

МСЭ-R
Сектор радиосвязи МСЭ

Отчет МСЭ-R SM.2352-1
(07/2022)

**Тенденции в области технологий
активных служб в диапазоне частот
275–3000 ГГц**

Серия SM
Управление использованием спектра



Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу <https://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Отчетов МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу <https://www.itu.int/publ/R-REP/ru>)

Серия	Название
VO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра

Примечание. – Настоящий Отчет МСЭ-R утвержден на английском языке Исследовательской комиссией в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2025 г.

© ITU 2025

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

ОТЧЕТ МСЭ-R SM.2352-1

**Тенденции в области технологий активных служб
в диапазоне частот 275–3000 ГГц**

(Вопрос МСЭ-R 237/1)

(2015-2022)

Сфера применения

В настоящем Отчете рассматриваются тенденции в области технологий активных служб в диапазоне частот 275–3000 ГГц. Целью настоящего Отчета является предоставление технической информации для подготовки исследований совместного использования частот и совместимости между активными и пассивными службами, а также между активными службами в диапазоне частот 275–3000 ГГц.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

1	Введение.....	3
2	Свойства, характеристики и типовые применения в диапазоне ТГц	4
2.1	Обзор диапазона частот выше 275 ГГц.....	4
2.2	Характеристики диапазона выше 275 ГГц.....	5
2.3	Типовые активные применения ТГц-диапазона.....	5
3	Регламентарная информация.....	7
4	Беспроводная связь ТГц	8
4.1	Возможные случаи использования систем связи ТГц.....	8
4.2	Технологии приемников и передатчиков ТГц.....	14
5	Зондирование и формирование изображения	19
5.1	Метод генерации ТГц.....	19
5.2	Камеры диапазона ТГц.....	22
5.3	Спектроскопия.....	24
5.4	Неразрушающие испытания.....	25
5.5	Применения ТГц-радаров.....	28
6	Интегрированные системы зондирования и связи (ISAC) в сети радиодоступа	32
7	Деятельность, касающаяся терагерцевой области, проводимая в рамках разработки международных стандартов	35
8	Резюме.....	35
9	Справочные документы.....	36

Сокращения и акронимы

ATR	Attenuated total reflection		Ослабленное полное отражение
BER	Bit error ratio		Коэффициент ошибок по битам
BNA	N-Benzyl-2-Methyl-4-Mitroaniline		N-бензил-2-метил-4-митроанилин
BWO	Backward-wave oscillator		Генератор обратной волны
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor	КМОП	Комплементарный металлооксидный полупроводник
D2D	Device-to-device		Связь между устройствами
DAST	Diethylaminosulfur Trifluoride		Трифторид (диэтиламино) серы
DFG	Difference frequency generation		Генерация разностной частоты
EVM	Error vector magnitude		Величина вектора ошибки
FEL	Free-electron laser		Лазер на свободных электронах
FM-CW	Frequency modulated continuous wave		Частотно-модулированные непрерывные сигналы
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy		Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье
GaAs	Gallium Arsenide		Арсенид галлия
HBT	Heterojunction bipolar transistor		Биполярный транзистор с гетеропереходом
HEMT	High electron mobility transistor		Транзистор с высокой подвижностью электронов
IMPATT	Impact ionization avalanche transit-time		Лавинно-пролетный диод
InP	Indium Phosphide		Фосфид индия
ISAC	Integrated sensing and communication		Интегрированные зондирование и связь
ISAR	Inverse synthetic aperture radar		Радар с инверсной синтезированной апертурой
LFMCW	Linear frequency modulated continuous wave		Непрерывный сигнал с линейно-частотной модуляцией
LoS	Line of sight		Линия прямой видимости
LT-GaAs	Low temperature grown Gallium Arsenide		Низкотемпературный арсенид галлия
MMIC	Monolithic microwave integrated circuit		Монолитная интегральная схема СВЧ-диапазона
NDT	Non-destructive testing		Неразрушающие испытания; неразрушающий контроль
NEP	Noise equivalent power	ЭМШ	Эквивалентная мощность шума
NFC	Near field communication		Связь в ближнем поле
NLoS	Non line of sight		Вне прямой видимости
QAM	Quadrature amplitude modulation		Квадратурная амплитудная модуляция
QCL	Quantum cascade laser		Квантово-каскадный лазер

RTD	Resonant tunnelling diode		Резонансный туннельный диод
SAR	Synthetic aperture radar		Радар с синтезированной апертурой
TDS	Time domain spectroscopy		Спектроскопия с разрешением во времени
TNNNET	Tunnel injection transit-time		Лавинно-пролетный диод с туннельной инжекцией носителей
THz	Terahertz	ТГц	Терагерц
UTC-PD	Uni-traveling-carrier photodiode		Фотодиод с одинаковыми носителями заряда
V2V	Vehicle-to-vehicle		Связь между транспортными средствами
WLAN	Wireless local area network		Беспроводная локальная сеть

Соответствующие Рекомендации и Отчеты МСЭ-R

Рекомендация МСЭ-R P.676 – Затухание в атмосферных газах и связанное с ним воздействие

Рекомендация МСЭ-R P.838 – Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования

Рекомендация МСЭ-R P.840 – Ослабление из-за облачности и тумана

Отчет МСЭ-R F.2107 – Характеристики и применения систем фиксированной беспроводной связи, действующих в диапазонах частот между 57 ГГц и 134 ГГц

Отчет МСЭ-R F.2416 – Технические и эксплуатационные характеристики и использование применений фиксированной службы, работающих в полосе частот 275–450 ГГц

Отчет МСЭ-R M.2417 – Технические и эксплуатационные характеристики применений сухопутной подвижной службы, работающих в диапазоне частот 275–450 ГГц

Отчет МСЭ-R SM.2450 – Исследования совместного использования частот и совместимости между сухопутной подвижной службой, фиксированной службой и пассивными службами в полосе частот 275–450 ГГц

1 Введение

Полосы частот выше 275 ГГц не распределены конкретным службам, но определены для применений пассивных служб, а также сухопутной подвижной и фиксированной служб в Регламенте радиосвязи (РР). Продолжается изучение регулирования использования спектра в отношении частот выше 3000 ГГц в соответствии с Резолюцией 118 (Марракеш, 2002 год). На Всемирной конференции радиосвязи 2012 года (ВКР-12) в пункт 5.565 РР были внесены поправки в целях определения в этом диапазоне полос частот для использования администрациями для применений пассивных служб, таких как радиоастрономическая служба, спутниковая служба исследования Земли (пассивная) и служба космических исследований (пассивная), хотя использование диапазона 275–1000 ГГц пассивными службами не исключает использования этого диапазона активными службами.

На ВКР-19 было утверждено добавление к РР пункта 5.564А, в котором полосы частот 275–296 ГГц, 306–313 ГГц, 318–333 ГГц и 356–450 ГГц определены для использования администрациями, внедряющими применения сухопутной подвижной и фиксированной служб, когда не требуется каких-либо особых условий для защиты применений спутниковой службы исследования Земли (пассивной), и указано, что полосы частот 296–306 ГГц, 313–318 ГГц и 333–356 ГГц могут использоваться только применениями фиксированной и сухопутной подвижной служб, когда в соответствии с Резолюцией 731 (Пересм. ВКР-19) определены конкретные условия для обеспечения защиты применений спутниковой службы исследования Земли (пассивной).

В 2013 году был разработан и утвержден Вопрос МСЭ-R 237/1 "Технические и эксплуатационные характеристики активных служб, работающих в полосе частот 275–1000 ГГц", с тем чтобы побудить администрации изучать технические и эксплуатационные характеристики активных служб в диапазоне частот 275–1000 ГГц. Ожидается, что наряду с исследованием технических и эксплуатационных

характеристик будут проведены исследования совместного использования частот активными и пассивными службами, а также между активными службами с учетом этих характеристик в соответствии с новым Вопросом МСЭ-R 237/1.

Благодаря прогрессу в области технологий выше 275 ГГц, достигнутому в последнее время, интегрированные устройства и каналы, работающие выше 275 ГГц, позволяют нам внедрять такие сложные применения, как спектроскопия, формирование изображения, неразрушающие испытания и камера, работающая в терагерцевом диапазоне. Хотя преимущества таких высоких частот заключаются в возможности использовать сверхширокую ширину полосы, что недостижимо в микроволновом и миллиметровом частотных диапазонах, пока эти преимущества не используются для развития сверхвысокоскоростных беспроводных систем связи и других активных систем.

Наряду с прогрессом, достигнутым в области технологий ТГц, комитет IEEE 802 учредил целевую группу IEEE 802.15.3d, разработавшую в 2017 году стандарт IEEE 802.15.3d-2017. Теперь постоянный комитет по ТГц-частотам IEEE 802.15 отвечает за отслеживание и обсуждение дальнейших перспективных возможностей в отношении стандартов IEEE 802.15 в области ТГц-связи.

В настоящем Отчете дается обзор тенденций в технологиях активных систем, исследуемых в диапазоне частот выше 275 ГГц, и ставится задача предоставления технической и регламентарной информации для подготовки исследований совместного использования частот и совместимости. Технологии, обсуждаемые в настоящем Отчете, относятся к областям беспроводной связи, зондирования и формирования изображения в диапазоне ТГц.

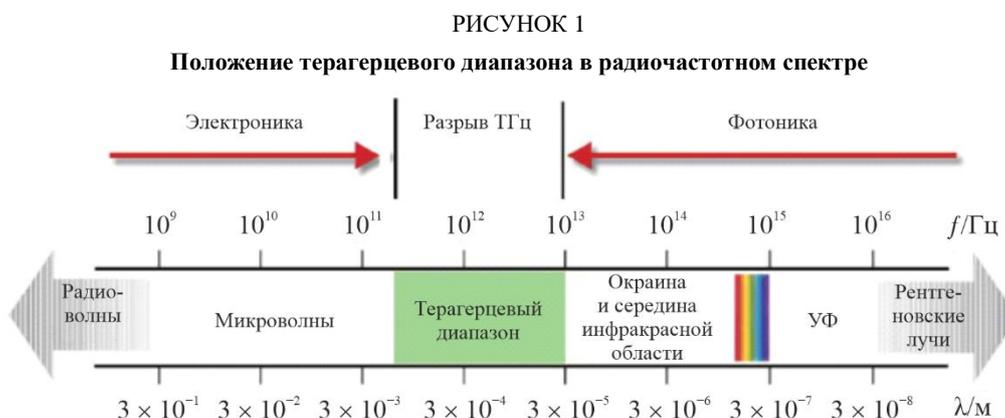
2 Свойства, характеристики и типовые применения в диапазоне ТГц

Развитие беспроводных применений в диапазоне ТГц происходит на базе традиционных беспроводных применений, проходя через микроволновый и миллиметровый диапазоны до диапазона ТГц; вместе с тем отчасти в перспективе намечаются лазерные беспроводные применения. ТГц не заменит микроволновые и лазерные применения, но ТГц-системы обладают уникальными преимуществами, которых нет у большинства видов микроволновых и лазерных применений.

2.1 Обзор диапазона частот выше 275 ГГц

Диапазон выше 275 ГГц составляет основную часть терагерцевого диапазона. Под терагерцевыми волнами, также известными как субмиллиметровое излучение, обычно понимают диапазон частот 0,1–10 ТГц с соответствующей длиной волны 0,03–3 мм.

Положение терагерцевого диапазона в электромагнитном спектре показано на рисунке 1.



2.2 Характеристики диапазона выше 275 ГГц

Ввиду своих уникальных свойств диапазон выше 275 ГГц обладает многими особыми характеристиками по сравнению с другими радиочастотными диапазонами. Ниже излагаются его основные уникальные характеристики.

1) Высокая проникаемость

Радиосигнал выше 275 ГГц хорошо проникает через многие диэлектрические материалы и неполярные жидкости, поэтому он может отобразить непрозрачные материалы или предметы, а также может применяться для неразрушающих испытаний при проверке безопасности и контроле качества.

Кроме того, длина его волны больше, чем у взвешенных частиц пыли или грязи в воздухе, а потери при передаче в пыли или дыму крайне малы, поэтому радиосигнал можно использовать для формирования изображения в обстановке задымления, например при тушении пожаров или пыльных бурях в пустыне.

2) Быстрое затухание в воде

Радиосигнал выше 275 ГГц характеризуется сильным затуханием в воде, что может использоваться в области медицины. Поскольку содержание воды в опухолевых тканях существенно отличается от обычных тканевых клеток, раковые ткани возможно локализовать путем анализа содержания воды в тканях.

3) Безопасность

Фотонная энергия в терагерцевом диапазоне составляет всего миниэлектрон-вольт, что значительно ниже, чем энергия в большинстве химических соединений. Ввиду этого он не вызовет реакцию ионизации, что имеет решающее значение для обнаружения биологических образцов и исследования организма человека. Наряду с этим вода оказывает сильное поглощающее воздействие в этом диапазоне. Поскольку радиосигнал в этом диапазоне не может пройти сквозь кожу и является безопасным для людей, он может использоваться для медицинской диагностики, в частности кожных заболеваний.

4) Спектральное разрешение

В терагерцевом диапазоне содержится обширная спектральная информация, в том числе физическая и химическая информация. Многие молекулы, в особенности органические, обладают в этом диапазоне сравнительно выраженными свойствами рассеяния и поглощения. Путем исследования спектральных свойств материала в данном диапазоне можно понять структурные характеристики материала, определить его состав и проанализировать его физические и химические свойства.

5) Высокое пространственное разрешение

В диапазоне выше 275 ГГц пространственное разрешение сравнительно лучше, чем в микроволновом диапазоне. Теоретически благодаря более короткой длине волны его разрешающая способность при обработке изображений выше, чем в микроволновом диапазоне.

6) Короткая длина волны и хорошая направленность

По сравнению с микроволновым диапазоном частота выше, что позволяет ее использовать как несущую связь для передачи большего объема информации в единицу времени. При меньшей длине волны и хорошей направленности открываются отличные перспективы использования в определенных сценариях применений беспроводной связи.

2.3 Типовые активные применения ТГц-диапазона

Чем больше исследуются волны в терагерцевом диапазоне, тем яснее становятся их выдающиеся характеристики. В настоящее время этот диапазон в основном по-прежнему используется для астрономических наблюдений, но с появлением источников терагерцевого излучения высокой мощности для диапазона выше 275 ГГц открываются широкие перспективы в большем числе применений. Ниже перечисляются возможные типовые применения.

1) Применение в молекулярном обнаружении

Все материи обладают движением, и даже если объект выглядит неподвижным, его внутренняя молекулярная структура находится в стремительном движении, поскольку если есть движение, есть и излучение. У электромагнитного излучения есть собственная вибрирующая частота или длина волны, именуемая "идентифицирующая область спектра". Большая часть молекулярных "отпечатков" находятся в инфракрасной части спектра выше 275 ГГц, поэтому для обнаружения излучения, создаваемого незначительными молекулярными вибрациями, которые нельзя обнаружить инфракрасным лучом, может использоваться терагерцевый твердотельный лазер.

