

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ терагерцового диапазона частот в сетях 6G

Часть 1

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 / syu1969@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: 10.22184/2070-8963.2022.107.7.44.50

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.

ВВЕДЕНИЕ

Поколение мобильной связи 6G будет характеризоваться по сравнению с сетями предыдущего поколения на порядок более высокими требованиями к скорости передачи данных, достигающими 1 Тбит/с, и уменьшением задержек в сети радиодоступа до 10 нс, что можно реализовать использованием сигнально-кодовых конструкций в суб-терагерцовом и терагерцовом диапазонах волн. Любой абонент 6G должен будет получать скорость передачи данных 1 Гбит/с в любой точке покрытия сети.

Появление новых видов ключевых услуг, таких как человеко-центричные сервисы (HCS) и услуги мобильной широкополосной связи с высокой надежностью и малой задержкой (MBRLLC), потребуют использования сигналов

с шириной полосы излучения 1 ГГц и более для обеспечения пиковой скорости передачи данных более 1 Тбит/с. Это приведет к необходимости использования еще более высоких диапазонов частот, чем миллиметровые диапазоны сетей 5G Advanced, таких как суб-терагерцовые и терагерцовые диапазоны.

Диапазон терагерцовых волн (ТГц) определяется Международным Союзом Электросвязи, 3GPP и другими международными организациями связи как интервал радиочастотного спектра от 300 ГГц до 3 ТГц. Термин "суб-терагерцовый диапазон" используется для описания спектра частот от 100 до 300 ГГц. Действующий в настоящее время Регламент радиосвязи (PP) МСЭ [1] обеспечивает международную правовую основу для управления радиочастотным спектром

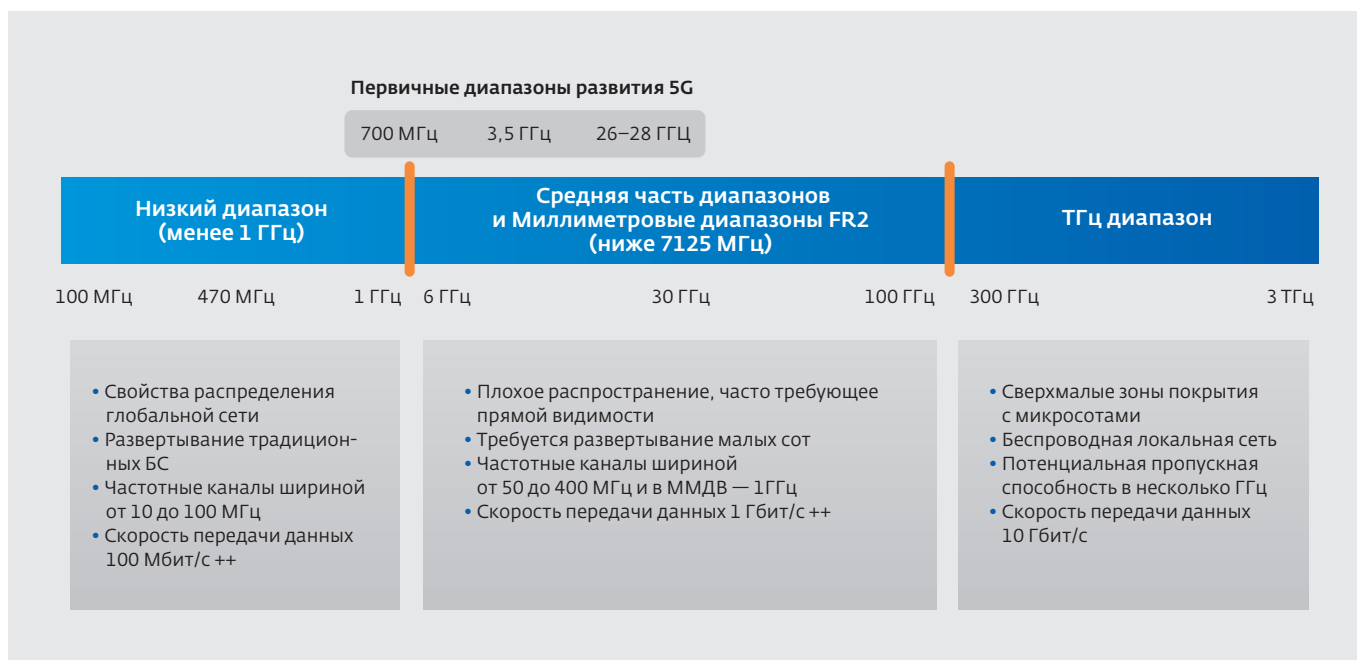


Рис.1. Использование различных частотных диапазонов в сетях 5G и 6G

до 3 ТГц с согласованным этим Союзом распределением частот до 275 ГГц.

