



6G技术发展愿景与太赫兹通信

冯伟 韦舒婷 曹俊诚

6G technology development vision and terahertz communication

Feng Wei Wei Shu-Ting Cao Jun-Cheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 244303 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20211729

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211729>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

专题: 太赫兹生物物理

6G 技术发展愿景与太赫兹通信*

冯伟¹⁾ 韦舒婷¹⁾ 曹俊诚^{2)†}

1) (江苏大学物理与电子工程学院, 镇江 212013)

2) (中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050)

(2021 年 9 月 16 日收到; 2021 年 10 月 15 日收到修改稿)

6G 无线网络预计在未来提供全球覆盖、高频谱效率、低成本、高安全性、更高智能水平的服务, 为人类社会打造一个无处不在的智能移动网络. 太赫兹无线通信具有高数据传输速率、低延时和抗干扰等特点, 有望在 6G 技术中得到广泛的应用. 本文主要介绍了 6G 技术的规划愿景、发展现状及其关键技术, 分析了太赫兹器件、信道、通信系统以及 6G 技术可能的发展趋势.

关键词: 6G 技术, 太赫兹量子级联激光器, 单行载流子光电探测器, 太赫兹通信

PACS: 43.72.+q, 42.79.Sz, 95.85.Fm, 85.60.Jb

DOI: 10.7498/aps.70.20211729

1 引言

在 1G 到 5G 移动通信的发展过程中, 1G 定义了语音, 2G 实现了移动通信的语音业务以及一些数字消息业务, 3G 定义了移动互联网, 但在 4G 中才得到了移动互联网的最佳解决方案. 如今 5G 无线网络开启了移动通信的新篇章, 推动智能家居、远程医疗、智能物联和虚拟现实等应用的发展. 5G 技术具有低功耗、低延时和高速率等优点. 随着智能终端的快速发展, 无线数据流量急剧增加, 预计到 2030 年及以后 5G 将不能完全满足未来无线数据流量快速增长的需求. 对于 5G 所遗留的问题, 研究人员迫切希望通过 6G 技术来解决, 同时将人类社会重塑成一个无处不在的智能移动社会, 因此 6G 技术正成为各国科技竞争的焦点^[1–3]. 与 5G 相比, 6G 被赋予了更多的性能(表 1). 6G 技术在 5G 技术基础上进一步深入探索, 强调“随时随地随心的智慧网络”的理念, 并且要利用“空-天-陆-海”全融合技术实现全覆盖, 增强网络安全性能, 同时增强 5G 的应用场景, 扩充相关的前瞻性应用.

预计 6G 无线通信技术在未来能提供更高的峰值数据速率、更高的用户体验数据速率、更低的延时性、高移动速率、高频谱效率、高网络能源效率、高连接密度, 具有全球覆盖范围、高安全性、低成本效率等优点.

表 1 5G 与 6G 的性能对比^[4,5]Table 1. Performance comparison between 5G and 6G^[4,5].

性能	5G	6G
峰值数据速率	20 Gbit/s	1—10 Tbit/s
用户体验数据速率	0.1 Gbit/s	1 Gbit/s
时延	>1 ms	<0.3 ms
移动速度	<500 km/h	1000 km/h
全球覆盖率	大约 70%	>99.9%
移动速度	500 km/h	>800 km/h
区域流量密度	0.01 Gbit/(s·m ²)	1 Gbit/(s·m ²)
网络能源效率	比 4G 高 10—100 倍	比 5G 高 10—100 倍
频谱效率	比 4G 高 3—5 倍	比 5G 高 3—5 倍

为实现 6G 无线通信技术, 世界各国提出了各种技术方案, 关键技术主要包括太赫兹 (THz) 技术、新型波束技术、多址接入技术、信道编码技术、大规模多输入多输出 (MIMO) 技术及频谱管理等.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61927813) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn

THz 波 (0.1—10 THz) 作为 6G 技术候选频段之一, 桥接了红外波段和微波波段, 在通信过程中有着很重要的应用前景. 与红外通信相比, THz 波能穿透烟雾和浮尘, 对不同环境适应能力强, 不易受到天气因素的影响, 因此 THz 通信更容易对光束进行跟踪和校准. THz 波还能穿透像木料、陶瓷、塑料、脂肪等非金属和非极性器件, 因此 THz 通信不易受阻挡物干扰而中断, 适应情境更广. 与 X 射线相比, THz 波的能量较小, 对人体不易造成伤害, 故其安全性能更高. 与毫米波段相比, THz 的方向性能比较好, 未经授权的用户很难从较窄的 THz 波束中进行窃听, 这保证了消息的机密性. 另外, THz 通信还可以很好地利用扩频、跳频技术来对抗干扰攻击, 提升攻击者窃取信息的难度. THz 地面通信多适用于局域通信, 具有高数据率和低延迟的特点, 可应用于近距离场景的高效信息传输. THz 通信可以实现几百 Gbit/s 到几十个 Tbit/s 的高数据传输速率, 可满足人们对数据流量指数级增长的需求. 采用 100 Gbit/s 的无线连接, 一秒钟内就能下载大约 25 GB 的蓝光电影^[6]. 而 THz 远距离空间通信在未来发展中非常重要, 各国都在发展空-天融合信息网络, 如卫星集群网络、卫星间骨干网络和星对地网络.