2) Применение в проверке безопасности

Поскольку большинство молекулярных ротационных уровней взрывчатых веществ и наркотиков находятся в терагерцевом регионе, можно применять спектроскопию терагерцевого диапазона для проведения проверок безопасности организма человека для обнаружения взрывчатых веществ, наркотиков, биологических макромолекул, оружия и других контрабандных товаров. В отличие от существующих технологий рентгеновского облучения и формирования изображения с помощью ультразвуковых волн спектроскопия и формирование изображения могут не только показать очертания предмета, но и сравнить измерения спектральной информации с данными имеющейся библиотеки опасностей терагерцевого диапазона. Кроме того, ввиду крайне низкой энергии волна не создаст излучения, вредного для биологических тканей. Таким образом, по сравнению с недостатками рентгеновских лучей, которые могут причинить вред организму человека, и металлодетекторов, неспособных обнаружить неметаллические материалы, терагерцевая технология обладает хорошими перспективами применения для проверок безопасности.

3) Применение в биомедицине

Радиосигнал выше 275 ГГц легко поглощается полярными молекулами, например воды или кислорода, и различные молекулы имеют различный спектр поглощения. Используя эти спектральные линии и технологию формирования изображения, можно диагностировать ранние поражения, вызываемые раком кожи, и поражения других наружных тканей. При хирургических операциях зачастую используется система формирования изображения в терагерцевом диапазоне для проверки удаления рака в режиме реального времени; этот метод обеспечивает более четкую визуализацию мягких тканей, чем ультразвуковое обследование. Наряду с этим можно применять систему терагерцевой спектроскопии с разрешением по времени (THz-TDS) для изучения органических макромолекул, уровень энергии биологической молекулярной вибрации и ротационные уровни которых находятся в терагерцевом регионе, для ориентации фармацевтического производства и медицинских исследований.

4) Применение в области беспроводной связи

Диапазон выше 275 ГГц занимает переходную позицию между оптической областью и электроникой и по своей природе обладает характеристиками как микроволновой, так и оптической связи. Во-первых, при стремительном развитии связи традиционным системам микроволновой связи сложно удовлетворять требованиям высокоскоростной широкополосной беспроводной связи, тогда как благодаря высокой скорости передачи данных и большой ширине полосы этот диапазон мог бы стать основой будущей беспроводной связи. С другой стороны, световая волна сильно затухает в пыли, стенах, пластиковых материалах, тканях и других неметаллических и неполярных материалах. В полосе выше 275 ГГц через эти материалы можно пройти с небольшим затуханием, что создает возможность хороших показателей проникновения в сложных условиях. В то же время у этого диапазона есть и недостатки, наиболее серьезный из которых заключается в том, что сигнал в нем может легко поглощаться полярными молекулами в атмосфере, то есть его атмосферное затухание сравнительно велико, в особенности в дождливые дни. Ввиду этих характеристик он может использоваться в основном для будущей межпланетной связи, наземной широкополосной подвижной связи малого радиуса, а также в сложных условиях, например на сухом и задымленном поле боя.

5) Применение в радарх

Применения терагерцевых волн в области радиолокации, распознавания целей, высокоточного наведения и огня имеют потенциальные перспективы. При таких преимуществах терагерцевой волны, как хорошая направленность и концентрация энергии, можно установить низкий угол места радара с высокой разрешающей способностью и радара слежения. Благодаря возможности формирования изображения через материал можно обнаруживать объекты, замаскированные укрытием или дымом. Ввиду возможности обнаружения в пыли и дыму можно создать всепогодную навигационную систему, в силу чего становится возможным наведение воздушных судов на посадку. Терагерцевая волна имеет большую ширину полосы, чем другие волновые диапазоны, поэтому у нее более широкий диапазон частот по сравнению с диапазоном технологии малой заметности, применяемой в настоящее время, поэтому сверхширокополосный радар, использующий терагерцевую волну как источник излучения, способен получать изображения малозаметных летательных аппаратов.

3 Регламентарная информация

На ВКР-12 в пункт **5.565** Регламента радиосвязи были внесены поправки в целях определения полос частот в этом диапазоне для использования администрациями для применений пассивных служб, таких как радиоастрономическая служба, спутниковая служба исследования Земли (пассивная) и служба космических исследований (пассивная). На ВКР-19 в РР был добавлен пункт **5.564А**, в котором определены четыре полосы частот для работы применений сухопутной подвижной и фиксированной служб. Ниже приведены пункты **5.564А** и **5.565** Регламента радиосвязи (издание 2020 года).

248–3000 ГГц

Распределение по службам		
Район 1	Район 2	Район 3
...		
275–3000	(Не распределена) 5.564А, 5.565	

5.564А Для работы применений фиксированной и сухопутной подвижной служб в полосах частот диапазона 275–450 ГГц:

Полосы частот 275–296 ГГц, 306–313 ГГц, 318–333 ГГц и 356–450 ГГц определены для использования администрациями, внедряющими применения сухопутной подвижной и фиксированной служб, когда не требуется каких-либо особых условий для защиты применений спутниковой службы исследования Земли (пассивной).

Полосы частот 296–306 ГГц, 313–318 ГГц и 333–356 ГГц могут использоваться только применениями фиксированной и сухопутной подвижной служб, когда определены конкретные условия для обеспечения защиты применений спутниковой службы исследования Земли (пассивной) согласно Резолюции **731 (Пересм. ВКР-19)**.

В тех участках диапазона частот 275–450 ГГц, в которых используются применения радиоастрономической службы, могут потребоваться особые условия (например, минимальные расстояния разнесения и/или углы уклонения) для обеспечения защиты радиоастрономических станций от применений сухопутной подвижной и/или фиксированной служб, определяемые в каждом конкретном случае, согласно Резолюции **731 (Пересм. ВКР-19)**.

Использование вышеуказанных полос частот применениями сухопутной подвижной и фиксированной служб не препятствует использованию этой полосы частот какими-либо иными применениями радиослужб в диапазоне 275–450 ГГц и не устанавливает приоритета перед такими применениями в Регламенте радиосвязи. (ВКР-19)

5.565 Следующие полосы частот в диапазоне 275–1000 ГГц определены для использования администрациями для применений пассивных служб:

– радиоастрономическая служба: 275–323 ГГц, 327–371 ГГц, 388–424 ГГц, 426–442 ГГц, 453–510 ГГц, 623–711 ГГц, 795–909 ГГц и 926–945 ГГц;

– спутниковая служба исследования Земли (пассивная) и служба космических исследований (пассивная): 275–286 ГГц, 296–306 ГГц, 313–356 ГГц, 361–365 ГГц, 369–392 ГГц, 397–399 ГГц, 409–411 ГГц, 416–434 ГГц, 439–467 ГГц, 477–502 ГГц, 523–527 ГГц, 538–581 ГГц, 611–630 ГГц, 634–654 ГГц, 657–692 ГГц, 713–718 ГГц, 729–733 ГГц, 750–754 ГГц, 771–776 ГГц, 823–846 ГГц, 850–854 ГГц, 857–862 ГГц, 866–882 ГГц, 905–928 ГГц, 951–956 ГГц, 968–973 ГГц и 985–990 ГГц.

Использование диапазона 275–1000 ГГц пассивными службами не исключает использование этого диапазона активными службами. Администрациям, желающим предоставить частоты в диапазоне 275–1000 ГГц для применений активных служб, настоятельно предлагается принимать все практически возможные меры для защиты этих пассивных служб от вредных помех до даты принятия Таблицы распределения частот в вышеупомянутом диапазоне частот 275–1000 ГГц.

Все частоты в диапазоне 1000–3000 ГГц могут использоваться как активными, так и пассивными службами. (ВКР-12)

4 Беспроводная связь ТГц

В диапазоне частот выше 5 ГГц проводится ряд исследований по системам сверхширокополосной беспроводной связи. Целью некоторых исследований является разработка сверхскоростных систем беспроводной связи с интерфейсами Ethernet 40 Гбит/с и 100 Гбит/с.

Ввиду их высокой пропускной способности и больших потерь распространения линии связи, использующие технологии ТГц, работают как линии доступа последней мили. В последние годы с развитием полупроводниковых технологий и передовых антенных технологий в ТГц диапазоне беспроводная ТГц-связь также используется в качестве замены волоконно-оптической связи в некоторых сценариях передачи на большие расстояния (например, в несколько миль). Организации, занимающиеся НИОКР, провели несколько испытаний, используя частоты выше 275 ГГц.

4.1 Возможные случаи использования систем связи ТГц

При рассмотрении случаев использования связи ТГц следует учитывать следующие моменты:

- использование сверхширокой полосы частот;
- возможность миниатюризации антенны и устройства;
- высокую направленность и большие потери распространения в свободном пространстве (длина волны составляет менее 1/5 полосы 60 ГГц, и хотя потери распространения в свободном пространстве в 25 или более раз больше, их компенсируют высокие характеристики усиления антенны);
- развитие технологии производства, например генераторов, усилителей мощности и антенн с управляемым положением диаграммы направленности.

4.1.1 Связь между микросхемами и внутри устройств

На рисунке 2 показан случай использования связи между микросхемами и внутри устройств. Ожидается, что беспроводное соединение компонентов и печатных плат позволит отказаться от проводов и миниатюризовать субстраты и устройства.

В таблице 1 приведены типовые требования для этого случая использования. Делается вывод, что расстояния связи при применении интегральных схем (ИС) и/или разделении на уровни используемых на основе интегральных схем субстратов в одном корпусе будут варьироваться от нескольких мм до нескольких десятков см.

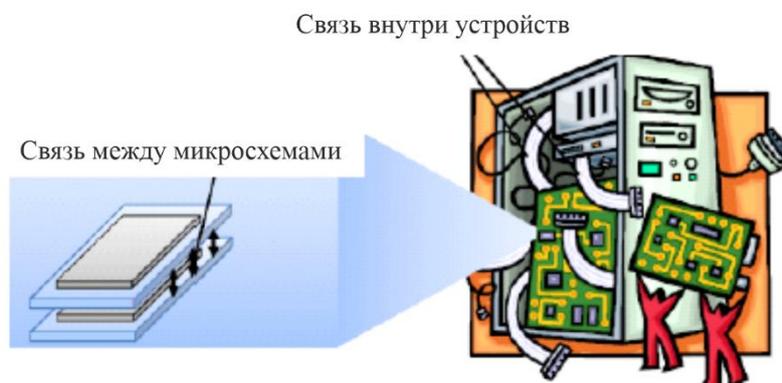
Что касается скорости передачи, для USB3.1 уже была предписана скорость 10 Гбит/с, а для PCIe Express 4.0 был установлен стандарт скорости передачи для уровня линии передачи данных $4 \text{ ГБ/с} = 32 \text{ Гбит/с}$ (в обоих направлениях) и, дополнительно, до $4 \text{ ГБ/м} \times 64 = 256 \text{ ГБ/с}$ (2 Тбит/с), который охватывает до 64 дорожек.

Поддерживать связь на скоростях, превышающих Тбит/с, не всегда обязательно, но при связи между микросхемами и внутри устройств с использованием связи ТГц потребуется сверхвысокоскоростная передача, превышающая по меньшей мере несколько десятков Гбит/с.

Что касается среды распространения, необходимо рассматривать и связь LoS, и связь NLoS как модель близости или непосредственной близости в корпусе, которая предполагает использование металлического корпуса при сильных отражательных волнах. Необходимо учитывать эффект многолучевого распространения между устройствами, расположенными в непосредственной близости, и многолучевого распространения через внутренние стенки корпуса устройства путем проникновения волн ТГц через субстраты.

РИСУНОК 2

Случай использования связи между микросхемами и внутри устройств



Report SM.2352-2

ТАБЛИЦА 1

Типовые требования

Расстояние связи	От нескольких мм (между микросхемами) до нескольких см (внутри устройств)
Скорость передачи данных	Несколько десятков Гбит/с
Среда распространения	Модель непосредственной близости в корпусе и близости (LoS/NLoS)
Требуемый BER	10^{-9}

4.1.2 Синхронизация контента с облаком посредством связи на предельно малых расстояниях

На рисунке 3 показан случай использования синхронизации контента с облаком посредством связи на предельно малых расстояниях (в непосредственной близости). В последнее время стремительно растет распространение услуг, использующих облако, как и услуг сотрудничества между стремительно распространяющимися смартфонами и облаком.

Услуга хранения в облаке – это одна из облачных услуг, состоящая в том, что фото- и видеоматериалы смартфона пользователя хранятся посредством сети, а пользователь не осознает процесс синхронизации. Вместе с тем пакетная связь с использованием 3G и LTE, применяемых в смартфонах для частой синхронизации хранящегося в облаке контента, о которой пользователь не знает, приводит к неожиданному увеличению расхода заряда батареи.

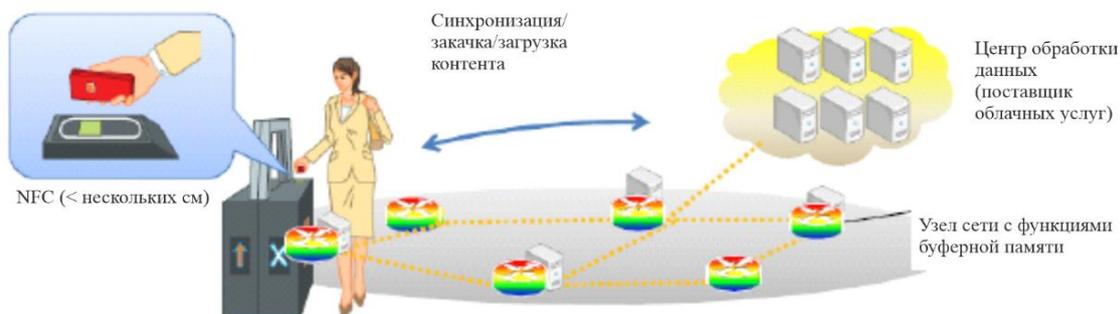
В этом случае использования имеется в виду, что помимо функции зарядки IC в автоматических турникетах на железнодорожных станциях, пользователи могут обладать смартфонами с функцией связи ТГц. При проходе через турникет железнодорожной станции по дороге на работу или в школу одновременная синхронизация контента посредством связи ТГц подавит потребление энергии батареи смартфона.

В таблице 2 показаны типовые требования для этих случаев использования. Хотя расстояние связи составляет менее нескольких см, для синхронизации соответствующего объема данных или контента за очень короткое время – примерно 1 секунду – желательно, чтобы скорость связи была возможно велика. Для этого, наряду со скоростью связи, необходимо будет разработать систему аутентификации и ассоциации, которая позволит сделать время установления канала связи очень коротким. С другой стороны, даже если возможна скорость связи ТГц на предельно малых расстояниях свыше 100 Гбит/с, необходимо изучить, совместима ли скорость чтения и письма при хранении, которой, как предполагается для данного случая использования, оснащены смартфоны, с такой высокой скоростью передачи. В качестве примера можно привести скорость чтения и письма SSD (твердотельного диска), которая заявлена как самая большая в мире и составляет около 500 Мбайт/с (4 Гбит/с).