Впервые решение о распределении частот между 90 и 275 ГГц было принято еще на ВКР-2000 в рамках пунктов повестки дня 1.16 и 1.17 [2]. Это решение позволяет заинтересованным пользователям спектра, включая сети 6G, использовать доступные частоты миллиметрового (ММДВ) и суб-терагерцового диапазонов волн для обеспечения предоставления широкого набора услуг радиосвязи (рис.1). На данном этапе управление использованием спектра в суб-ТГц и ТГц-диапазонах для нужд сетей 6G сосредоточено в области административных мер и методов, регулирующих их использование на международном и национальном уровнях.

Анализ международного регулирования использования диапазона суб-ТГц

Анализ исследований Сектора радиосвязи МСЭ-Р [3–5] показал, что совместное использование спектра 90–275 ГГц с высоким поглощением в атмосфере Земли для РЭС сетей 6G и спутниковой службы исследования Земли (ССИЗ) (пассивной), а также РРЛ и РРС фиксированной службы возможно в этих полосах частот, но при введении ограничений на использование РЭС фиксированной службы и 6G для защиты от помех пассивных космических систем (датчиков).

Для обеспечения такой защиты национальными администрациями связи могут быть установлены

координационные зоны для защиты от помех со стороны РЭС 6G и фиксированной службы вокруг астрономических обсерваторий с РЭС, использующими диапазоны ММДВ и суб-ТГц. Радиусы координационных зон могут достигать 100 км.

Участки спектра, которые не могут использоваться сетями 6G, как правило, ограничены полосами "пассивных" радиослужб, то есть полосами, указанными в примечании 5.340 РР, которое запрещает все излучения в определенных полосах частот. Применительно к работе сетей 6G в диапазоне 90–275 ГГц данное примечание затрагивает следующие интервалы: 86–92 ГГц, 100–102 ГГц, 109,5–111,8 ГГц, 114,25–116 ГГц, 148,5–151,5 ГГц, 164–167 ГГц, 182–185 ГГц, 190–191,8 ГГц, 200–209 ГГц, 226–231,5 ГГц и 250–252 ГГц.

Полосы частот, доступные фиксированной и подвижной службам, которые обеспечивают основу для развития наземной беспроводной связи 6G в диапазоне 90–275 ГГц определены в следующих частотных полосах [3–8]: 92–94 ГГц, 94,1–100 ГГц, 102–109,5 ГГц, 111,8–114,25 ГГц, 122,25–123 ГГц, 130–134 ГГц, 141–148,5 ГГц, 151,5–164 ГГц, 167–174,8 ГГц, 191,8–200 ГГц, 209–226 ГГц, 231,5–235 ГГц, 238–241 ГГц, 252–275 ГГц. Сравнительная картина объемов доступного спектра в полосах 90–275 ГГц показана на рис.2.

Анализ полосы частот от 90 до 200 ГГц показывает, что почти 54% ее ресурса будут доступны для использования в сетях 6G.