2 6G 技术的发展现状

2018 年 9 月美国联邦通信委员会 (FCC) 公开发表 6G 技术展望, 其中提及实现 6G 技术需要利用 THz 频段. 2020 年 9 月, 美国国防部宣布资助由 30 多所美国大学联合成立的“太赫兹与感知融合技术研究中心”研发 6G, 同时美国太空探索技术公司 (SpaceX) 推出“星链”计划 (图 1), 旨在用卫星作为基站, 建立全球覆盖的卫星互联网, 预计设想实现 50 ms 以内的低时延^[7]. 美国希望通过 THz 技术加卫星链接来实现 6G 技术愿景.

2019 年, 英国电信集团首席网络架构师在行业论坛中表示“5G+卫星网络 (通信、遥测、导航)=6G”, 并希望在 2025 年实现 6G 商用, 其中包括“纳米天线”的广泛部署, “无线光纤”技术实现超快宽带等.

2020 年 4 月 8 日日本总务省发布目标: 到 2025 年, 完成 6G 主要技术的研发; 到 2027 年, 开始 6G 技术试验; 到 2030 年, 正式启用 6G 技术. 随着

大数据时代的到来, 生成的数据量持续增加, 信息设备耗电量惊人, 日本在着眼于 6G 的同时还提出高节能的理念. 日本电报电话公司 (NTT) 和索尼、英特尔在 6G 网络研发上进行合作研发光驱动半导体芯片, 如果研发成功并投入商用, 那么充电一次可待机一年的智能手机也将进入人们的视野.

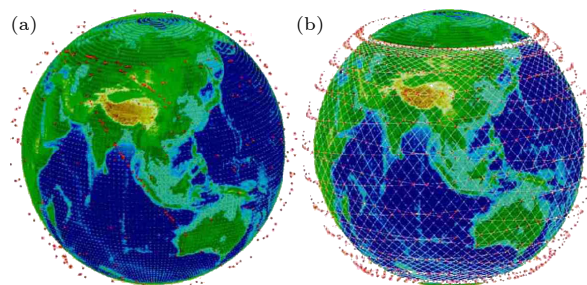


图 1 (a) 420 颗卫星的空间分布; (b) 第一阶段实现了 1584 颗卫星星座, SpaceX 的“星链”计划在全球范围内实现低成本互联网连接服务^[7]

Fig. 1. (a) Spatial segment distribution of 420 satellites; (b) 1584 satellite constellations have been achieved in the first step, SpaceX's "Starlink" plans to realize low-cost Internet connectivity services worldwide^[7].

2019 年 1 月韩国 LG 电子公司联合韩国先进技术研究所 (KAIST) 组建 6G 研究中心, 同年 6 月文在寅在出访欧洲各国时提出与各国首脑商讨 6G 领域的相关合作, 并与芬兰总统签订联合开发 6G 的协议. 2020 年 7 月 14 日韩国三星电子发布《下一代超连接体验》6G 白皮书, 内容包含了三星技术研发、社会趋势、新服务需求、候选技术及预期的标准化时间表. 白皮书阐述了三星的 6G 时代是要将下一代超连接体验带入生活的每一个角落, 并提到 3 项关键的 6G 服务: 沉浸式扩展现实 (XR)、全息图和数字孪生 (图 2). 据三星电子预计, 将在 2028 年实现 6G 早期商业化, 在 2030 年左右实现大规模商业化.

中国在 5G 技术中处于第一梯队, 我国很早已开始布局 6G 研究. 2018 年, 中国通信标准化协会就提出了有关 6G 的愿景和要求, 并启动研究 6G 的关键技术. 2019 年 11 月 3 日, 科技部会同发改委、教育部、工业和信息化部、中科院、自然科学基金委在北京组织召开了 6G 技术研发工作启动会, 会议宣布成立国家 6G 技术研发工作推进组和总体专家组. 2019 年, 中国华为公司在加拿大渥太华成立了 6G 研发实验室, 开始研发 6G 技术, 并与 5G 技术齐头并进. 中兴高级副总裁王翔在 2020 年