Также предполагается, что средой передачи будет модель расположения устройств вблизи друг друга – модель близости устройств, которая применима только к LoS. Следует изучить вопрос о том, скажутся ли на передаче данных многолучевые отражения между расположенными вблизи друг от друга устройствами.

РИСУНОК 3

Случай использования синхронизации контента с облаком посредством связи на предельно малых расстояниях



Report SM.2352-3

ТАБЛИЦА 2

Типовые требования

Расстояние связи	До нескольких см (близость)
Скорость передачи данных	От 4 Гбит/с до нескольких десятков Гбит/с
Среда распространения	Модель близости устройств (LoS)
Требуемый BER	10^{-12}

4.1.3 Беспроводные линии связи между серверами в центре обработки данных

На рисунке 4 показан случай использования связи ТГц между серверами в центре обработки данных. В последнее время стремительно растет распространение услуг, использующих облако, что приводит к ускорению строительства центров обработки данных. Как правило, в центрах обработки данных имеются несколько стоек с серверами, в том числе с запоминающими устройствами и многопозиционными переключателями, и желательно, чтобы между серверами на стойках серверов и между стойками осуществлялась беспроводная связь.

В таблице 3 приведены типовые требования в этом случае использования. Расстояния связи от нескольких см, если речь идет о соединении между серверами, расположенными на стойках вертикально, до 100 м, если речь идет о соединении между стойками.

Что касается среды распространения, необходимо рассматривать варианты как LoS, так и NLoS, при которых предполагается модель служебного помещения, где использованы строительные материалы со сравнительно низкой проницаемостью (высокой отражающей способностью), но если взять особый случай, в котором стойка с серверами расположена около поверхности стены, а кабельные соединения между задними панелями заменены каналом связи ТГц, между задними панелями можно применить двухлучевую модель.

РИСУНОК 4

Беспроводные линии связи между серверами в центре обработки данных



Report SM.2352-4

ТАБЛИЦА 3

Типовые требования

Расстояние связи	От нескольких см до 100 м (близость)
Скорость передачи данных	Несколько десятков Гбит/с – несколько сот Гбит/с
Среда распространения	Модель служебного помещения/двухволновая модель (LoS/NLoS)
Требуемый BER	10^{-12}

4.1.4 Беспроводной промежуточный трафик/периферийный трафик

Линия промежуточного трафика – это соединение между базовой станцией и более централизованным элементом сети, тогда как линия периферийного трафика соединяет контроллер радиооборудования базовой станции и удаленную радиоточку (радиоустановку). В будущем такие тенденции, как массовое развертывание малых сот, реализация скоординированной многоточечной передачи (CoMP) и/или облачных сетей радиодоступа (C-RAN), могут увеличить требуемые скорости передачи данных для промежуточного трафика или периферийного трафика либо для обоих видов трафика. Использование для этого беспроводных линий может быть желательным в ситуациях, когда волоконно-оптические линии недоступны.

В случаях, когда требуются несколько десятков Гбит/с, диапазон частот ТГц может считаться перспективным вариантом. В ходе демонстрации, описываемой в работе [1], на линии длиной 1 км была достигнута скорость передачи данных 24 Гбит/с.

ТАБЛИЦА 4

Типовые требования

Расстояние связи	От 100 м до 300 м
Скорость передачи данных	До 100 Гбит/с
Среда распространения	Вне помещений
Требуемый BER	Не представлен

4.1.5 Беспроводная локальная сеть ТГц (WLAN ТГц)

На рисунке 5 отображен случай беспроводной локальной сети ТГц (WLAN). По мере развития технологий беспроводной связи WLAN играет все бóльшую роль в жизни людей, избавляя их от ограничений, связанных с проводами. В настоящее время WLAN, как и интернет и сети подвижной связи, стала важным средством передачи информации, широко применяемым в аэропортах, служебных помещениях, ресторанах, жилых домах и др. Частота ТГц-диапазона составляет 1–4 порядка величин, что выше, чем в микроволновом диапазоне, а скорость передачи данных может быть 10 Гбит/с. Учитывая, что WLAN ТГц обладает такими характеристиками, как высокая скорость, широкая полоса, компактная структура, малый размер, низкий уровень ущерба от излучения и высокая помехозащищенность, она может использоваться в коммерческих и военных применениях, в частности таких, как перспективная высококачественная видеотелефонная связь, видео-конференц-связь и игры 3D в реальном времени.

РИСУНОК 5

Случай использования WLAN ТГц



Report SM.2352-5

ТАБЛИЦА 5

Типовые требования

Расстояние связи	Несколько десятков метров
Скорость передачи данных	От нескольких Мбит/с до нескольких десятков Мбит/с
Среда распространения	Служебные помещения, аэропорты, рестораны
Требуемый BER	$\leq 1 \times 10^{-6}$

4.1.6 Фиксированный беспроводной ТГц-доступ

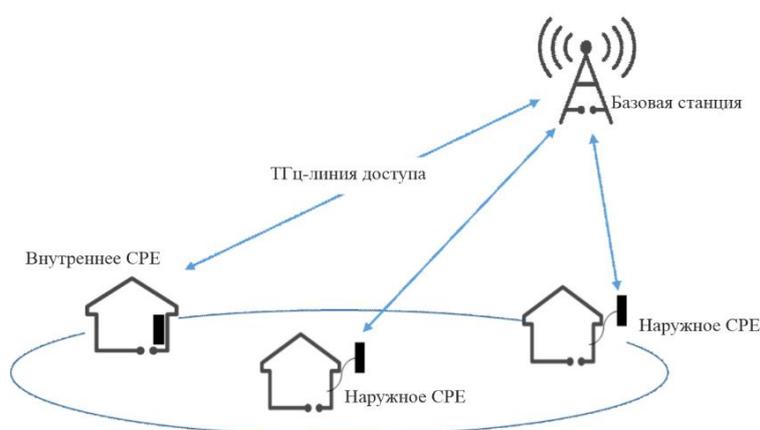
Системы фиксированного беспроводного доступа (FWA) обеспечивают стабильные и надежные услуги широкополосного доступа для индивидуальных и корпоративных клиентов в тех местах, где прокладка волоконно-оптических линий невозможна или требует больших расходов. Благодаря таким преимуществам, как возможность быстрого развертывания и низкая стоимость, они широко используются в коммерческих целях по всему миру. Поскольку в последние годы услуги и применения широкополосного доступа из дома предъявляют все более высокие требования к скорости передачи данных (сотни и более Гбит/с). Полосы частот в ТГц-диапазоне рассматриваются как привлекательное решение.

На рисунке 6 показан случай использования фиксированного беспроводного доступа в ТГц-диапазоне. Несколько пользователей одновременно подключаются к базовой станции через выделенное устройство, называемое оборудованием в помещении клиента (CPE). Расстояние связи может составлять от десятков метров до нескольких километров. В некоторых случаях для снижения потерь на проникновение сквозь строительные материалы CPE устанавливается снаружи.

В таблице 6 представлены типовые требования для этого случая использования. С точки зрения среды распространения рассматриваются как модели LoS, так и модели "снаружи внутри помещения" (O2I).

РИСУНОК 6

Случай использования фиксированного беспроводного ТГц-доступа



Report SM.2352-6

ТАБЛИЦА 6

Типовые требования

Расстояние связи	От 50 м до 1000 м
Скорость передачи данных	До Тбит/с
Среда распространения	Вне помещений, снаружи внутри помещения
Требуемый BER	10^{-5}

4.1.7 Прямое ТГц-соединение

На рисунке 7 показан случай использования прямого беспроводного соединения в ТГц-диапазоне. Прямое соединение – это дополнительный одноранговый канал связи, использующий основные преимущества линий радиодоступа и служащий неотъемлемой частью сети радиодоступа. Оно позволяет мобильным устройствам напрямую осуществлять связь с расположенными поблизости устройствами на коротком и среднем расстоянии. Это разгружает трафик данных базовой станции и сокращает задержку при взаимодействии между такими мобильными устройствами. Два типичных вида прямого соединения – это связь между устройствами (D2D) и связь между транспортными средствами (V2V).

В последнее время появились новые применения беспроводной связи, такие как голографическая связь и автоматизированное или ассистированное вождение, которые предъявляют дополнительные требования к пропускной способности и задержке передачи данных в линиях связи. Поэтому желательно использовать прямое соединение в ТГц-диапазоне частот.

В таблице 7 представлены типовые требования для этого случая использования. Что касается среды распространения, то необходимо рассматривать варианты связи как вне, так и внутри помещения.



Report SM.2352-7

ТАБЛИЦА 7

Типовые требования

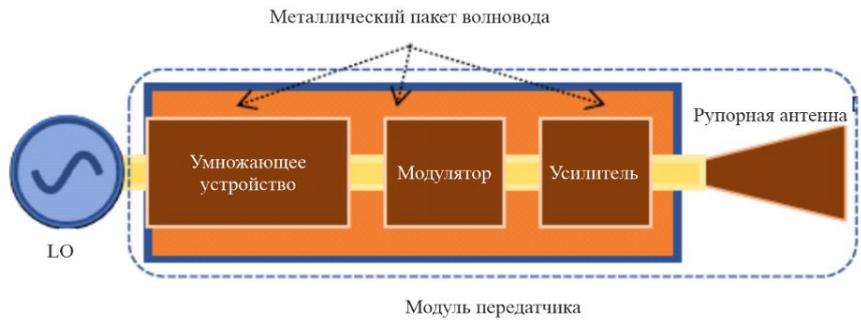
Расстояние связи	От нескольких метров до нескольких десятков метров
Скорость передачи данных	От нескольких десятков Гбит/с до Тбит/с
Среда распространения	Вне помещения/в помещении
Требуемый BER	Не представлен

4.2 Технологии приемников и передатчиков ТГц

4.2.1 Модули передатчиков и приемников 300 ГГц, использующих ММІС

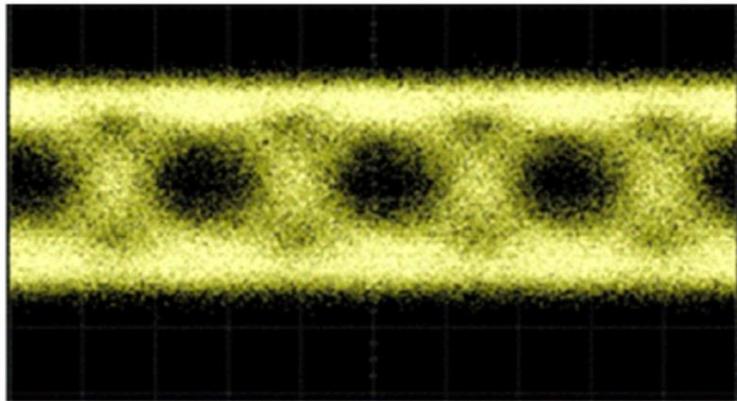
На рисунке 8 приведена блок-схема общей структуры модуля передатчика. В металлическом пакете волновода установлены диагональная рупорная антенна, усилитель мощности, модулятор и устройство умножения. Устройство умножения умножает несущую 75 ГГц, вырабатываемую местным генератором, и на модулятор поступают сигналы 20 ГГц. Для оценки модуля передачи конфигурируется система оценки путем установки модуля приемника для проведения оценки. Модуль приемника состоит из стандартной рупорной антенны (24 дБи) и модуля волновода, оснащенного барьерным диодом Шоттки. На рисунке 9 показан измеряемый спектр сигнала ASK 20 Гбит/с (300 ГГц) на выходном терминале усилителя мощности. Модулирующий сигнал на центральной частоте 300 ГГц \pm 20 ГГц наблюдался модулятором выходного спектра, как показано на рисунке 10.

РИСУНОК 8
Блок-схема модуля передатчика



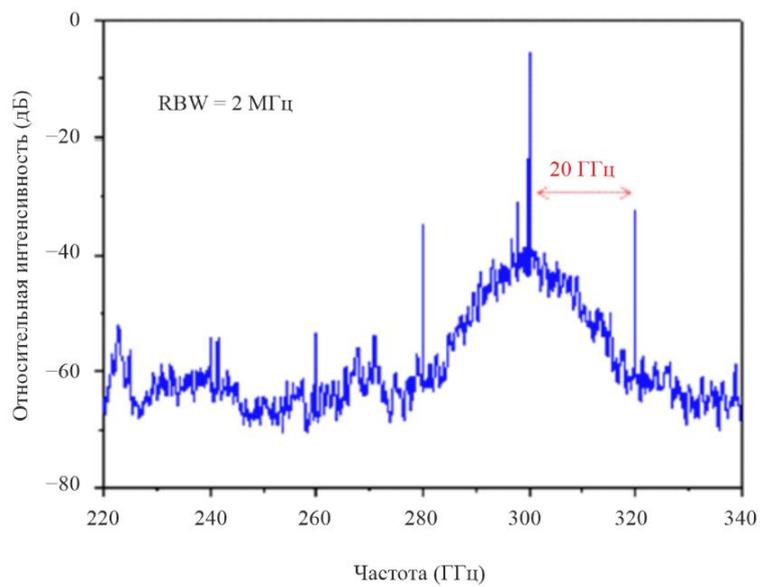
Report SM.2352-8

РИСУНОК 9
Глазковая диаграмма сигнала 20 Гбит/с модуля передатчика



Report SM.2352-9

РИСУНОК 10
Выходной спектр усилителя мощности



Report SM.2352-10

Еще об одном подходе, в котором используется технология ММОС, сообщается в работе [1], в которой представлен субгармоничный квадратурный передатчик, работающий на частоте 240 ГГц. В этой работе описываются и характеристики передатчика. Несущая частота в этом варианте ниже 275 ГГц, но приведенная информация позволяет сделать определенные выводы о характеристиках интегрированных передатчика и приемника, которые можно ожидать в нижней части диапазона частот ТГц.

В работе [2] представлена система беспроводной связи, работающая на частоте 237,5 ГГц и способная обеспечивать скорость передачи данных 100 Гбит/с на расстоянии 20 м. На стороне приемника используется технология, описанная в работе [1], а на стороне передатчика применяется фотонный подход, при котором используется фотодиод с одинаковыми носителями заряда, мощность на выходе которого затем излучается антенной с фокусировкой луча.

4.2.2 Интегрированные передатчик и приемник на базе КМОП, работающие в диапазоне частот 300 ГГц [3]

Поскольку максимальная частота колебаний КМОП-устройств ограничена значением около 300 ГГц, при изготовлении КМОП-усилителей, работающих в диапазоне частот выше 300 ГГц, могут возникнуть трудности. Для интегрированных передатчиков и приемников с рабочей частотой 300 ГГц предложена архитектура интегральной схемы без КМОП-усилителей, разработанная и изготовленная с использованием 40-нм КМОП-технологии и прошедшая экспериментальную оценку. На рисунке 11 показаны частотные характеристики выходной мощности однокристалльного КМОП-передатчика, изображенного на рисунке 12(a), а также коэффициент шума и усиление преобразования однокристалльного КМОП-приемника, изображенного на рисунке 12(b). Интегральная схема КМОП позволяет достичь ширины полосы пропускания по уровню 3 дБ свыше 20 ГГц для выходной мощности передатчика в диапазоне частот 250–280 ГГц. Коэффициент шума приемника без малошумящих усилителей в диапазоне частот 240–290 ГГц не превышает 28 дБ. Передатчик и приемник состоят из схем преобразования частоты, таких как смесители, удвоители и утроители, а также квадратурных модуляторов. На рисунках 13(a) и 13(b) показаны соответственно спектр сигнала 16-QAM при скорости передачи данных 80 Гбит/с и совокупность сигналов, среднеквадратичное отклонение для которых составляет менее 12% от величины вектора ошибки (EVM). Выходную мощность передатчика и коэффициент шума приемника можно улучшить, добавив соответственно усилитель мощности и малошумящий усилитель, выполненные на полупроводниковых приборах на основе соединений III–VI групп, таких как арсенид галлия (GaAs) и фосфид индия (InP).