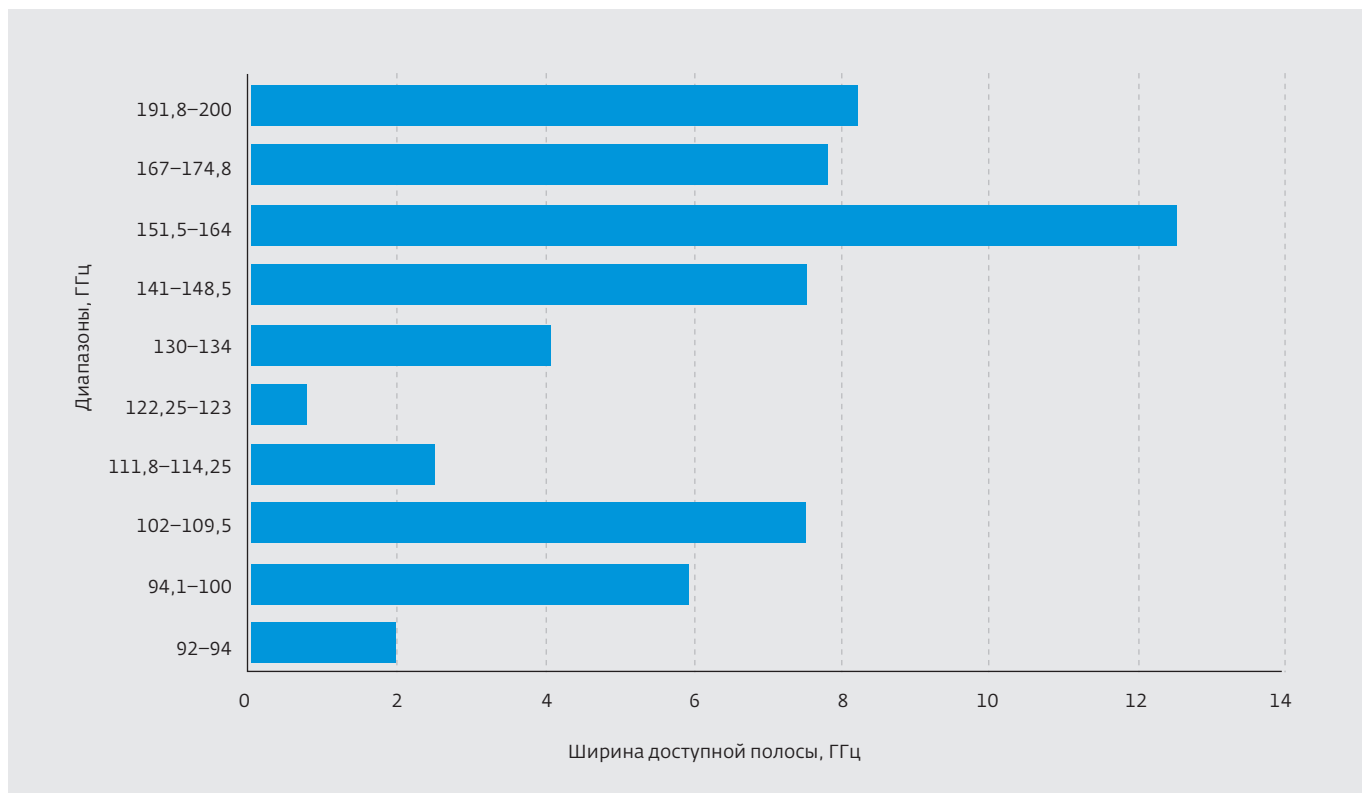


Рис.2. Объем доступного частотного ресурса для сетей 6G в полосе 90–200 ГГц

Эффективные регуляторные решения по управлению использованием спектра в сетях 6G на европейском уровне основываются на распределении частот суб-ТГц, установленном в таблице международного распределения спектра PP (Статья 5) [1]. Разработка и реализация на национальном уровне регуляторных решений по управлению использованием спектра обусловлены рыночным спросом на спектр в будущих сетях 6G. Эти решения должны определять условия для обеспечения совместимости с другими службами радиосвязи и защиты пассивных служб, работающих в соседних полосах частот ТГц-диапазона.

Исследования в рамках СЕРТ на основе требований, установленных документами ETSI EN 302 217-2 [9] и ETSI GR mWT 008 [10] в виде мер по гармонизации использования спектра для систем фиксированной службы в диапазонах частот 92–114,25 ГГц (W-диапазон) и 130–174,8 ГГц (D-диапазон), показали, что в W-диапазоне будет доступно более 16 ГГц спектра и затухание сигналов в газах в полосе W-диапазона является почти плоским, как и затухание в дожде.