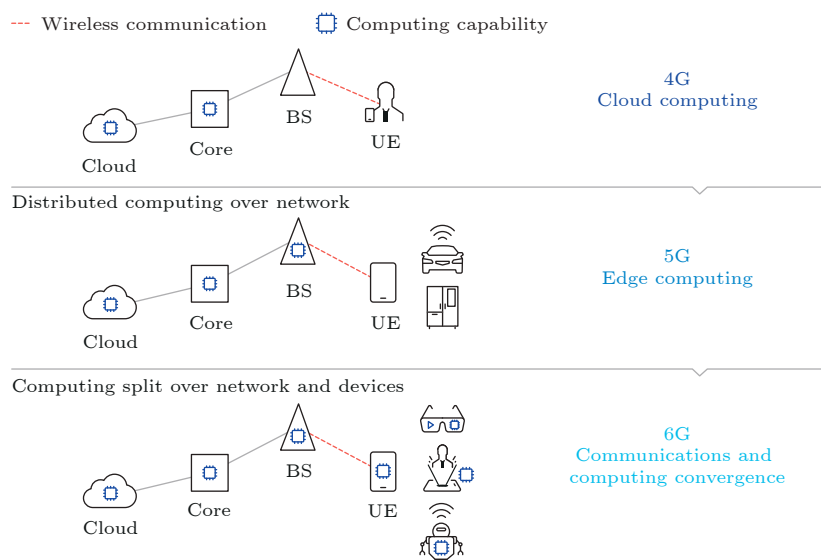


图 2 4G 到 6G 通信和计算融合的体系结构的演化过程 (转自三星 6G 白皮书 6G -The Next Hyper Connected Experience for All)

Fig. 2. Architectural evolution for convergence of communications and computing from 4G to 6G (from 6G-The Next Hyper Connected Experience for All).

9月5日公开表示,中兴科研团队已开始向6G网络的方向进行研发,并攻关6G方面的关键技术.同时中国一些高校也展开了6G研究,其中清华大学和中国移动在2020年5月30日表示将会共同开展面向6G的未来移动通信网络、下一代互联网和移动互联网、工业互联网、人工智能等重点领域的研究.在2020年11月25日举办的世界5G大会上,清华大学崔保国教授表示,6G试验由清华大学牛志升教授主导并于2020年年底开展.

3 6G 技术愿景

3.1 全覆盖:“空-天-陆-海”全融合技术

由表1可知5G的服务区域覆盖范围有限,仅5G地面通信网络无法实现随时随地、无处不在的高质量和高可靠服务,而6G技术要实现的“空-天-陆-海”全融合技术是将卫星通信网络、地面通信网络、海洋通信网络等各种网络技术进行联合,可为偏远地区、无人区、基站毁坏等地区的通信提供便利.无人机(UAV)作为新一代空中通信平台,具有灵活性好、移动性高等特性,是联结地面和卫星之间的中继结构,可以在低空方便卫星访问.基于时分多址接入(TDMA)的两级中继结构,用户可通过随机访问方案向无人机传输数据,无人机通过协调或非协调访问方案转发数据给卫星[8].同时,无人机可以提供大量的数据集,并及时提供灾害预

警,帮助加快救援和恢复工作,但是目前无人机在民用中还面临着像充电、避碰和群集、网络和安全等方面的问题[9].

海洋占地球面积的70%,因此海洋通信网络技术是实现“空-天-陆-海”全融合技术的重要一环.海上机器式通信(MTC)网络主要负责促进船舶之间或船舶与海岸之间的通信,以此来实现各种类型的海洋物联网服务,如海事安全信息服务,该项服务可为船舶提供航行预警、气象预报、水文状况等信息.除此之外,像集装箱跟踪服务还可对货船上的特定集装箱进行地理定位、远程监控[10].但目前,5G并没有重视MTC网络,因此像海上服务的连通性、海上环境、服务需求和无线电频谱等方面仍然面临着许多问题.这些问题需要通过构建MTC系统框架(图3),采用适应不同海上服务和设备要求的无线电/空中接口以及国际认可的无线电频谱等方法来解决,以保障海事相关业务的现代化,同时传递更多的海事信息,尤其在恶劣的海洋环境下,仍可及时做出决策,并有效缓解海上活动和作业偏远的通信问题,使航程更安全更高效[11].

3.2 网络安全

从1G到5G数据传输速率越来越快,但是由于底层网络的复杂性以及身份管理的缺陷,通信网络安全一直以来都是需要重点攻克的问题.1G网络具有模拟通信的性质,信息易受到非法拦截和克

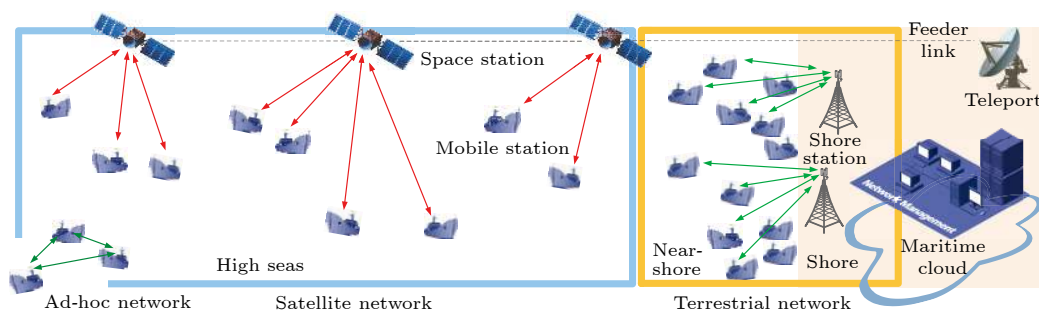


图 3 太空-地球一体化的海上 MTC 系统由卫星-地面综合的网络设施和自组织网络组合而成^[11]

Fig. 3. Space-earth integrated maritime MTC system consisting of a satellite-terrestrial integrated network infrastructure and self-organized networks^[11].