РИСУНОК 11

Выходная мощность, коэффициент шума (NF) и усиление преобразования (CG) передатчика и приемника на базе КМОП

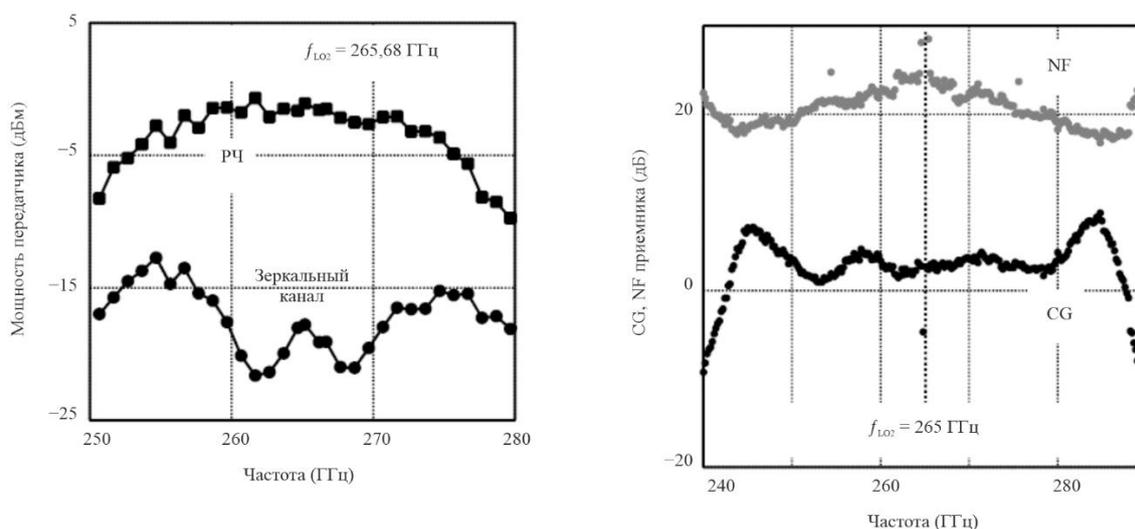
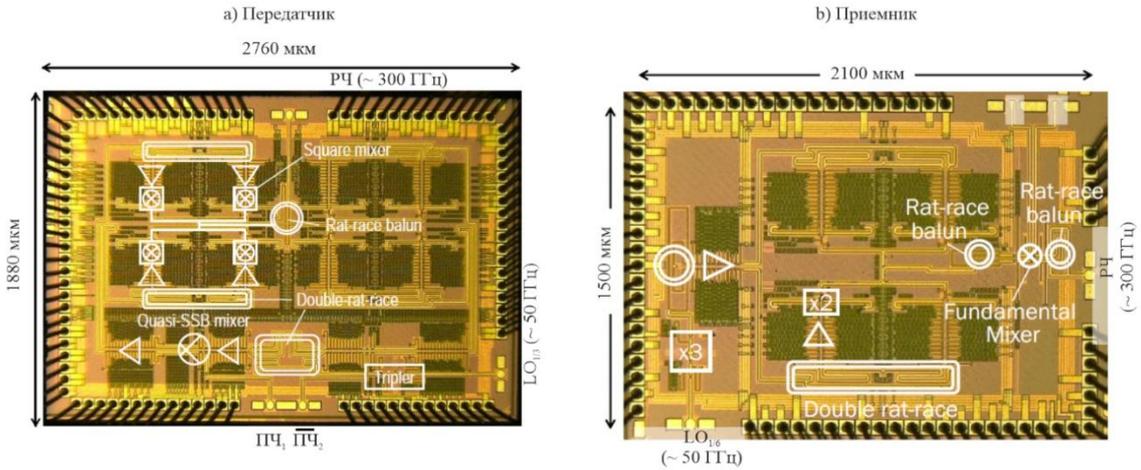


РИСУНОК 12

Фотографии КМОП-микросхем передатчика и приемника

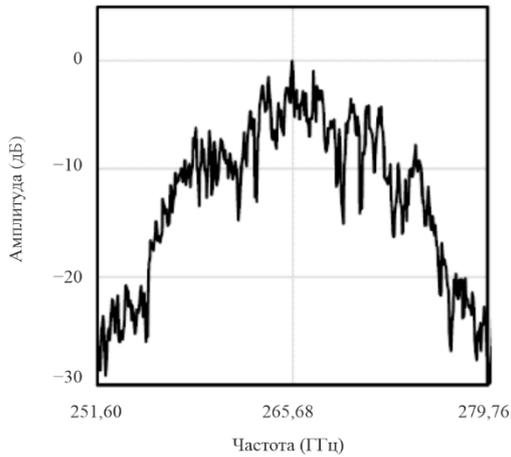


Report SM.2352-12

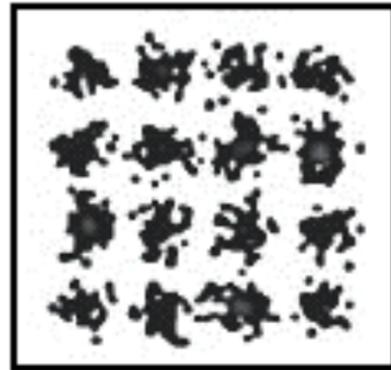
РИСУНОК 13

Характеристики КМОП-микросхем передатчика и приемника

а) Спектр сигналов 16-QAM



б) Совокупность сигналов 16-QAM



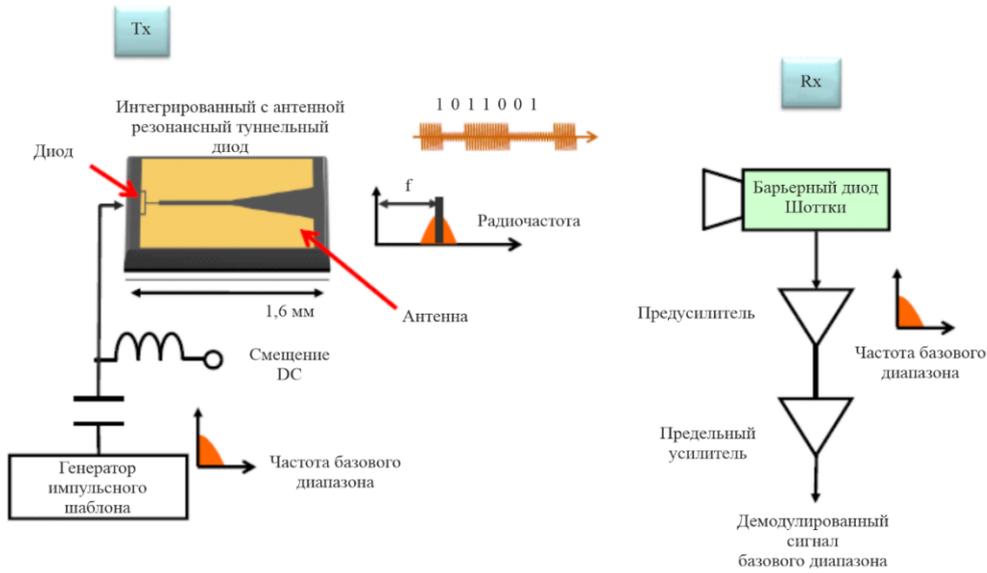
Report SM.2352-13

4.2.3 Передатчик и приемник 300 ГГц, использующие RTD

Генератором является так называемый резонансный туннельный диод (RTD), который производит энергию при соответствующем напряжении смещения постоянного тока. Посредством изменения напряжения смещения сигнал несущей 300 ГГц модулируется как ON и OFF, в зависимости от амплитуды напряжения смещения. Что касается приемника, используется приемник прямого детектирования, как показано на рисунке 14. Максимальная скорость составляла 1,5 Гбит/с, а передача несжатых сигналов ТВЧ была возможна благодаря диодным технологиям. Кроме того, было показано, что RTD можно также использовать в качестве детектора высокой чувствительности. Демонстрировалась также передача без ошибок на скорости 2,5 Гбит/с на частоте 625 ГГц с использованием частотного множителя для передатчика.

РИСУНОК 14

Блок-схема беспроводной линии с использованием диодных технологий



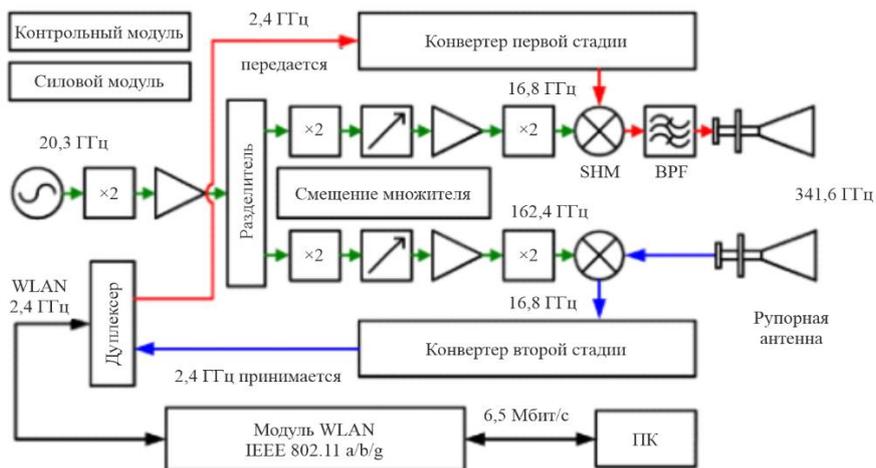
Report SM.2352-14

4.2.4 WLAN 0,34 ТГц на базе IEEE 802.11

На рисунке 15 показана схема WLAN 0,34 ТГц, которая реализуется в каскаде интегрированных передатчика и приемника беспроводной связи 0,34 ТГц на основе технологии электроники твердотельных полупроводников и устройства WLAN на базе IEEE 802.11. Скорость передачи данных WLAN 0,34 ТГц может составлять 6,536 Мбит/с на расстоянии 50 м, а ее BER ниже 10^{-6} . Уровень MAC и частичный физический уровень устанавливаются на основе коммерческого беспроводного модуля IEEE 802.11, который работает на частоте 2,4 ГГц со скоростью 150 Мбит/с. Несущая 2,4 ГГц на базе IEEE 802.11 может быть перемещена на 16,8 ГГц при использовании смесителя. Сигнал несущей на 16,8 ГГц принимается в каскаде приемника WLAN 0,34 ТГц и перемещается на частоту 0,34 ТГц, а затем сигнал 0,34 ТГц направляется антенной. Если в каскаде приемника 0,34 ТГц принимается сигнал, он преобразует сигнал до 2,4 ГГц и посылает его беспроводному устройству на базе IEEE 802.11.

РИСУНОК 15

Схема узла WLAN 0,34 ТГц

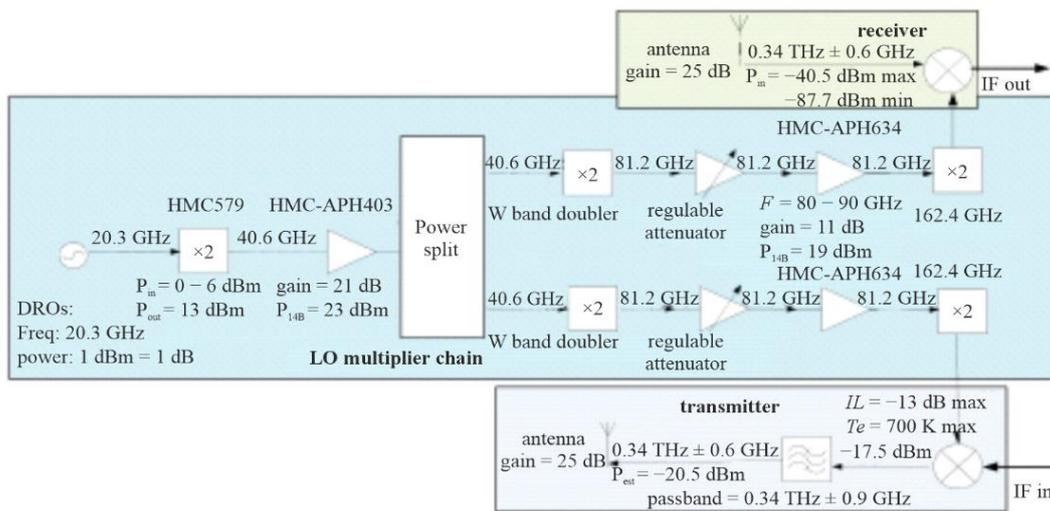


Report SM.2352-15

На рисунке 16 показана структура входного каскада интегрированных передатчика и приемника 0,34 ТГц, который состоит из резонаторного фильтра 0,34 ТГц, гармонического смесителя 0,34 ТГц, двойной частотной цепочки 0,17 ТГц и фидерной цепи смещения. Гармонический смеситель 0,34 ТГц является важнейшим модулем входного каскада интегрированных передатчика и приемника; принцип его работы базируется на эффекте нелинейного соотношения ток-напряжение (I-V) антипараллельного диода Шоттки. Двойная частотная цепочка 0,17 ТГц с 8-гармоничной структурой доводит вибрационный сигнал до гармонического смесителя 0,34 ТГц, который состоит из двухчастотного смесителя диапазона Q, усилителя диапазона Q, разделителя мощности диапазона Q, двухчастотного смесителя диапазона W, регулируемого ослабителя диапазона W, усилителя диапазона W, двухчастотного умножителя диапазона G и др. Сюда также входит трехпорядковый двухчастотный умножитель и двухпорядковый задающий усилитель.

РИСУНОК 16

Каскад интегрированных передатчика и приемника WLAN 0,34 ТГц



Report SM.2352-16

5 Зондирование и формирование изображения

Волны ТГц обладают умеренной проникаемостью веществ и хорошим пространственным разрешением, а также уникальными характеристиками, которых лишены другие полосы электромагнитных частот, такими как спектральная дактилоскопия реактивов, распознавание однонитевой и двухнитевой ДНК, распознавание поглощения водой и льдом и чувствительность в отношении примесей в полупроводниках; наряду с этим волны ТГц не представляют опасности для организма человека. На основании этих фактов прогнозируется применение широкого спектра видов зондирования и формирования изображения.

5.1 Метод генерации ТГц

В таблице 8 показано соотношение между методами генерации ТГц и их технологиями.