Участки полос частот 122–123 ГГц и 244–246 ГГц согласно европейским нормам регулирования

использования спектра [11] могут задействоваться для устройств малого радиуса действия SRD в соответствии с техническими условиями Рекомендации ERC/REC 70-03 (Приложение 1) и требованиями ETSI EN 305 550.

Исследования СЕРТ по использованию спектра в диапазонах частот 92–114,25 ГГц (W-диапазон) и 130–174,8 ГГц (D-диапазон) фиксированной службой были завершены и сформулированы в:

- Отчете 282 СЕРТ ЕСС: Радиоканалы "точка-точка" в диапазонах частот 92–114,25 ГГц и 130–174,8 ГГц [12];
- пересмотренной Рекомендации СЕРТ ЕСС (14)01: Планы размещения радиочастотных каналов для систем фиксированной службы, работающих в полосе 92–95 ГГц [13];
- Рекомендации 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 [14];
- Рекомендации 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 [15].

Следующие установленные в [25–28] основные особенности использования спектра в W-диапазоне и D-диапазоне могут быть распространены на РЭС сетей 6G:

- использование очень широкой полосы пропускания, позволяющей снизить стоимость трафика в зоне работы мультисервисного провайдера;
- возможность более простого развертывания линий связи вместо транспортных сетей на основе проводной связи;
- возможность обеспечения для РЭС высокой безопасности из-за низкой вероятности помех и перехвата сигналов.


Планы размещения частотных каналов, определены в Рекомендациях СЕРТ ЕСС (18)01 [14] и Рекомендации ЕСС (18)02 [15]. Они учитывают гибкое использование дуплексных FDD/TDD-разносов с непрерывным растром частотных интервалов для каналов шириной 250 МГц без необходимости специального определения парного или непарного использования. Никаких строгих ограничений на количество агрегированных каналов (т.е. никаких ограничений на максимальную ширину полосы канала) в ходе разработки СЕРТ не определено. При формировании частотных каналов в сетях 6G для агрегации несущих (CA) могут быть использованы компонентные несущие как из W-, так и из D-диапазона, чтобы улучшить пропускную способность и доступность каналов связи.

В отчете ЕСС 282 [12] рассмотрена система фиксированной связи с высокой пропускной способностью в E-диапазоне (71–76 и 81–86 ГГц), позволяющая передавать потоки данных со скоростью 1 Гбит/с в канале шириной около 250 МГц с модуляцией 128-QAM. На основании ЕСС СЕРТ 282 сделан

вывод, что в полосе W-диапазона доступно для использования около 15 ГГц спектра, а в полосе D-диапазона – более 30 ГГц. Также показана возможность использования фиксированного беспроводного доступа с протяженностью линий до 1 км в линиях связи. Короткие интервалы линии связи с высокой плотностью каналов длиной до 200 м в D- и W-диапазонах могут использоваться для мобильной транспортной сети 5G с пропускной способностью более 10 Гбит/с. В отчете [12] рассмотрено приложение для внутреннего подключения центра обработки данных (межсерверное) с короткими интервалами (порядка десятков м), обеспечивающими пропускную способность около 40 Гбит/с, а также возможность создания каналов с пропускной способностью порядка 100 Гбит/с мобильной транспортной сети 5G и в будущем для сетей 6G. Для моделирования РЭС, работающих в D-диапазоне, в отчете ЕСС 282 учитывается максимальное усиление антенны до 40 дБи и выходная мощность +5 дБм.

Что касается совместимости с пассивными радиослужбами, выводы и методики в отчете ЕСС 124 были экстраполированы в Рекомендациях ЕСС (18)01 (D-диапазон) и ЕСС (18)02 (W-диапазон), чтобы установить маску нежелательных излучений фиксированной службы для обеспечения защиты РЭС ССИЗ (пассивной). Этот подход уже применялся к полосе частот 92–95 ГГц фиксированной службы в Рекомендации ЕСС (14)01.


Нежелательные излучения передатчиков фиксированной службы, которые попадают в соседние пассивные полосы (т. е. полосы, к которым применяется п. 5.340 РР), следует ограничивать до уровня -41 дБВт/100 МГц на границе частот между РЭС фиксированной службы и пассивными службами (радиоастрономической службой (РАС) и службой космических исследований (СКИ))



ИНФОТЕЛ
Интеллект. Опыт. Результат.