隆, 很难提供有效的安全服务. 2G 网络普遍存在虚假资讯传播和有害广播资讯营销. 基于 IP 通信的 3G 网络将互联网安全漏洞转移到移动网络上. 4G 移动网络中, 更多的新设备和新业务依赖于 IP 通信, 网络安全的复杂程度和危险系数进一步扩大. 到了 5G 移动网络时代, 大量物联网设备的合并和新服务的涌入将进一步加剧安全问题^[12]. 网络安全需要各种技术和管理措施的支撑, 使网络系统正常运行, 从而确保网络数据的可用性、完整性和保密性. 随着新的通信技术的开发, 6G 网络潜在的安全和隐私依然是一个值得深思的问题, 比如可利用基于物理层的方法 (PLS) 提供无线信号的安全传输, 但为了满足 6G 的要求, 仍需要更高效的 PLS 技术. 区块链由散列指针彼此连接, 用于记录和存储公共共享数据库, 可实现资源整合和共享. 研究表明, 安全隐私区块链 (SPB) 框架具有更强的匿名性, 在一定程度上提供了隐私保护, 减轻了计算、能量、带宽资源的消耗, 并且它还可可在没有调解器的情况下, 仍在网络实体间建立多种信任关系, 因此可能会在 6G 网络中崭露头角^[13].

3.3 全应用

6G 的应用场景相对于 5G 来说, 将拓宽很多. 除了增强 5G 原有的应用场景: 增强移动宽带 (eMBB)、海量机器类型通信 (mMTC)、超可靠低延时通信 (uRLLC), 还支持一些前瞻性的场景, 如以人为本的服务、远距离与高机动通信、通信计算控制定位和传感融合、分布式人口融合应用、遥控全息无人系统等. 6G 还可以与多种新技术如云计算、边缘计算、人工智能、区块链等新技术相结合, 从而通过 6G 实现随时随地随心的智能移动社会, 打造一切智能和群体智能的世界.

借助大数据平台, 基于下行链路和上行链路的测量, 移动网络能够全局优化资源分配和网络操作, 大数据分析有助于获取应用程序数据和用户数据^[14]. 开发大数据可极大促进系统智能化, 且以高效经济的模式运行. 但是由于需要整合新的元素和技术, 无线网络管理规模的复杂性也不断扩大, 这导致网络产生的数据量庞大而复杂. 人工智能 (AI) 是管理大量数据的解决方案之一. AI 可以通过学习关键网络参数来增强蜂窝网络对刺激的响应, 比如 AI 能及时地感知网络流量、资源利用率、用户需求和可能存在的威胁, 并智能协调用户设备 (UE)、基站 (BS) 和网络实体^[15], 还可以从原始数据中提取有价值的信息, 提出有洞察力的建议和预测, 熟练地控制和优化无线网络. 如图 4 所示, 全息波束形成与数据分析、机器学习 (ML) 等技术结合能被应用到多种场景中, 可动态化地改变信息传递的方式, 实现动态设备的接入, 提供定向服务等. 以上也说明 AI 与 ML 更适合于下一代的 6G 通信系统^[16].

4 6G 关键技术

4.1 新型波束技术

大频带在 5G 和 6G 的发展中具有广阔的应用前景, 但功率放大器 (PA) 的非线性特性限制了系统的设计. 在未来的 5G 和 6G 的演进过程中, 需要引进新的波束设计, 尤其是在高阶调制不适用的情况下, 非正交波形 (NOW) 可改善离散傅里叶变换扩频正交频分复用 (DFT-s-OFDM) 的频谱效率^[17]. 在传统移动通信系统中, 高速移动具有局限性, 因此在 6G 网络中提高移动性场景下的传输速率是十分必要的, 正交时频空间 (OTFS) 调制技术