ТАБЛИЦА 8

Методы генерации ТГц и их технологии

Метод генерации	Технология производства	Материал	Функция
Фотовозбуждение сверхкороткими импульсами	Фотопроводящая антенна	LT-GaAs	ТГц-TDS Работа при комнатной температуре
Нелинейная оптика	Параметрическая DFG	GaAs, GaP, GaSe, ZGP, PPLN, BD-GaAs, OP-GaAs	Переменная длина волны Работа при комнатной температуре
Фотосмещение	Фотопроводник UTC-PD	LT-GaAs, InP/InGaAs	Работа при комнатной температуре
Лазер	QCL	GaAs/AlGaAs, InGaAs-AlInAs/InP	Узкая ширина линии Работа при криогенной температуре
Твердотельные электронные устройства	Диоды Ганна, IMPATT, RTD Составной полупроводник	GaAs, InP, Si AlAs/GaInAs/AlAs HBT, HEMT, mHEMT, pHEMT	Фиксированная длина волны Работа при комнатной температуре
Электронно-лучевая трубка	BWO, Gyrotron		Переменная длина волны Работа при комнатной температуре

1) Фотовозбуждение сверхкороткими импульсами

В настоящее время это наиболее распространенный метод генерации импульсов ТГц. Посредством фотовозбуждения нелинейного кристалла (NLC), фотопроводящей антенны (PCA), полупроводников и сверхпроводников и т. д., используя производимые лазером сверхкороткие импульсы продолжительностью около фемтосекунды, можно получить в полупроводниках колебания фотопроводящего тока продолжительностью субпикосекунды и можно генерировать широкополосный оптический импульс ТГц, используя вторичную нелинейную поляризацию (выпрямление света) с применением нерезонансной нелинейной среды. Этот метод широко применяется в спектроскопии ТГц с разрешением во времени (ТГц-TDS).

ТГц-TDS обладает чрезвычайно высоким отношением сигнала к шуму (S/N) по сравнению со спектрометром дальнего ИК-диапазона с преобразованием Фурье, с применением обычного источника ИК-излучения и используется, в частности, в спектроскопии и для формирования изображения в ТГц-диапазоне. Хотя следует соответствующим образом выбирать структуру, состав кристалла и длину волны лазера возбуждения для структуры фотопроводящей антенны, полупроводника и нелинейного кристалла, благодаря последним достижениям в технологии лазеров сверхкоротких импульсов и используя регенеративный усилитель для получения в качестве света возбуждения импульсного света высокой мощности, возможно получить импульс ТГц, обладающий высоким напряжением электрического поля.

2) Нелинейная оптика

Этот метод генерации подразделяется на параметрическую генерацию и генерацию разностной частоты (DFG). Параметрическая генерация предполагает преобразование длины волны фотонными поляритонами в таких нелинейных кристаллах, как LiNbO_3 . Она предполагает настраиваемую длину волны и работу при комнатной температуре, а миниатюризация источника света с настольных до наладонных размеров возможна при миниатюризации лазеров возбуждения. Недавно был получен импульс ТГц пикового напряжения, превышающего 1 кВт, что сопоставимо со значениями при использовании лазера на свободных электронах (FEL).

С другой стороны, генерация разностной частоты (DFG) представляет собой генерацию разностной частоты при использовании вторичного нелинейного оптического эффекта нелинейных кристаллов. В последние годы сообщалось о методах генерации с использованием органических кристаллов, таких как DAST и BNA, а в отношении напряжения генерации сообщалось о мВт на выходе при использовании внутрирезонаторной DFG.

3) Фотосмещение

При инжектировании света лазера, работающего на двух длинах волны, в фотопроводящее устройство или фотодиод генерируется волна ТГц, которая является разностной оптической частотой, с применением фотоэлектрического преобразования посредством фотосмещения. Что касается фотодиода, может генерироваться свет ТГц, превышающий 1 ТГц, благодаря тому, что фотодиод с одинаковыми носителями заряда (UTC-PD) обладает характеристиками высокой скорости и высокой производительности.

4) Лазер

Квантово-каскадный лазер (QCL) имеет многослойную структуру, состоящую из полупроводниковых материалов с энергетическими барьерами различной высоты и толщиной, измеряемой в нанометрах; лазерная генерация в нем осуществляется с помощью межподзонных переходов. Хотя в принципе ширина линии будет очень узкой, на практике она ограничивается работой при низких температурах (максимальная рабочая температура, достигаемая при запуске импульса, составляет 200 К). Однако выходная мощность при частоте, превышающей 1 ТГц, является относительно высокой.

5) Твердотельные электронные устройства

Традиционно такие устройства разрабатываются для работы на микроволнах или миллиметровых волнах. Диоды Ганна, использующие эффект междолинного перехода и имеющие полосы проводимости с различной фактической массой, лавинно-пролетные диоды (IMPATT), а также лавинно-пролетные диоды с туннельной инжекцией носителей (TNETT) представляют собой пролетные диоды, формирующие структурно высокие зоны, в которых перемещаются электроны.

Резонансные туннельные диоды (RTD) представляют собой структуру двойного барьера с тонкой полупроводниковой пленкой, в которой создается отрицательное дифференциальное сопротивление за счет возникающего в ней туннельного эффекта, обеспечивающего базовую лазерную генерацию с частотой, превышающей 1 ТГц (хотя уровень на выходе остается незначительным).

В качестве практичного высокочастотного полупроводникового устройства, применяемого в настоящее время в лазерных генераторах, усилителях и даже в монолитных интегральных схемах СВЧ-диапазона (ММИС), используются биполярный транзистор с гетеропереходом (HBT), который представляет собой полупроводниковое соединение, а также транзистор с высокой подвижностью электронов (HEMT). Хотя и предполагается, что полупроводники типа InP с такими характеристиками материала, как высокая подвижность электронов, должны работать с более высокой скоростью, были также сообщения об устройствах, которые функционируют на частотах, превышающих несколько сот ТГц, за счет применения таких технологий, как псевдоморфные транзисторы с высокой подвижностью электронов (pHEMT) и метаморфные транзисторы с высокой подвижностью электронов (mHEMT), которые стремятся к более высоким скоростям.

6) Электронно-лучевая трубка

Волны с частотой ТГц образуются генератором обратной волны (BWO) за счет взаимодействия замедляющих схем и электронов; излучением Смита–Парселла за счет эффекта Смита–Парселла, возникающего в момент прохождения электронов через металлическую дифракционную решетку; гиротроном с помощью воздействия мазера в циклотронном резонансе, который связан с изменением массы электрона, вызванным релятивистским эффектом. И если результаты на выходе, как правило, оказываются большими, то и размеры конструкции также являются большими.

5.2 Камеры диапазона ТГц

Ниже приводятся тенденции в области двумерных матричных датчиков диапазона ТГц, основанных на технологии неохлаждаемого инфракрасного матричного датчика типа болометра.

На рисунке 17 представлено изображение инфракрасной камеры, оснащенной двумерным инфракрасным матричным датчиком с количеством пикселей, составляющим 320×240 , и плотностью пикселей, равной $23,5 \text{ мкм}$, в момент инжектирования электронов квантово-каскадным лазером с частотой в $3,1 \text{ ТГц}$. Структура пикселей в данном случае имеет дополнительный терагерцевый поглощающий слой, и за счет корректировки сопротивления тонкой металлической пленки от полного сопротивления вакуума до 377 Ом чувствительность при частоте порядка 3 ТГц улучшается примерно на однозначное число (рисунок 18(a)). Кроме того, узкополосный терагерцевый матричный датчик, показанный на рисунке 18(b), разработан в целях повышения чувствительности еще в два-четыре раза только при определенной длине волны.

На рисунке 19 показана зависимость длины волны эквивалентной мощности шума (ЭМШ) для широкополосного и узкополосного терагерцевых матричных датчиков. Как видно из характеристик широкополосного терагерцевого матричного датчика, он демонстрирует примерно плоские характеристики ЭМШ начиная с длины волны в 3 мкм до чуть менее 200 мкм , а с уровня выше 200 мкм характеристики ЭМШ начинают ухудшаться. На рисунке 20 и в таблице 9 представлены внешний вид и технические характеристики портативной терагерцевой камеры, оснащенной одним из двух типов матричных датчиков – широкополосным терагерцевым матричным датчиком. При использовании кремния с высоким уровнем сопротивления в качестве материала для терагерцевой линзы, на кремнии формируется париленовая пленка в качестве неотражающего покрытия. Кроме того, перед терагерцевой линзой устанавливается инфракрасный блокирующий фильтр (фильтр из металлической решетки, который позволяет осуществлять передачу с длиной волн, превышающей примерно 30 мкм). Эта камера может запускаться с помощью компьютера через интерфейс USB 2.0 и может также регистрировать в компьютере данные в цифровом изображении.

РИСУНОК 17

а) Широкополосный матричный датчик ТГц; б) Узкополосный матричный датчик ТГц

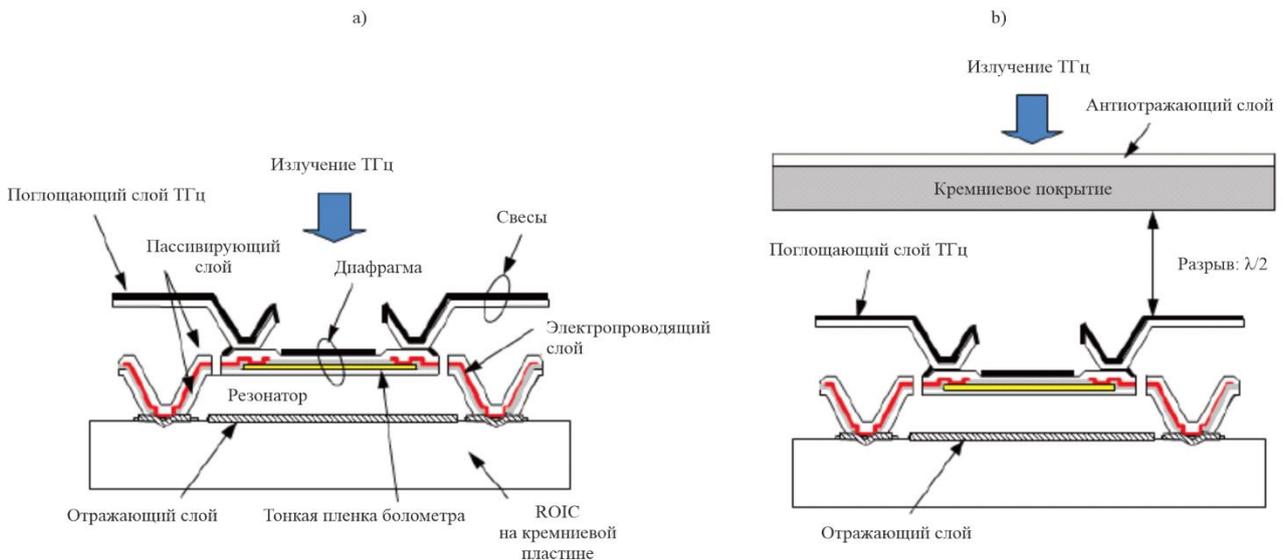
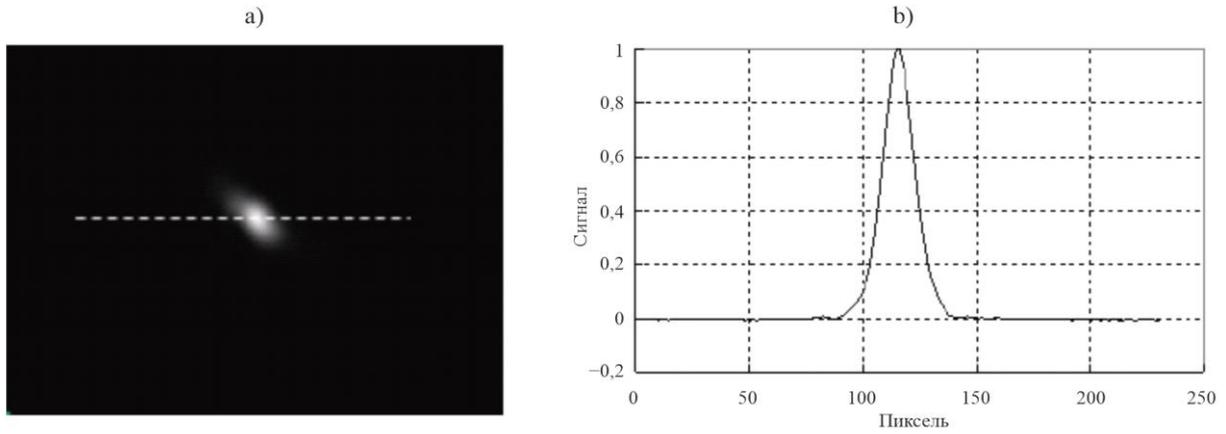


РИСУНОК 18

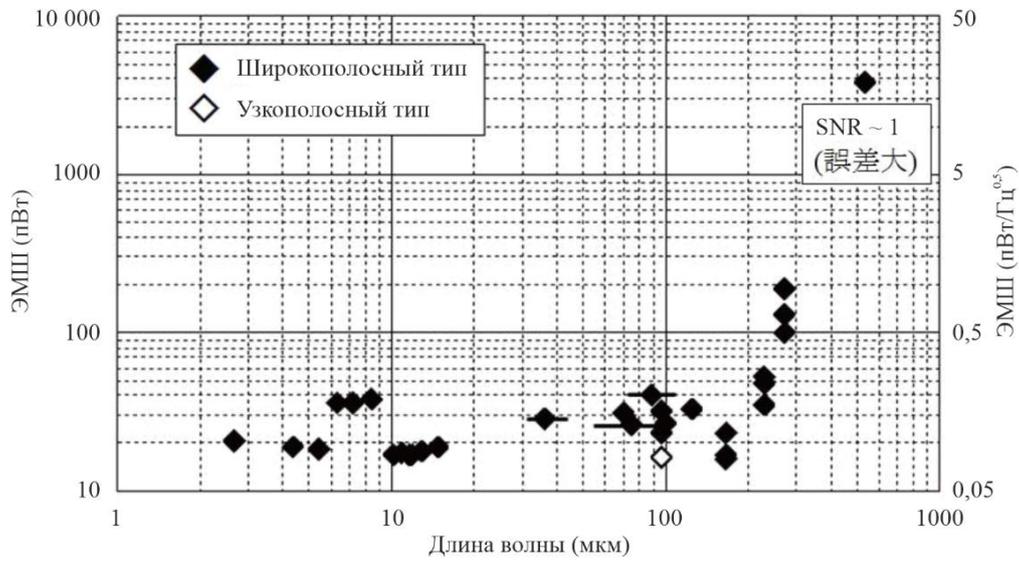
Диаграмма направленности луча терагерцевого матричного датчика QCL с количеством пикселей 320×240 и плотностью пикселей $23,5 \text{ мкм}$



Report SM.2352-18

РИСУНОК 19

Зависимость длины волны ЭМШ терагерцевого матричного датчика



Report SM.2352-19

РИСУНОК 20

Внешний вид терагерцевой камеры



Report SM.2352-20

ТАБЛИЦА 9

Технические характеристики терагерцевой камеры

Метод	Тип болометра
Формат матрицы	Количество пикселей 320 × 240 Плотность пикселей 23,5 мкм
Поле обзора	Примерно 15° × 11° (при оснащении линзой с фокусным расстоянием в 28 мм)
Частота кадров	30 Гц
Получаемый результат	Данные в цифровом изображении USB2.0 Синхронный сигнал BNC
Функция блокирования изображения	Синхронный сигнал: 15 Гц, 7,5 Гц, 3,75 Гц, 1,875 Гц (результат на выходе TTL + 5 В)
Функция обработки сигнала	Интеграция кадра Пространственный фильтр
Вес	Около 550 г (без линзы и фильтра)

5.3 Спектроскопия

Спектроскопические системы можно подразделить на обычную инфракрасную спектроскопию с преобразованием Фурье (FTIR), спектроскопические системы с изменением длины волны и терагерцевую спектроскопию с разрешением во времени (ТГц-TDS). Система Мартина–Паплета, которая представляет собой усовершенствование обычной инфракрасной технологии, служит одним из примеров FTIR. Спектроскопические системы с изменением длины волны используют трубку обратной волны, чтобы непосредственно менять длину терагерцевой волны, а также методы изменения частот, в которых используются два лазера с меняющейся длиной волны. Вместе с тем существуют вопросы, касающиеся диапазона изменений и точности длины волны.