ONEPLAN

**ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И УСЛУГИ
ПО ПЛАНИРОВАНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ
СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ
И ФИКСИРОВАННОЙ СВЯЗИ**



step@rpls.ru
+7 812 590-77-11
www.rpls.ru

в диапазоне 1 ГГц в полосе пассивной службы вплоть до уровня -55 дБВт/100 МГц, который применяется ко всей оставшейся части пассивной полосы (см. Приложение 5 Рекомендации ЕСС (18)01 и Приложение 4 Рекомендации ЕСС (18)02).

МЕЖДУНАРОДНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТГц-диапазона

Необходимым условием для глобального распределения терагерцового диапазона и использования его для связи является доступность спектра.

Радиочастотный спектр от 275 ГГц и до 3000 ГГц пока не распределен службам радиосвязи, поэтому национальные администрации не обязаны защищать использование этого участка спектра на международном уровне. Вследствие этого данный участок спектра тщательно исследуется для будущего использования сетями 6G [16–19].

Регулирование спектра примечанием п.5.565 РР охватывает диапазоны 275–1000 ГГц и 1000–3000 ГГц. Несколько полос частот в пределах 275–1000 ГГц определены для использования

администрациями связи для приложений пассивных служб (РАС, ССИЗ, СКИ), что обеспечивает международное признание этих полос частот для научных целей.

РР в соответствии с требованиями п. 5.565 не препятствует использованию спектра в полосе 275–1000 ГГц радиослужбами, но настоятельно призывает национальные администрации, желающие сделать частоты в этом диапазоне доступными для различных приложений активных служб, принять все практически возможные меры для защиты идентифицированных пассивных служб от вредных помех. Все частоты в диапазоне 1000–3000 ГГц могут использоваться как активными, так и пассивными службами.

Исследования, проведенные в рамках пункта 1.15 повестки дня ВКР-19 [20], определили возможное использование полос частот 275–450 ГГц администрациями связи для приложений сухопутной подвижной и фиксированной служб. В диапазоне частот от 252 до 450 ГГц действующим Регламентом радиосвязи определено использование 160 ГГц спектра. Полоса частот 252–275 ГГц распределена фиксированной службе и сухопутной подвижной службе на первичной основе. По итогам конференции ВКР-19 (согласно пункта 1.15 повестки дня) были утверждены новые возможности использования спектра для приложений сухопутной подвижной и фиксированной служб в полосах частот 275–296 ГГц, 306–313 ГГц, 318–333 ГГц и 356–450 ГГц. В полосах частот 275–296 ГГц, 306–313 ГГц, 318–323 ГГц, 327–333 ГГц, 356–371 ГГц, 388–424 ГГц и 426–442 ГГц определены условия для обеспечения защиты радиоастрономических станций от РЭС сухопутной подвижной и фиксированной служб (минимальные расстояния разнеса и/или углы наклона антенн), учитывающие особенности их эксплуатации.

Текущая подготовка к следующей ВКР-23 включает новые исследования возможностей и условий совместного использования сетей 5G и 6G для частот выше 71 ГГц, включая также полосы 100–102 ГГц, 116–122,25 ГГц, 148,5–151,5 ГГц, 174,8–191,8 ГГц, 226–231,5 ГГц и 235–238 ГГц. Кроме того, к ВКР-23 проводятся исследования для определения конкретных условий приложений наземной подвижной и фиксированной службы для обеспечения защиты приложений ССИЗ (пассивной) в полосах частот 296–306 ГГц, 313–318 ГГц и 333–356 ГГц в соответствии с Резолюцией 731 ВКР-19.