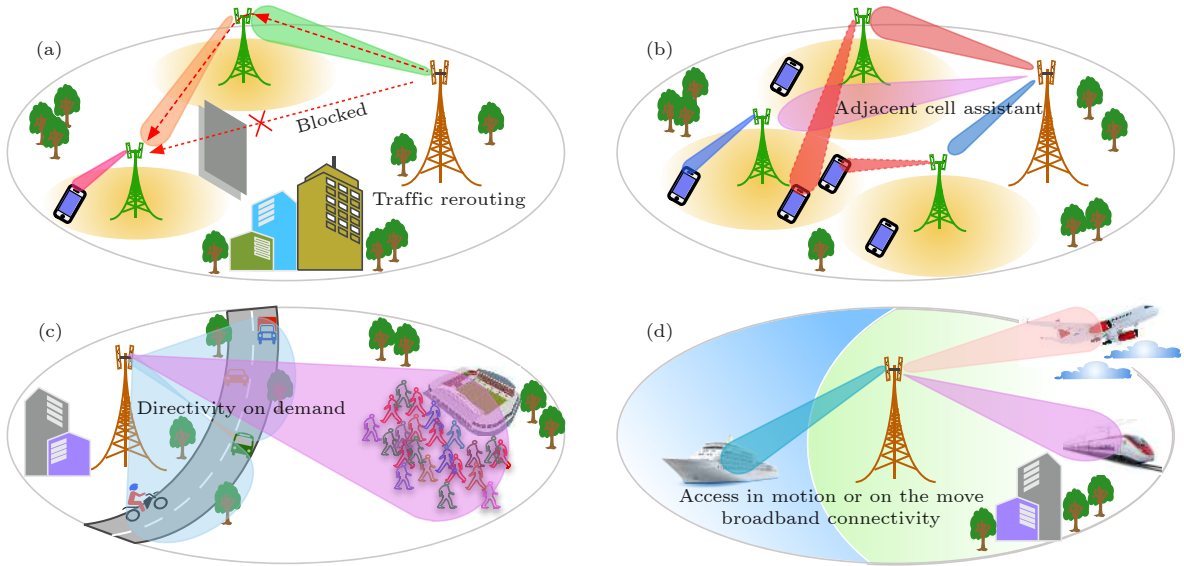


图 4 数据分析、ML 和 AI 技术可用于模拟、数字和混合波束形成, 图中是利用全息波束形成可获得的用例场景^[16]

Fig. 4. Data analytics and ML, and AI techniques can be used for simulation, digital, and hybrid beamforming, holographic beamforming has been taken as action scenario in this figure^[16].

是一种综合了码分多址 (CDMA) 和正交频分复用 (OFDM) 性能的新型调制方案. 研究发现该调制技术在高多普勒信道、大天线阵列或在高频率的信道中, 每个传输符号都能获得接近恒定的信道增益, 且在延迟-多普勒信道范围内, OTFS 显示出明显低于 OFDM 的错误率^[18].

4.2 多址接入技术

6G 物联网 (IoT) 需要足够的频谱资源, 为海量物联网终端提供频谱接入. 然而, 传统的正交多路访问 (OMA) 限制了有限频谱资源的充分利用. 在后 5G 和 6G 的营运中, 采用大相控阵波束将毫米波 (mm Wave) 与非正交多址接入 (NOMA) 相结合^[19]. NOMA 通常可以在上行链路和下行链路上同时为多个用户提供服务, 大大提高了频谱利用率, 同时 NOMA 还能够提供最优的吞吐量, 可支持蜂窝网络中海量物联网设备的运行^[20].

4.3 信道编码

5G 采用了极性码作为控制信道编码的方式, 在未来的 6G 系统中, 极化编码传输的技术仍可能凭借其高可靠性、高频谱效率等优势而拥有广阔的应用前景^[21]. 极性码的代码构造涉及特定的信道特性, 直接影响到译码算法的性能和复杂性^[4], 例如极性码在衰落信道中性能较差, 而通过使用动态冻结符号获得的代码可提供 0.8 dB 的增益^[22]. 在

5G 移动通信标准中, 数据通道目前采用分组码-低密度奇偶校验码 (BC-LDPC), 但这种方案译码收敛速度慢, 译码复杂度高, 译码延迟长, 编码长度短, 码率低, 在未来的 6G 通信场景中可能并不适用. 而卷积码 LDPC (CC-LDPC) 在这些方面则具有明显优势, 在未来 6G 移动通信中适应度高^[23].

4.4 大规模 MIMO 技术

大规模 MIMO 技术是发展未来宽带网络的推动力, 该网络将具有节能、高安全性、低延时、高效利用频谱能量的特点. 且随着发射端和接收端天线数目的增加和信噪比的增加, MIMO 系统在通信中的容量可显著提高^[24]. 同时由于大规模 MIMO 中使用了空间多路复用技术, 可将系统容量提高 10 倍以上. 研究表明在 THz 频段下, 由于石墨烯的等离子体纳米天线阵列技术的发展, 仅占用 1 mm² 的阵列就能实现 1 THz 的 1024 × 1024 超大规模的 MIMO 系统^[25]. 目前, 在通信系统更迭的大背景下, 无蜂窝大规模 MIMO 系统在吞吐量方面, 显著优于小蜂窝系统, 无蜂窝的大规模 MIMO 的每个用户 95% 的可能吞吐量几乎是小蜂窝系统的 20 倍^[26]. 2019 年, 相关团队发现在 128 × 128 配置的无蜂窝大规模 MIMO 下, 当激活 12 个远程天线单元 (RAUs) 和 12 个用户时, 系统总吞吐量可达到 10.185 Gbit/s. 当进一步增加 RAUs 和用户的布局密度时, 系统的整体频谱效率可以更高^[27].