5.3.1 Спектроскопия с разрешением во времени (ТГц-TDS)

В прошлом десятилетии был разработан новый мощный инструмент для осуществления измерений в диапазоне ТГц, называемый спектроскопией с разрешением во времени (ТГц-TDS). Электромагнитные волны моноцикла импульса терагерцевого излучения генерируются и измеряются за счет регулируемого по времени обнаружения с помощью короткого лазерного импульса спектроскопии ближнего ИК-диапазона (NIR). Обычно моноцикл импульса терагерцевого излучения содержит весьма обширную часть спектра, как правило от 100 ГГц до 10 ТГц. Этот метод получает широкое распространение в связи с осуществлением диагностики материалов.

5.3.2 Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR)

Многие материалы обладают так называемыми спектральными отпечатками пальцев в диапазоне частот выше 275 ГГц. Действительно, спектроскопия в диапазоне частот выше около 1000 ГГц проводится с 1960-х годов, и уже разработаны некоторые коммерческие продукты. Система охватывает полосу частот полностью вплоть до среднего ИК-диапазона. В среднем ИК-диапазоне спектральные характеристики определяются внутримолекулярным поведением, и уже существуют спектральные библиотеки, содержащие данные практически обо всех стандартных химических веществах. Так, химики могут использовать коммерческую систему в качестве обычного инструмента для идентификации неизвестных материалов. В дальнем ИК-диапазоне или в терагерцевой полосе частот, спектральные характеристики отпечатков пальцев зависят от межмолекулярного поведения, поглощения фононов, водородных связей или аналогичных условий состояния молекул. В отличие от среднего ИК-диапазона, здесь нет никакой коммерческой спектральной библиотеки.

5.3.3 Анализ материалов

Анализ характеристик твердых и жидких веществ осуществляется с помощью спектрометрии ТГц-TDS. Например, используется поляриметрия полосы ТГц для оценки характеристик двойного лучепреломления материала на каждой частоте. Помимо устройств, использующих такую функцию оценки, на рынке начинают появляться также устройства, оснащенные аналитическими функциями, такими как анализ оптических изомеров полимеров, позволяющими разрабатывать новые материалы. С другой стороны, несмотря на то что терагерцевые волны весьма подвержены поглощению водой, стало возможным проводить измерения образцов, содержащих воду, что традиционно считалось трудноосуществимой задачей, за счет использования спектрометрии ослабленного полного отражения (метода ATR) на частотах ТГц.

С помощью этого метода характеристики образца можно получить, не проникая в воду, и можно также обнаруживать клетки в жидкой питательной среде, в связи с чем этот метод ATR рассматривается в качестве эффективного метода для терагерцевых применений в биотехнологии.

5.4 Неразрушающие испытания

5.4.1 Применения, касающиеся промышленных продуктов

Спрос на формирование изображения в диапазоне ТГц для промышленных продуктов и материалов по-прежнему остается весьма устойчивым. Это объясняется тем, что только использование радиоволн терагерцевых полос или таких излучений, как рентгеновские лучи, позволяет видеть насквозь непрозрачные предметы в видимом свете. Однако применение ионизирующего излучения, например рентгеновских лучей, связано с рисками и другими ограничениями, в то время как радиоволны терагерцевых полос обладают низкой энергией как кванты и не создают ионизирующих излучений, и использование рентгеновских лучей для обнаружения таких легких элементов, как углерод, представляется проблематичным. Из радиоволн вплоть до терагерцевых полос, в сравнении в частности с микроволнами, которые, в принципе, имеют большую длину волны и плохое разрешение изображения (пространственное разрешение), миллиметровые волны вплоть до терагерцевых волн, которые обеспечивают пространственное разрешение в пределах миллиметра или меньше, представляются намного более полезными для применений, обеспечивающих получение изображений.

В промышленных продуктах нашей повседневной жизни используется огромное количество неметаллических материалов, способных передавать терагерцевые волны. Некоторые наиболее типичные из этих продуктов изготавливаются из пластика, винила и бумаги, в то время как другие делаются из керамики и резины и обладают различными функциями, а также часто имеют высокую добавленную стоимость. Примерами могут служить медицинские компоненты, в которых используется теплостойкость керамики и гибкость резины. Эти продукты широко применяются в энергетике и медицине и очень нужны для обнаружения посторонних частиц. Размеры дефектов часто составляют по крайней мере около 1–10 мкм, в связи с чем требуются высокие уровни отношения S/N и скорости.

Терагерцевая СТ технология является весьма перспективной с точки зрения развития терагерцевой технологии получения изображений при неразрушающих испытаниях, которые невозможно было бы проводить, используя рентгеновские лучи. Терагерцевые волны, которые могут получать спектроскопическую информацию, могут обнаруживать дефекты, а также получать информацию о характере этих дефектов, и привлекают внимание как технология, способная обеспечить новые дополнительные преимущества для анализа. К дефектам, требующим обнаружения, относятся посторонние частицы, а также неровности тонкой пленки и, среди прочего, дефекты в защитном покрытии.

Желаемая глубина точности составляет обычно примерно несколько мкм, однако при проверке подложки полупроводника и др. бывают случаи, когда требуются электрические характеристики тонкой пленки с толщиной менее примерно нескольких 100 нм. Ранее измерение такой тонкой пленки с использованием терагерцевых волн было связано с трудностями, однако благодаря достигнутому в последнее время прогрессу в области развития технологии это становится вполне возможным.

5.4.2 Биологические и медицинские применения

В настоящее время существует широкий круг применений для проведения клинического диагностического контроля, начиная с заболеваний, связанных с образом жизни, вплоть до маркеров онкологических заболеваний, если включить сюда исследовательские применения. В число базовых принципов клинического обнаружения белковых мишеней входит также множество других принципов, которые моделируются на основе механизма признания организмов, такого как реакция антиген-антитело.

Однако для того чтобы различать в теле человека наличие или отсутствие такого признания, требуется более высокий уровень обработки. Например, в рамках метода обнаружения аллергенов, в котором используется метод клинического контроля, известный под названием иммуоферментного анализа, иммобилизованное антитело, которое конкретно ассоциируется с аллергеном, фиксируется на субстрате и после реакции с образцом обнаруживается наличие или отсутствие этого аллергена с помощью использования антитела обнаружения или маркера обнаружения. Таким образом применяется многоэтапная реакция, чтобы показать результаты контроля с помощью цвета или свечения. Такие маркеры предназначены для того, чтобы эффективно вырабатывать цвет с помощью самой незначительной реакции с субстратом, а при хемилюминесцентных измерениях достигается чувствительность обнаружения порядка пикограмма. Однако проведение многоэтапного контроля также связано с проблемами, такими как потребности в многочисленных реагентах, продолжительность времени контроля и повышение фактора ошибок за счет многоэтапной обработки данных.

На этом фоне группа исследователей в Германии в 2000 году сообщила о возможности безмаркерного обнаружения за счет использования терагерцевых волн. Исследователи продемонстрировали в рамках своих экспериментов наличие различий в терагерцевой полосе между индексами рефракции и пропускания в одноцепочечной и двухцепочечной молекулах ДНК. Впоследствии группа исследователей в Соединенных Штатах Америки предложила метод обнаружения, предусматривающий связывание авидин-биотина с помощью фазовой задержки в форме волны спектроскопии с разрешением во времени ТГц-TDS. Это означает, что появляется возможность обнаруживать наличие/отсутствие связывания без использования маркеров с помощью изменения индекса рефракции и поглощения биологических полимеров в терагерцевых полосах частот. В Японии использовалась система измерения с формированием изображения, включающая квантово-каскадный лазер и камеру диапазона ТГц, в рамках которой линия мелкомолекулярных соединений фиксировалась на мембране фильтра, а белки, которые конкретно с ними ассоциировались, были успешно обнаружены в виде изображения, что подтверждает возможность обнаружения биологических веществ, таких как белки, быстрым, удобным и безмаркерным способом.

С другой стороны, одной из важных тем технологического развития является проблема чувствительности обнаружения. Уровень чувствительности, требуемый для клинического контроля, находится в пределах от миллиграмма до пикограмма, а для проведения безмаркерного контроля особенно необходима чувствительность в пределах от нанограмма до пикограмма. В качестве примера применений контроля, требующих такие небольшие величины чувствительности, можно привести применение, используемое для целей прогнозного диагноза аутоиммунных заболеваний, возникающих в связи с присутствием аутоиммунного антитела в крови.

Как правило, защита от проникновения бактерий и вирусов из окружающей среды обеспечивается за счет иммунной реакции в организме. Однако в случае аутоиммунных заболеваний вещества, участвующие в обеспечении иммунитета в организме, атакуют организм. Например, при заболевании диабетом 1-го типа были обнаружены аутоантитела, нацеленные на три типа панкреатических белков, причем известно, что 70–90% пациентов имеют по крайней мере одно из этих аутоантител. Кроме того, исследовалась связь между этими тремя аутоантителами и их распространением и была установлена четкая взаимосвязь. Поэтому с помощью проведения предварительного контроля, чтобы узнать, существуют ли в организме эти аутоантитела, может быть спрогнозировано начало их появления, что можно также использовать в целях профилактики.

Желательно, чтобы такой контроль осуществлялся в рамках медицинских осмотров, и важно, чтобы была разработана удобная, быстрая и недорогостоящая технология контроля. При ее применении в рамках медицинских осмотров было бы идеально, чтобы в ходе одного контроля могли быть спрогнозированы различные заболевания, а не только упомянутый ранее диабет 1-го типа. Другими словами, для проведения контроля за один раз с помощью реакции аутоантигенов различных заболеваний, зафиксированных на единой микросхеме контроля, с небольшими объемами аутоантител, обнаруженных в образце крови, требуется такая технология, которая позволяла бы осуществлять безмаркерный контроль и обнаруживать биологические вещества размером порядка пикограмм.

По данным обследования, проведенного Фуджи-Кейзай, требуемый в рамках клинических исследований объем лекарственных препаратов для исследования обычной антисыворотки, включая контроль, основанный на реакции антиген-антитело, оценивался на внутреннем рынке в 157,2 млрд. иен в 2008 финансовом году и в 168 млрд. иен в 2013 финансовом году. Этот рынок охватывает более 40% от рынка исследуемых лекарственных препаратов, что составляет самую большую его долю. С их появлением предполагается, что на этом рынке не смогут оказаться технологии с использованием маркеров и высокоточные технологии контроля и вряд ли они смогут способствовать расширению размеров этого рынка.

С другой стороны, такие потребности в безмаркерных методах отслеживания веществ ощущаются в различных областях и их побочный эффект является существенным. Это включает сферу безопасности с точки зрения проверки на наличие опасных газов, бактериологического оружия и взрывчатых веществ; проверку на наличие инфекционных вирусов, таких как новые типы гриппа, когда возникает опасение в отношении пандемии; и проверку на наличие микроэлементов в окружающей среде, остатков пестицидов в сельскохозяйственной продукции и остатков антибиотиков в организме животных.

Поэтому важно продолжать начатые разработки в области технологий безмаркерного контроля в качестве инфраструктуры для проведения исследований, касающихся отбора контрольных веществ на основе этой технологии, а также для осуществления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в целях повышения чувствительности обнаружения. В качестве одной из технологий повышения чувствительности обнаружения терагерцевых волн применяется метод использования в качестве датчика металлической решетки, которая ведет к технологиям, позволяющим обнаруживать белки размером порядка нанogramм/мм.

За счет объединения технологии безмаркерного обнаружения микроэлементов с технологией формирования изображения, сфера их использования будет и далее расширяться. В частности, можно будет осуществлять всеобъемлющий контроль белков, которые конкретно ассоциируются с соединениями, имеющими малую молекулу, и с соединениями сахарной цепи, что станет технологией, которая позволит добиться прогресса в области обнаружения наркотиков. Кроме того, технология безмаркерного обнаружения с помощью терагерцевых волн позволит внести ясность в отношении существования белков, которые до настоящего времени оставались незамеченными, поскольку их нельзя было маркировать, и предполагается, что это станет мощной технологией контроля и обнаружения в рамках исследований, проводимых в области биологических наук.

5.4.3 Система неразрушающего контроля на основе синтетической многополосной системы формирования изображения LFMCW

В ТГц-системе неразрушающего контроля также используется сигнал FMCW. Разработана синтетическая многополосная система формирования изображения LFMCW. Для дальнейшего расширения полосы частот системы и повышения ее разрешения по дальности системы формирования изображения, работающие в разных диапазонах частот, объединяются и синтезируются. С помощью метода мультиплексирования с разделением по времени выполняется развертка по частоте нескольких каналов с последующим сшиванием данных каналов промежуточной частоты для получения синтезированной полосы частот. Также разработана и реализована квазиоптическая система фокусировки с общей апертурой. В ней совмещены точки наблюдения нескольких каналов. Наконец, эффективность синтетической системы в диапазоне 110–500 ГГц подтверждена в экспериментах по формированию трехмерного изображения. Таким образом, формирование изображения в диапазоне ТГц постепенно становится новым дополнительным методом неразрушающего контроля.

5.5 Применения ТГц-радаров

ТГц-радары отличаются от микроволновых меньшей шириной импульса, меньшим размером антенны, меньшей шириной луча и лучшей направленностью, что позволяет выявлять более мелкие цели и достигать более точного позиционирования. Кроме того, благодаря возможности формирования изображения сквозь материалы ТГц-радар позволяет обнаруживать скрытые или задымленные объекты.

5.5.1 Активное радиолокационное формирование изображения

Активное радиолокационное формирование изображения в диапазоне ТГц может быть реализована главным образом с помощью радаров SAR/ISAR.