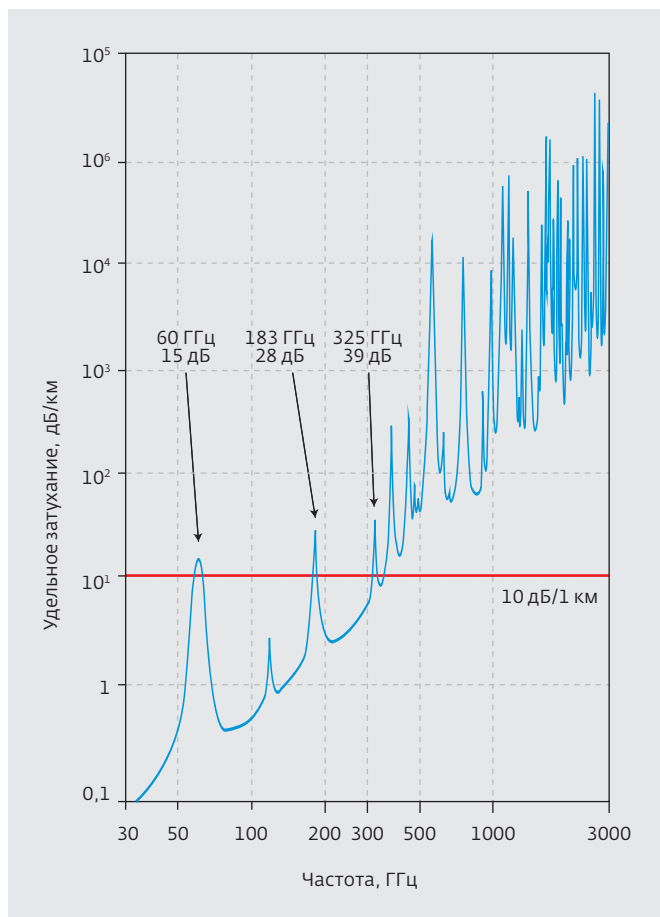


Рис.3. Удельное затухание сигналов в ММДВ- и ТГц-диапазонах [16]

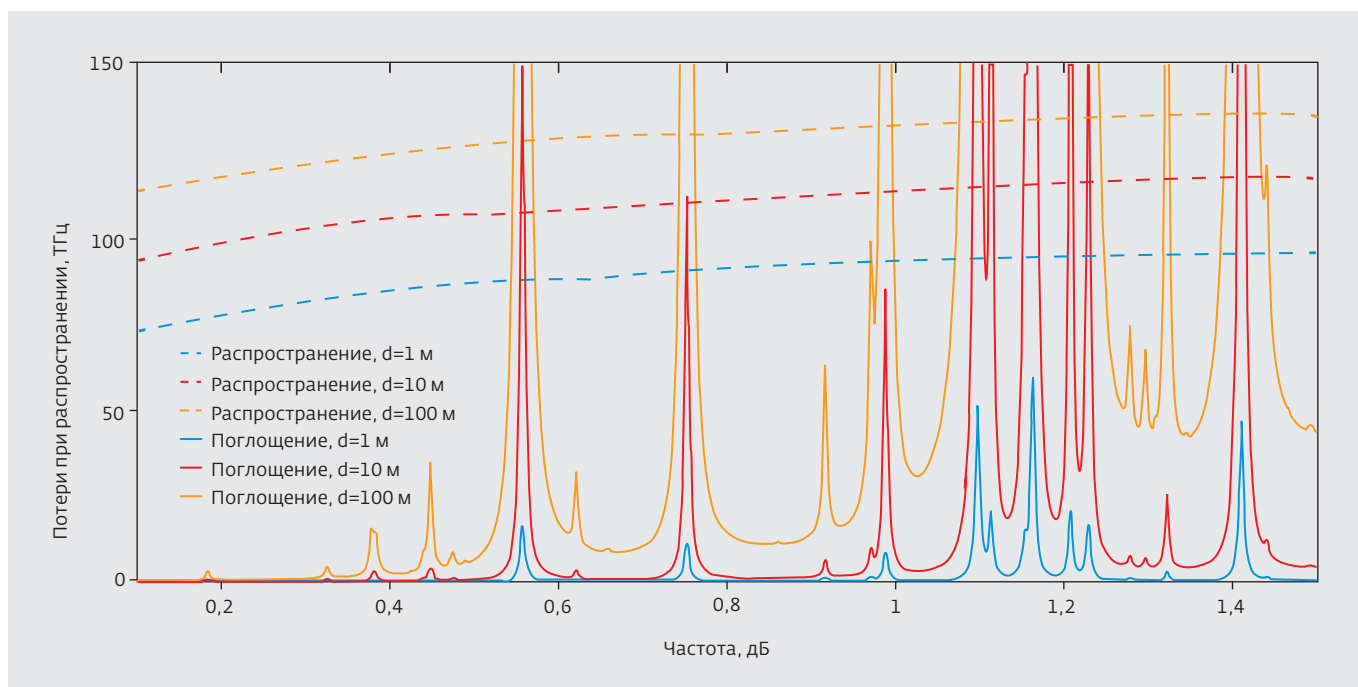


Рис.4. Потери при распространении сигналов (штриховые линии) и уровни поглощения в суб-ТГц-диапазоне [22]