4.5 频谱应用

5G 旨在为任何类型的设备和应用程序提供无处不在的连接. 为满足高吞吐量的需求, 5G 无线通信除利用 6 GHz 以下的频段外还需使用更高的频带如毫米波频段. 在 2018—2020 年, 美国 FCC 先后完成 28, 24, 37, 39, 47 GHz 频段的频谱拍卖, 向市场投放了总带宽近 5 GHz 的 5G 频谱^[28]. 5G 技术的发展过程中均采用相控阵波束和大规模 MIMO 技术来提高通信容量和补偿严重的路径损耗, 但存在制造成本高、功耗高等问题^[29].

为了进一步扩大通信容量和提高数据传输速率, 6G 将扩大用于移动通信的频率范围. 在 2019 年 3 月, FCC 决定开放 95 GHz—3 THz 的频段作为 6G 试验频段, 目前研究人员实现的近百 Gbit/s 传输速率的太赫兹通信系统多集中于 300—500 GHz 的频段范围内.

另外, 可见光通信是一种频段范围在 400—800 THz 的高速通信技术, 该频谱无须授权, 运营商和设备商可自由应用. 可见光通信是以实现机机交互为目的, 可为天空卫星通信、地面车间通信及水下潜艇通信提供便利, 并具有绿色、节能的特点, 也是未来实现 6G 技术的关键频谱资源之一^[30]. 2019 年研究人员通过 1.6 m 的无线链路实现了 15.73 Gb/s 的数据传输速率^[31].

4.6 频谱管理

5G 时代, 监管机构引入了多种频谱管理方法, 允许部署新的蜂窝网络. 而对于即将到来的 6G, 频谱频带种类多样且传播特性不同, 因此频谱管理方法也越来越多样化. 6G 既要追求新频段但同时也要保护现有频谱用户, 6G 共享频谱的需求比以

往任何时候都要高. 通过将 6G 与传感和通信相融合, 通过人工智能启发的算法在频谱访问决策方面的进步, 将能让 6G 网络感知无线电环境并实时适应更动态的操作^[32]. 图 5 是由智能频谱感知模块、大数据分析模块和 AI 智能管控模块组合而成的智能频谱管理系统架构图^[33].

5 6G 技术趋势与太赫兹通信

5.1 6G 技术趋势

6G 无线通信技术希望获得比 5G 高 10—100 倍的数据传输速率, 其中提高无线传输数据速率的关键途径有两种: 一种是通过提高频谱效率, 另一种是利用较大的频率带宽或频谱资源. THz 频段因其具有丰富带宽资源、较强的感知能力及拥有 Tbit/s 数据传输率的优点受到国内外学者的重视. 研究人员投入大量的精力来开发高性能、低成本的设备和包装技术, 使 THz 频段在商业上, 尤其在 6G 中被利用. 对于即将到来的 6G 无线网络, THz 波段通信将缓解目前无线系统的频谱短缺和容量限制, 并使传统网络领域和新型纳米级通信范式的新应用成为可能, 并有望支持 6G 中各种前瞻性应用, 实现局域到广域的转变. 根据 Shannon 的理想通信定律可知:

$$C = B \log_2 (1 + S/N), \quad (1)$$

式中, C 是信道数据的传输容量, B 是带宽, S/N 是信噪比. 当信噪比在合理的情况下, 如果需要通过 1 Tb/s 的数据传输速率, 带宽最小要为 0.2 THz^[34]. Shannon 的理想通信定律说明实现 6G 技术需要用到 THz 通信, 而 THz 通信技术兼具了微波和光通信的优点, 可以满足移动异构网络系统实时流量需求.

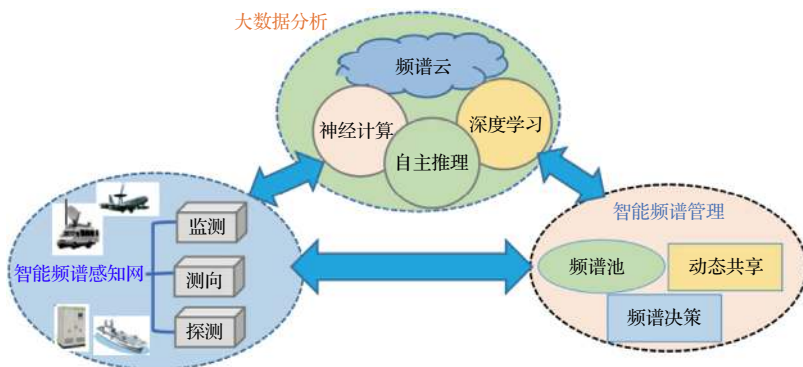


图 5 智能频谱管理体系架构^[33]

Fig. 5. Management system architecture of intelligent frequency spectrum^[33].

