Communication Society. August 2020.
23. Рекомендация МСЭ-RP. 838-3 Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования. (Вопрос МСЭ-R 201/3).
24. **Chaccour C.**, **Soorki M.N.**, **Saad W.**, **Bennis M.** and **Popovski P.** // Risk-based optimization of virtual reality over terahertz reconfigurable intelligent surfaces // Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC), Dublin, Ireland. June. 2020.
25. **Huang C.**, **Hu S.**, **Alexandropoulos G.C.**, **Zappone A.**, **Yuen C.**, **Zhang R.**, **Di Renzo M.**, and **Debbah M.**, Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: Opportunities, challenges, and trends // IEEE Wireless Communications. 2020. Vol. 27. No. 5. PP. 118–125.
26. **Jung M.**, **Saad W.**, **Jang Y.**, **Kong G.**, and **Choi S.**, "Performance analysis of large intelligent surfaces (LISs): Asymptotic data rate and channel hardening effects," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 3, pp. 2052–2065, Jan. 2020.
27. **Тихвинский В.**, **Девяткин Е.** и др. Архитектура сетей 6G: Принципы и особенности построения. Часть 1 и 2 // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2022. № 3. С. 78–84; № 4. С. 44–49.
28. **Nagatsuma T.** Advances in terahertz communications accelerated by photonics technologie // Proc. OECC, Fukuoka, Japan. 2019. PP. 1–3.
29. **Oyeleke O. D.**, **Thomas S.**, **Idowu-Bismark O.**, **Nzerem P.** and **Muhammad I.** Absorption, diffraction and free space path losses modeling for the terahertz band // International Journal of Engineering and Manufacturing. 2020. Vol. 10. No. 8. PP. 417–431.
30. **Akyildiz I.F.**, **Jornet J.M.** and **Han C.** Terahertz band: Next frontier for wireless communicatio // Physical Communication. 2014. Vol. 12. PP. 16–32.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:

В.О. Тихвинский,
С.В. Терентьев,
В.А. Коваль,
Е.Е. Девяткин

Развитие сетей мобильной связи от 5G Advanced к 6G: проекты, технологии, архитектура

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 528 с.
ISBN 978-5-94836-662-3

Цена 1960 руб.

В книге рассмотрены перспективы эволюционного развития и стандартизации технологий мобильной связи пятого поколения 5G Advanced/IMT-2020 на пути к 6G/IMT-2030 международными организациями связи, представлены планы развития технологий 5G Advanced партнерским проектом 3GPP в релизах 17 и 18, проанализированы основные бизнес-модели услуг и индустриальные приложения в сетях 5G Advanced/IMT-2020, рассмотрены цепочки создания стоимости услуг 5G. Проведена оценка возможностей выделения частотных диапазонов для развития сетей 5G и 6G с учетом повестки дня ВКР-23, рассмотрены особенности построения и архитектура сети радиодоступа 5G RAN фазы 3 (релиз 17), виды сигналов, нумерология их формирования и частотные каналы, используемые в сетях радиодоступа 5G Advanced.

Показаны будущие изменения сценариев архитектуры и функций базовой сети 5G Core, технологии программно определяемых сетей SDN сети 5G и технологии виртуализации сетевых функций NFV, реализуемые в базовой сети 5G Core для управления и оркестрирования. Приведены технические и ЭМС-характеристики радиооборудования (базового и абонентского) сети радиодоступа 5G RAN для новой фазы эволюции технологий 5G Advanced. Рассмотрены вопросы построения сети синхронизации в 5G Advanced.

Рассмотрены возможности построения фрагмента сетей 5G и 6G на спутниках и высокоподнятых летающих платформах HAPS, железнодорожной сети FRMCS на базе 5G Advanced, их архитектура, использование алгоритмов и технологий искусственного интеллекта в сетевых элементах 5G Advanced.

Представлено видение и будущий облик мобильной связи поколения 6G/IMT-2030, его ключевые услуги, перспективы освоения 6G терагерцевого диапазона волн в интересах внедрения голографической связи, виртуальной реальности, человекоцентричных приложений и Интернета вещей.

Для специалистов, студентов и магистрантов инфокоммуникационных специальностей университетов.

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphera.ru
sales@technosphera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphera.ru