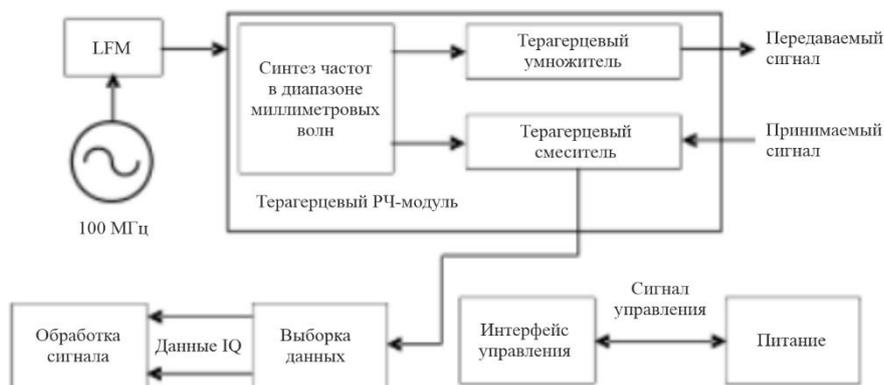
Формирования изображения с помощью радаров с синтезированной апертурой (SAR) – это технология получения изображений, не ограничивающаяся оптической апертурой обнаруженной цели. В зависимости от того, движется ли радар или нет, формирование изображения можно разделить на формирование изображения с помощью SAR и формирование изображения с помощью радара с инверсионной синтезированной апертурой (ISAR). Благодаря сверхширокой полосе частот, сверхузкому импульсу и лучшей направленности терагерцевой волны, ТГц-радары SAR и ISAR позволяют получать изображения очень высокого разрешения по сравнению с традиционными микроволновыми радарными.

В зависимости от методов генерирования терагерцевых волн ТГц-радары с формированием изображения можно разделить на электронные и фотонные. Из-за трудностей реализации фотонных радаров большинство разрабатываемых ТГц-радаров с формированием изображения основаны на электронном методе. В данном разделе описываются главным образом электронные терагерцевые радары с формированием изображения.

Обычно в состав ТГц-радаров с формированием изображения среди прочего входят синтезаторы частот, умножители, смесители, маломощные усилители (LNA), блоки выборки данных и блоки обработки сигналов. В отличие от традиционных импульсных радаров, ограничиваемых уровнем мощности современных источников терагерцевого сигнала, большинство ТГц-радаров с формированием изображения работают с частотно-модулированными непрерывными сигналами (FMCW). Типичная блок-схема ТГц-радар с формированием изображения показана на рисунке 21 [5].

РИСУНОК 21

Типичная блок-схема ТГц-радар с формированием изображения



Report SM.2352-21

За последние одно или два десятилетия во многих институтах и университетах во всем мире были разработаны различные ТГц-радары с формированием изображения. Большинство из них находятся на стадии экспериментов или прототипов, но есть и такие, которые близки к практическому применению. В таблице 10 приведены основные характеристики нескольких систем ТГц-радаров с формированием изображения.

ТАБЛИЦА 10

Характеристики нескольких систем ТГц-радаров с формированием изображения.

	Система А [6]	Система В [6]	Система С [6]	Система D [6][7]
Рабочая частота (ГГц)	330	670	670	300
Ширина полосы (ГГц)	6,4	28,8	28,8	44
Выходная мощность (мВт)	10	0,5	1,2	1
Режим модуляции	FMCW	FMCW	FMCW	FMCW
Режим обнаружения	Сканирование лучом	Сканирование лучом	ISAR	ISAR
Рабочее расстояние (м)	20	25	2–8	700 (фигура человека)
Разрешение (см)	1	1	1,3	0,37
Год	2010	2011	2013	2015

Поскольку характеристики терагерцевых устройств улучшаются и конструкция систем становится все более совершенной, ожидается, что в следующем десятилетии технология ТГц-радаров с формированием изображения достигнет явного прогресса и получит практическое применение.

5.5.2 Бесконтактный досмотр

ТГц-радар может использоваться для бесконтактного досмотра. Благодаря способности проникать сквозь одежду, картон и другие неполярные материалы, сохраняя при этом высокое разрешение, ТГц-радар может обеспечивать получение объемных изображений высокого разрешения скрытых опасных грузов. Расстояние обнаружения может достигать 20–100 м [8], что позволяет обеспечить раннее предупреждение за пределами радиуса агрессивного воздействия опасных грузов. Кроме того, низкая энергия ТГц-фотонов, которая намного меньше энергии ионизации человеческой кожи, позволит исключить беспокойство людей по поводу радиационного излучения.

5.5.3 Сканирующая контрольно-пропускная система

Сканирующие контрольно-пропускные системы, такие как система, показанная на рисунке 22, которые обладают высокой пропускной способностью и эффективностью обнаружения, согласно исследованиям могут применяться не только в целях обнаружения опасных металлических и неметаллических предметов, но и для предотвращения длинных очередей пассажиров перед контрольно-пропускными пунктами аэропортов. На рисунке 22(a) представлено схематическое изображение сканирующей контрольно-пропускной системы с двумя панелями, которая позволяет досматривать человека с обеих сторон одновременно. На рисунке 22(b) показана блок-схема интегрированных передатчика и приемника, которые выполняют функции FMCW радара с высоким отношением сигнал/шум [9]. Разрешение таких сканирующих систем с использованием FWCW радара зависит от ширины полосы несущих частот. В соответствии с Регламентом радиосвязи следующие полосы частот обеспечивают для радиолокационных служб в качестве первичной службы непрерывную полосу частот шириной более 8 ГГц:

- полоса шириной 8 ГГц: 92–94 ГГц, 94–94,1 ГГц, 94,1–95 ГГц и 95–100 ГГц;
- полоса шириной 12,5 ГГц: 136–141 ГГц и 141–148,5 ГГц;
- полоса шириной 10 ГГц: 238–240 ГГц, 240–241 ГГц и 241–248 ГГц.

Хотя в текущей версии Регламента предусмотрена максимальная непрерывная полоса частот шириной 12,5 ГГц, требуемое для системы сканирования разрешение по дальности менее 5 мм не может быть достигнуто при использовании диапазонов частот ниже 275 ГГц. В таблице 11 также приведены другие технические характеристики сканирующих контрольно-пропускных систем. При работе на ТГц-частотах на характеристики системы может влиять материал одежды. Конкретные параметры, такие как выходная мощность и тип антенны сканирующей контрольно-пропускной системы, должны быть тщательно исследованы с учетом характеристик материалов одежды по затуханию и отражению в рабочем диапазоне частот 275–600 ГГц. На рисунке 23 показана взаимосвязь между возможными диапазонами частот для работы сканирующих контрольно-пропускных систем и затуханием волн вследствие поглощения в атмосферных газах. В попытке избежать создания вредных помех применениям пассивных служб, работающих в совпадающих и соседних полосах частот, предлагаются полосы 1, 2, 3 и 4 с центральными частотами соответственно 325 ГГц, 380 ГГц, 447 ГГц и 555 ГГц¹.

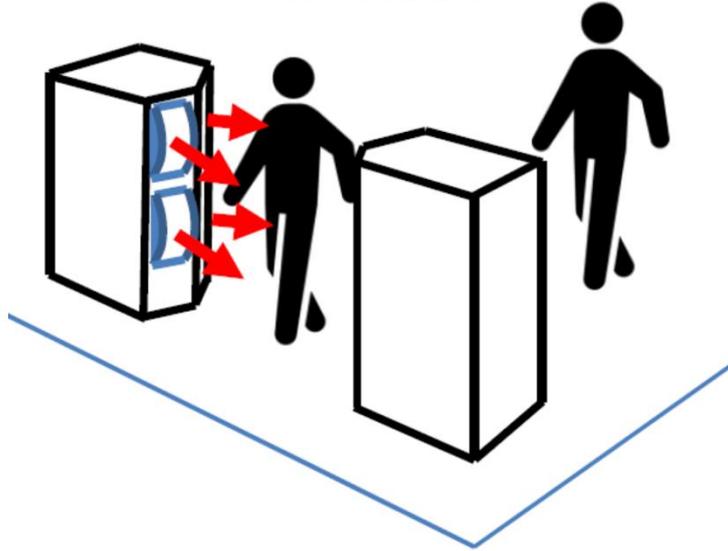
В не относящихся к МСЭ публикациях [10]–[15] приведены характеристики передачи, измеренные значения коэффициента поглощения и показатели преломления в терагерцевом диапазоне частот для некоторых материалов одежды. Они указывают на то, что прозрачность материалов одежды зависит от рабочих частот, толщины и плотности материала, а также рисунка тканых узоров и что по мере увеличения частоты прозрачность некоторых материалов одежды может изменяться от полной прозрачности до абсолютной непрозрачности. Металл, а также контрабандные материалы, спрятанные под одеждой, будут различимы в диапазоне частот 0,1–1 ТГц, если их отражательная способность выше, чем у материалов одежды.

¹ Следует отметить, что все предлагаемые диапазоны частот сканирующей контрольно-пропускной системы перекрывают полосы частот, определенные для использования в применениях пассивных служб, см. пункт 5.565 РР. Необходим дополнительный анализ, чтобы определить, какие практические шаги можно предпринять для защиты этих пассивных служб от вредных помех.

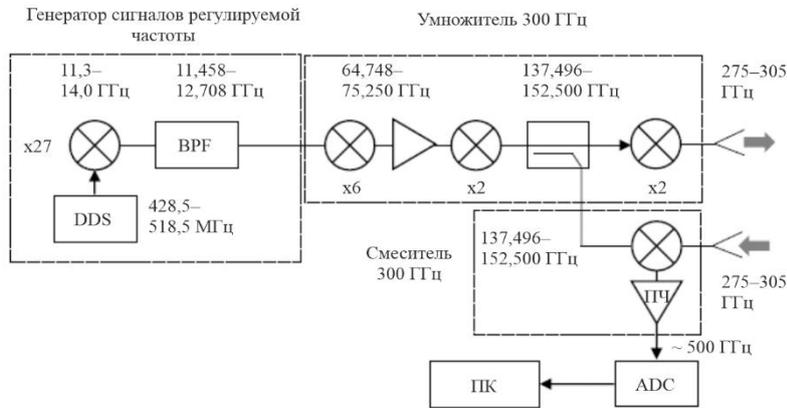
РИСУНОК 22

Концепция сканирующей контрольно-пропускной системы с использованием ТГц-частот

а) Схематическое изображение контрольно-пропускной сканирующей системы с использованием ТГц-частот



б) Блок-схема контрольно-пропускной сканирующей системы с использованием ТГц-частот



Report SM.2352-22

ТАБЛИЦА 11

Технические характеристики сканирующих контрольно-пропускных систем

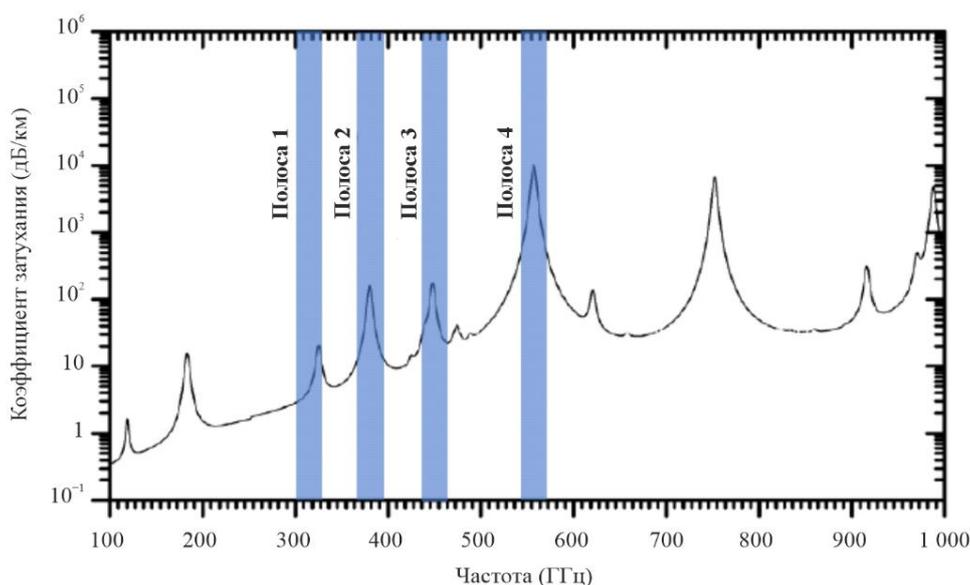
Параметр	Значение
Центральная частота (ГГц)	325, 380, 447, 555
Выходная мощность на частоте 325 ГГц (мВт)	> 10
Диаграмма направленности антенны	Гауссова
Тип антенны	Рупорная
Ширина полосы частот (ГГц)	30
Разрешение по дальности (мм)	5

ТАБЛИЦА 11 (окончание)

Параметр	Значение
Максимальное расстояние обнаружения (м)	3
Скорость пешехода (км/ч)	2–4
Количество радаров	8–16
Обнаруживаемые скрытые материалы	Металл, керамика, взрывчатые вещества, горючие жидкости

РИСУНОК 23

Возможный рабочий диапазон частот сканирующей контрольно-пропускной системы



Report SM.2352-23

6 Интегрированные системы зондирования и связи (ISAC) в сети радиодоступа

Первоначально сети радиодоступа (RAN) предназначались для беспроводной связи между базовыми станциями и пользовательским оборудованием. В связи с быстрым ростом спроса на услуги, основанные на местоположении, такие как рекламные push-уведомления на основе местоположения терминала, современные системы RAN обладают определенной возможностью позиционирования, если опорные сигналы системы могут использоваться для обнаружения объектов окружающей среды, что можно рассматривать как попытку интегрировать в систему связи функции зондирования.

Ожидается, что будущие сети радиодоступа будут перемещены в диапазоны более высоких частот, включая терагерцевый диапазон, где доступен большой объем спектра. Это расширит возможности передачи данных в сетях радиодоступа, а также возможности зондирования, что сделает их сопоставимыми с типичными радиолокационными системами. Вопросы использования интегрированных систем зондирования и связи в сети радиодоступа находятся в стадии изучения [16]–[19].