5.2 太赫兹信道研究

THz 波段同毫米波段相比表现出更严重的路径损耗、大气吸收和漫散射,如今大多数 THz 信道测量都在 100—300 GHz 波段附近,而 300 GHz 以上的信道特性仍需在未来进行广泛探测.目前研究人员对 THz 信道测量场景多集中在室内,对于室外的信道测量比较少.2020 年加州大学使用频域信道发声器和额定增益为 21 dBi、波束宽度为 13° 的喇叭天线,对 140—220 GHz 视距 (LOS) 室内办公场景的信道进行测量,并用 0.5 m 到 5.5 m 之间的 11 个测量点来表征这些 LOS 通道^[35].图 6 显示了在不同频带中路径损耗与距离的关系,可知路径损耗随距离增加而增加^[35].除了 LOS 传输,室内场景还必然会涉及非视距 (NLOS) 场景下的数据传输问题.2019 年,芬兰卢奥大学利用高增益天线研究了 300 GHz 频段的 LOS 和 NLOS 多径传输下的路径损耗,并发现如果 LOS 路径为主通信信道, NLOS 路径与 LOS 路径相比非常弱,可被忽略^[36].如果 NLOS 路径是主通信信道,当材料折射

率在 1.5—2.9 之间随机变化时,那么平均 NLOS 路径比先前测得的 LOS 路径多了 15 dB 的反射损失^[36].这说明 NLOS 路径损耗指数主要取决于材料对主通信信道的反射损耗.四川大学早在 2014 年就通过改变入射角测量了不同装修材料在 340 GHz 下的反射特性,发现瓷砖、中/高密度纤维板等材料,反射能量主要集中在镜面方向,非镜面方向的反射能量与镜面方向相比至少有 40 dB 的衰减,且无论入射角为多大,在非镜面反射方向都会出现大幅度衰减^[37].为了解决室内通信信道衰减的问题,电子科技大学陈智课题组^[38]对智能反射表面 (IRS) 投入了大量的研究,并在 2020 年提出了一种适用于 6G 室内应用场景的智能反射表面辅助 THz MIMO 通信系统 (图 7), IRS 方案可提高终端设备通信速率和覆盖能力,用以解决室内 THz 通信系统中 THz 波覆盖能力差、路径损耗大的问题.此外,研究人员发现随 IRS 元件个数的增加,采用深度神经网络 (DNN) 算法要比穷举搜索法和局部搜索法的复杂度低 3 到 6 个数量级,这也表明 DNN 能降低计算复杂度并用于变化的信道条件中^[38].

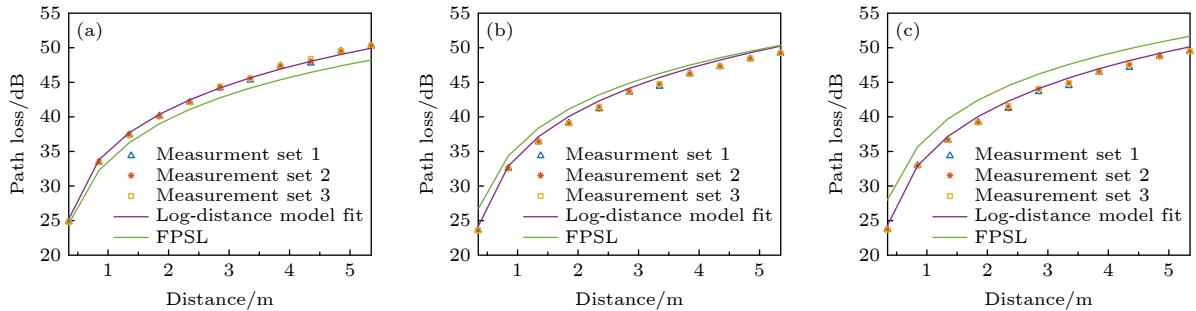


图 6 各种频带的测量和路径损耗模型^[35] (a) 140—150 GHz 频带; (b) 180—190 GHz 频带; (c) 210—215 GHz 频带

Fig. 6. Measurement and path loss models for various frequency bands^[35]: (a) 140–150 GHz band; (b) 180–190 GHz band; (c) 210–215 GHz band.

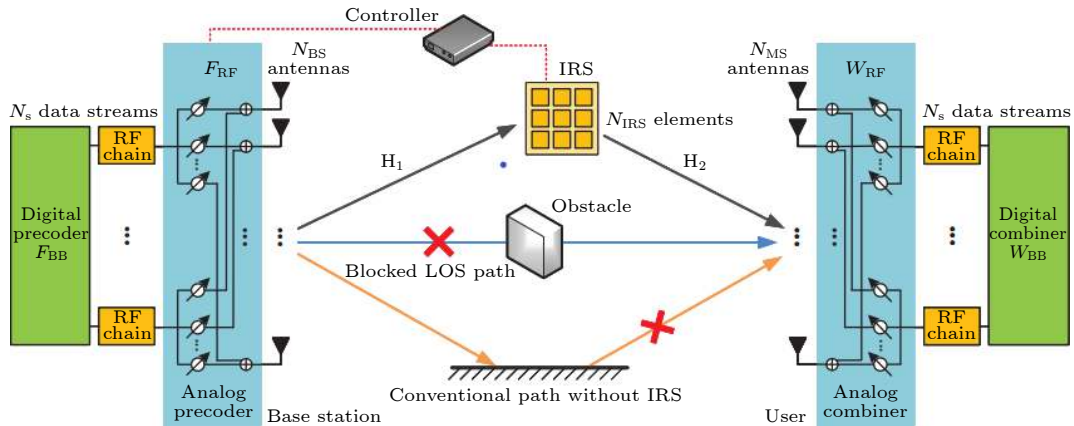


图 7 IRS 辅助的 THz MIMO 通信系统^[38]

Fig. 7. IRS-assisted THz MIMO communication system^[38].