В интересах глобального использования в полосе частот 252–325 ГГц Ассоциация IEEE сформировала рабочую группу IEEE 802.15.3d для разработки сетей беспроводного доступа Wi-Fi и в 2017 году выпустила первый международный стандарт беспроводной связи для диапазона частот 250–350 ГГц с новым физическим уровнем (PHY), обеспечивающим скорость передачи данных 100 Гбит/с с полосой пропускания канала от 2 до 70 ГГц [16]. Группа политики в области спектра RSPG Европейской комиссии в 2022 году создала рабочий вопрос для решения задач использования суб-терагерцового диапазона [21].

Таким образом, проведенный выше анализ распределения спектра в ТГц-диапазоне и управления использованием радиочастотного спектра в сетях 6G показал, что на ближайшее время основным методом управления использованием РЧС станут административные меры регулирования его использования на международном и национальном уровнях в виде выделения и закрепления за сетями 6G участков спектра ТГц-диапазона, обеспечивающих индивидуальный доступ к спектру, а в отдельных случаях – ЭМС и совместное использование с РЭС других РЭС радиослужб (радиотелевизионной фиксированной службы, РАС, ССИЗ, СКИ и устройств малого радиуса действия).

Условия распространения сигналов в ТГц-диапазоне

Покрываемость мобильных сетей 6G в ТГц-диапазоне будет ограничено применением базовых станций с малым и сверхмалым радиусом действия из-за ослабления сигналов в атмосфере Земли и гидрометеорах. Ослабление ТГц-волн в атмосфере растет с увеличением используемой частоты сигналов. Если затухание в атмосфере превышает 10 дБ на расстоянии 1 км, то беспроводная связь в сети 6G для радиусов сот в единицы км будет крайне затруднена. Пики затухания сигналов, как показано на рис.3, будут наблюдаться в полосах частот 60 ГГц из-за поглощения в кислороде и в диапазонах 183 ГГц и 325 ГГц из-за паров воды в атмосфере Земли (молекул H_2O).

Пример изменения потерь сигнала при распространении на различные расстояния в условиях прямой видимости между базовой станцией и абонентской станцией 6G в суб-ТГц-диапазоне (0,2–1,4 ТГц) и уровни поглощения сигнала на соответствующих расстояниях показаны на рис.4.

Суб-терагерцовый диапазон обладает значительным затуханием сигналов из-за влияния дождя, которое имеет почти постоянное удельное ослабление на частотах выше 100 ГГц с потерями