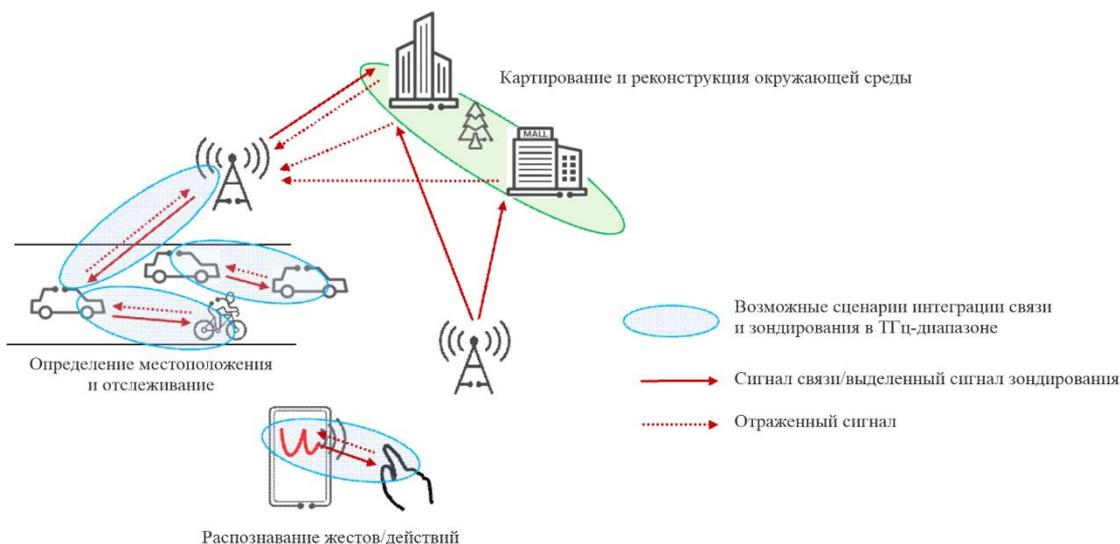
Пример использования таких интегрированных систем зондирования в сети радиодоступа показан на рисунке 24, где каналы, подходящие для работы в полосах частот ТГц-диапазона, отмечены синими овалами. Базовые станции или оконечные устройства могут извлекать из полученных РЧ-сигналов информацию о представляющих интерес объектах окружающей среды, такую как присутствие, расстояние до объекта, скорость движения, форма и ориентация. Эту информацию можно использовать для таких услуг, как определение местоположения и отслеживание, картирование и реконструкция

окружающей среды, а также распознавание жестов/действий. Кроме того, ее можно использовать для улучшения характеристик услуг связи. Что касается источника РЧ-сигналов, то это могут быть либо сигналы связи, либо специальные сигналы зондирования.

Совмещенная система зондирования и связи повысит эффективность использования спектра.

РИСУНОК 24

Пример использования интегрированной системы зондирования и связи ТГц-диапазона в сети радиодоступа



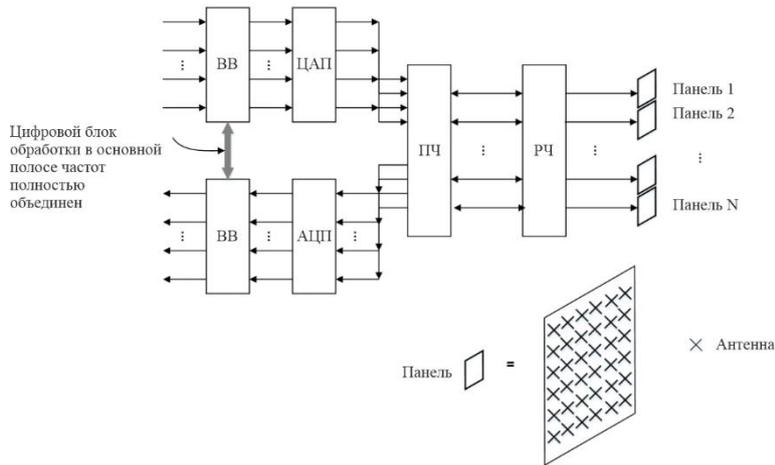
Report SM.2352-24

На рисунке 25 показана схема реализации интегрированной системы зондирования и связи ТГц-диапазона, включающая антенную панель, радиочастотный (РЧ) тракт, блок промежуточной частоты (ПЧ), аналого-цифровой (АЦ)/ЦАП-дискретизатор и блок обработки сигналов в основной полосе частот. Блоки обработки сигналов в основной полосе частот передатчика и приемника соединены через сеть цифрового шлейфа для совместной обработки переданных и принятых сигналов зондирования. Один РЧ-канал может управлять одной или несколькими антенными панелями с несколькими антенными элементами.

На основе этой схемы на рисунке 26 представлена реализация входного РЧ-тракта интегрированной системы зондирования и связи ТГц-диапазона с четырьмя передающими и 16 приемными каналами (4Т16Р). В частности, он состоит из одного набора микросхем передатчика и четырех наборов микросхем приемника. Как показано на рисунке 26(а), в каждом наборе микросхем четыре канала совместно используют один повышающий или понижающий преобразователь передатчика или приемника, и каждый канал снабжен независимыми фазовращателем и управляемым усилителем и подключен к антенной панели с единственным элементом. Система гетеродина (LO) используется совместно для передаваемых и принимаемых сигналов.

РИСУНОК 25

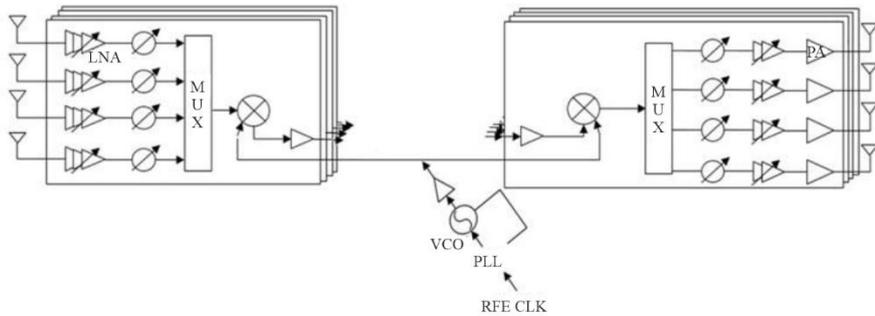
Схема реализации передатчика и приемника интегрированной системы зондирования и связи в ТГц-диапазоне



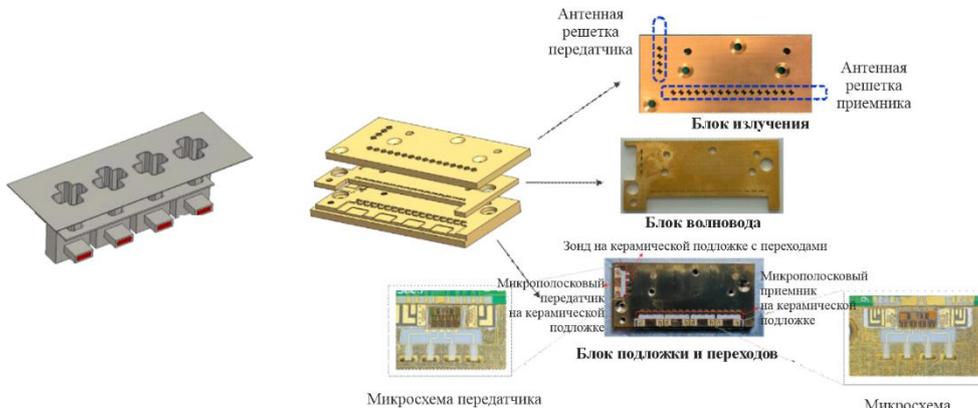
Report SM.2352-25

РИСУНОК 26

Микросхема входного РЧ-тракта передатчика и приемника интегрированной системы зондирования и связи в ТГц-диапазоне частот с четырьмя передающими и 16 приемными каналами (4Т16R)
 а) Блок-схема РЧ-тракта передачи/приема; б) Изображение модуля РЧ-тракта 4Т16R



а)



б)

Report SM.2352-26

В зависимости от требований различных систем к рабочим частотам при реализации микросхемы придется выбирать между различными полупроводниковыми процессами. Например, частота отсечки SiGe-транзисторов обычно подходит для микросхем, работающих в диапазонах частот ниже 300 ГГц [20], а InP-транзисторы благодаря лучшей подвижности электронов применяются в устройствах с рабочей частотой до 600 ГГц [21]. Для повышения выходной мощности передатчика и чувствительности приемника также рассматривается гетерогенная интеграция с полупроводниковыми приборами на основе соединений III–V групп, таких как GaN и InP.

7 Деятельность, касающаяся терагерцевой области, проводимая в рамках разработки международных стандартов

В 2008 году в рамках Рабочей группы IEEE 802.15 была создана Специальная группа по терагерцевым частотам (СГ ТГц). Ее цель заключалась прежде всего в стандартизации связи на терагерцевых частотах и соответствующих сетевых применений, работающих в терагерцевых полосах частот в диапазоне 275–3000 ГГц. Такие применения связи в диапазоне ТГц включали бы: беспроводную связь компонента с компонентом, борта с бортом, машины с машиной, человека с машиной и человека с человеком (в помещении и вне помещения). Применения связи в диапазоне ТГц охватывают многочисленные категории с различными требованиями. Предусматривается, что связь в диапазоне ТГц в целом будет осуществляться с помощью методов беспроводной модуляции ограниченной сложности, ненаправленных антенн и/или направленных антенных систем, которые, как правило, будут обеспечивать очень высокие скорости передачи данных, кратные 10 Гбит/с и до 100 Гбит/с, обеспечивая мощность, равную мощности будущих волоконно-оптических линий. Беспроводные терагерцевые системы могли бы поддерживать расстояния передачи, составляющие от очень коротких дистанций (несколько сантиметров или менее) до относительно больших расстояний в несколько сот метров.

СГ ТГц сосредоточила свои усилия на вопросах открытого спектра, моделировании каналов и на мониторинге развития технологии. С развитием более зрелых технологий интегрированных передатчиков и приемников Рабочая группа 802.15 сделала шаг вперед в направлении разработки первого стандарта беспроводной связи в диапазоне 300 ГГц, учредив в 2014 году Целевую группу 3d, которая завершила свою работу в октябре 2017 публикацией поправки к стандарту IEEE 802.15.3d-2017. Эта поправка основана на стандарте 802.15.3c и определяет физический уровень беспроводной коммутируемой связи пункта с пунктом для стандарта IEEE 802.15.3-2016, работающей на скоростях передачи данных РНУ, как правило составляющих до 100 Гбит/с. Рассматривается оперативная деятельность в полосах частот 252–321 ГГц на расстояния от нескольких сантиметров до нескольких сотен метров. Разработка стандарта IEEE 802.15.3d-2017 велась параллельно с разработкой стандарта IEEE 802.15.3e-2017, в который добавлена поправка о высокоскоростной связи на предельно малых расстояниях (HRCP) на частоте 60 ГГц. Большая часть MAC-уровня, а также схемы модуляции и кодирования, определенные в обеих поправках, идентичны.

Потенциальные применения, представляющие интерес, включают беспроводные центры данных, загрузку из информационного киоска, беспроводную связь внутри устройств и беспроводную связь в целях обеспечения промежуточного трафика и периферийного трафика.

Перспективные возможности разработки дальнейших поправок в ТГц-диапазоне частот оцениваются в Постоянном комитете по ТГц-частотам, который в 2018 году заменил СГ ТГц.

8 Резюме

Характеристики терагерцевых устройств и систем, обсуждаемые в настоящем Отчете, быстро совершенствуются за счет прогресса в технологии создания этих устройств. Терагерцевые беспроводные системы связи в частности могут обладать большим потенциалом для высокоскоростной передачи данных, близкой к 100 Гбит/с, обсуждение которой ведется в настоящее время в рамках IEEE 802. Необходимо будет принять во внимание результаты исследований о совместном использовании частот пассивными и активными службами, а пересмотр РР, чтобы в ближайшем будущем представить эти устройства на рынке.

9 Справочные документы

- [1] J. Antes *et al.*, High Data Rate Wireless Communication using a 240 GHz Carrier IEEE 802.15-14-0017-00-0thz, Los Angeles, January 2014; <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/14/15-14-0017-00-0thz-high-data-rate-wireless-communication-using-a-240-ghz-carrier.pdf>
 - [2] S. König *et al.*, Wireless sub-THz communication system with high data rate, Nature Photonics 7, 977–981 (2013), <http://www.nature.com/nphoton/journal/vaop/ncurrent/abs/nphoton.2013.275.html>
 - [3] M. Fujishima, 300-GHz-band CMOS transceiver for ultrahigh-speed terahertz communication, Proc. SPIE, Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XII (2019).
 - [4] APT/ASTAP/REPT-04 – Technology trends of telecommunications above 100 GHz.
 - [5] WU Fu-Wei *et al.*, A 220GHz terahertz Synthetic Aperture Radar, Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, Vol. 15, No. 3, Jun. 2017.
 - [6] D.S. li *et al.*, Research Progress of THz Imaging Radar System, Journal of Microwaves, Vol. 31, No. 6, Dec. 2015.
 - [7] H.Q. Wang *et al.*, Review of Terahertz Radar Technology, Journal of Radars, Vol. 7, No. 1, Feb. 2018.
 - [8] X.B. Yang *et al.*, Terahertz Band Radar, National Defense Industry Press (China), December 2017.
 - [9] C. Otani *et al.*, Development of MMW-to-THz Radar Imaging Technology and Systems, 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), September 2020.
 - [10] D.T. Petkie, *et al.*, “Active and passive millimeter and sub-millimeter-wave imaging,” in Proc. SPIE, 2005, vol. 5989, pp. 598918-1 – 598918-8.
 - [11] A.J. Gatesman, *et al.*, “Terahertz behaviour of optical components and common materials,” in Proc. SPIE, 2006, Vol. 6212, pp. 62120-E1 – 62120-E12.
 - [12] M.C. Kemp, “Millimetre wave and terahertz technology for the detection of concealed threats: a review,” in Proc. SPIE, 2006, Vol. 6402, pp. 64020D-1-64020D-19.
 - [13] R. Appleby and H. B. Wallace, “Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region,” IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. 55, No. 11, pp. 2944-2956, Nov. 2007.
 - [14] R.E. Miles, X.-C. Zhang, H. Eisele, and A. Krotkus, (Editors), “Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects,” in NATO Science for Peace and Security Series – B: Physics and Biophysics, Springer, 2007, pp. 225-240.
 - [15] P.F. Goldsmith, *et al.*, “Focal plane imaging systems for millimeter wavelengths,” IEEE Trans. Microwave Theory Techniques., Vol. 41, No. 10, pp. 1664-1675, Oct. 1993.
 - [16] C. Lima *et al.*, Convergent communication, sensing and localization in 6G systems: an overview of technologies, opportunities and challenges, IEEE Access, Vol. 9, June 2021.
 - [17] M. Rahman *et al.*, Framework for a perceptive mobile network using joint communication and radar sensing, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 56, No. 3, June 2020.
 - [18] W. Tong, P. Zhu, *et al.*, 6G: The Next Horizon: From Connected People and Things to Connected Intelligence. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
 - [19] Oupeng Li, Jia He, Kun Zeng, Ziming Yu, Xianfeng Du, et al., “Integrated Sensing and Communication in 6G A Prototype of High Resolution THz Sensing on Portable Device,” in 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), 2021, pp. 544-549.
 - [20] X. Deng, Y. Li, J. Li, C. Liu, W. Wu and Y. Xiong, “A 320-GHz 1x4 Fully Integrated Phased Array Transmitter Using 0.13 um SiGe BiCMOS Technology,” IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, Vol. 5, No. 6, pp. 930-940, Nov. 2015.
 - [21] W.R. Deal *et al.*, “A Low-Power 670-GHz InP HEMT Receiver,” IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, Vol. 6, No. 6, pp. 862-864, Nov. 2016.
-