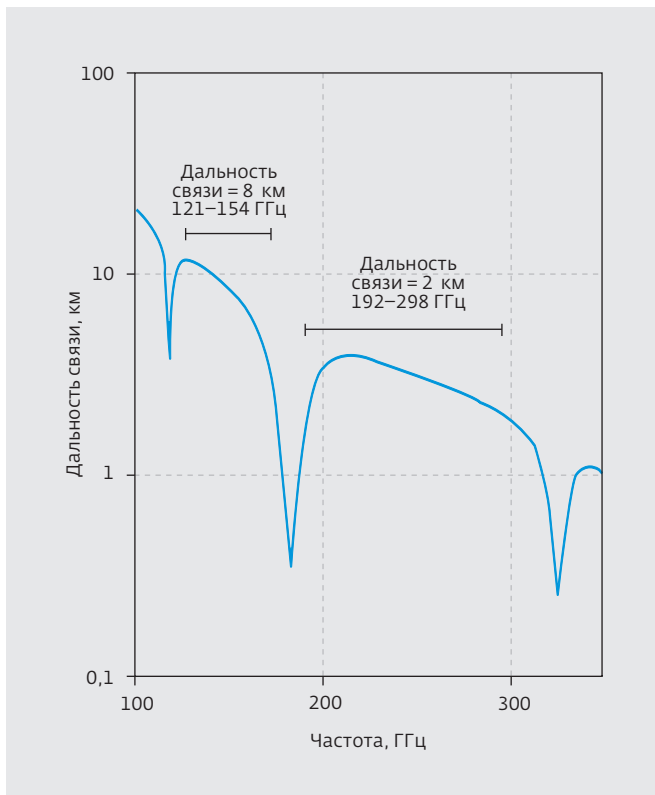


Рис.5. Дальности связи в окнах прозрачности в суб-ТГц- и ТГц-диапазонах [16]

от 0,8 до 50 дБ/км в зависимости от интенсивности дождя в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.838-3 [23].

Окно прозрачности ТГц-диапазона в полосе частот между 252 ГГц и 296 ГГц может обеспечивать дальность связи от базовой станции сети 6G, не превышающую 2 км, как показано на рис.5. При этом ослабление за счет влияния атмосферы Земли составляет 10 дБ [16].

При использовании в сетях 6G диапазона частот между 192 и 298 ГГц дальности связи в сетях могут составлять более 2 км, а при задействовании диапазона частот 121–154 ГГц – более 8 км. Затухание в атмосфере в ТГц-диапазоне превышает 10 дБ/км на всех частотах выше 351 ГГц. Следует также отменить, что дальность связи в сетях 6G будет уменьшаться, когда будут наблюдаться осадки, например, дождь.

Помимо обеспечения ограниченных дальностей связи и чрезвычайно высоких скоростей передачи данных, квазиоптическая природа ТГц-диапазонов частот имеет многообещающие возможности для функций зондирования, визуализации и позиционирования (3CLP) в сетях 6G, которые активно исследуются. Фактически,

именно ТГц-диапазон стал привлекательным для услуг 3CLP в сетях 6G в результате влияния нескольких факторов.

Во-первых, в отличие от обычных полос частот, используемых для визуализации (например, рентгеновских лучей), в этой области присутствует неионизирующее излучение.

Во-вторых, в отличие от оптических каналов, радиоканалы с высокой чувствительностью ТГц-диапазона работают более надежно.

В-третьих, с точки зрения связи, ТГц-диапазон может поддерживать в сети 6G различные скорости передачи данных: от средней (10 Гбит/с) до сверхвысокой (1 Тбит/с).

Таким образом, исходя из свойств уже используемой в сетях мобильной связи 2G–5G нижней части спектра (диапазоны частот ниже 6 ГГц и субмиллиметровый диапазон), которая обеспечивает передачу данных со средними скоростями, растущий интерес для использования в сетях 6G вызывает верхняя часть диапазонов спектра (диапазон суб-ТГц и ТГц). Эта часть спектра обеспечивает высокую скорость передачи данных и зондирование с высоким разрешением, но при этом ее использование приводит к уменьшению дальности связи.

В настоящее время рассматриваются четыре направления решения критической проблемы ограничения дальности связи в ТГц-диапазоне, а именно: проектирование физического уровня с учетом расстояния, использование антенн ultra-massive MIMO [24], отражающих рефлекторных решеток [25] и интеллектуальных отражающих поверхностей RIS [26].

Кроме того, использование для большинства услуг 6G суб-ТГц и ТГц-диапазонов может помочь решить проблему нехватки спектра для беспроводной связи, которая наблюдается в полосах ниже 6 ГГц. Таким образом, учитывая особые преимущества, которые могут быть получены для услуг связи, зондирования и формирования изображений в ТГц-диапазоне, данный диапазон будет активно осваиваться в интересах развития сетей 6G. Одновременное использование различных диапазонов в этих сетях позволяет совместно использовать ресурсы, обеспечивает местоопределение абонента при оказании услуг связи с высоким разрешением до 1 см в ТГц-диапазоне. Такие сценарии не только обеспечивают более высокую эффективность использования спектра, но и открывают путь для новых возможностей, вытекающих из выполнения задач скоординированного зондирования и связи. ■



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, 2022. – 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 поправки 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