总的来说对于开放环境的室外测量, LOS 路径更占优势. 但在 2018 年, 布朗大学利用 ASK (幅移控键) 调制且数据传输速率为 1 Gbit/s 的载波对开放环境下的 THz 室外信道进行测量, 发现 NLOS 路径仍会干扰 LOS 链路导致误码率 (BER) 性能变差, 他们将该装置分别放在草坪上和水泥地面上, 其误码率与距离的关系如图 8 所示. 当地面是固体混凝土表面时, NLOS 路径干扰对 BER 影响更大, 而由于草表面对 THz 波的吸收要高些, 所以对 BER 的影响较小, 这就导致了 LOS 路径受到与地面反射相关的镜面 NLOS 路径的干扰, 而这种干扰信号对地面特性比较敏感^[39].

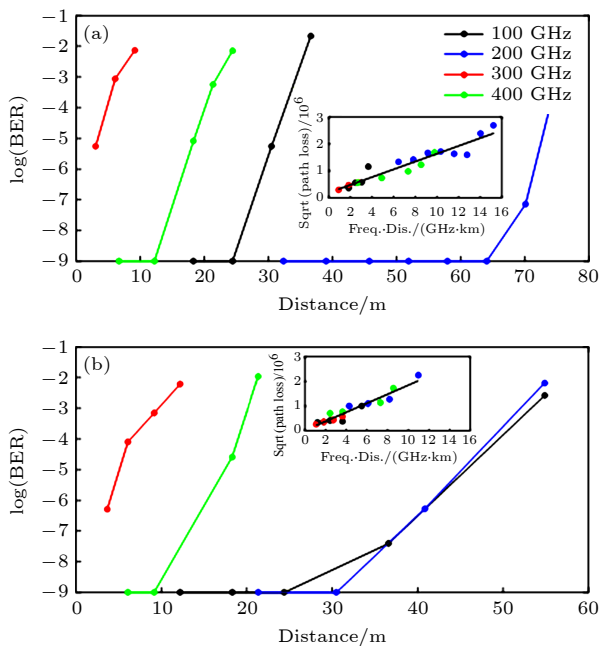


图 8 (a) 草坪和 (b) 人行道上的链路距离与误码率性能的关系, 100 (黑色)、200 (蓝色)、300 (红色) 和 400 (绿色) GHz 载波频率. 插图: 平方根与距离和频率的乘积呈线性关系^[39]

Fig. 8. The BER performance relevant to link distance on (a) lawn and (b) sidewalk, for 100 (black), 200 (blue), 300 (red), and 400 (green) GHz carrier frequencies. Inset: square root of path loss scales linearly with the product of the distance and the frequency^[39].

5.3 太赫兹通信技术与发展

THz 波段由于数据传输速率高, 能适应指数增长的无线数据流量需求, 因此被认为是未来 6G 技术的重要频段之一. THz 通信系统大致可以分为基于全电子学技术的 THz 通信系统和基于光子学技术的 THz 通信系统.

基于全电子学技术的 THz 通信系统因其小型

化和易集成的特点在近几年来备受关注. 日本国家信息通信研究所 (NICT) 与 NTT 于 2016 年利用磷化铟-微波单片集成电路 (InP-MMIC) 全电子收发机, 研制了用于 KIOSK 即时数据下载应用的无线通信系统, 其收发机两端分别用 30 dBi 和 15 dBi 喇叭天线传输信息, 实现了在 300 GHz 频段内 20 Gbps 的无线 ASK 数据传输, BER 随通信链路的距离变化如图 9(a) 所示^[40]. 与此同时, 日本的广岛大学致力于在 300 GHz 左右的频段上通过使用 CMOS 技术来实现 THz 通信. 2017 年 Takano 等^[41] 利用 40 nm CMOS 技术和 32 QAM 的调制格式, 实现了最高单通道数据速率为 105 Gbit/s 的发射机 (Tx) (图 9(b)), 并将它集成在 2.76 mm × 1.88 mm 的硅片上. 同年他们使用非线性器件 MOS FET, 同样采用 40 nm CMOS 的制作工艺实现了由下变频混频器和本振 (LO) 6 倍频链组成的接收机 (Rx), 该接收机可传输无线传输速率为 32 Gbit/s 的 16 QAM (正交振幅调制) 调制信号且其 3 dB 带宽为 26.5 GHz^[42]. 2013 年, 德国弗劳恩霍夫应

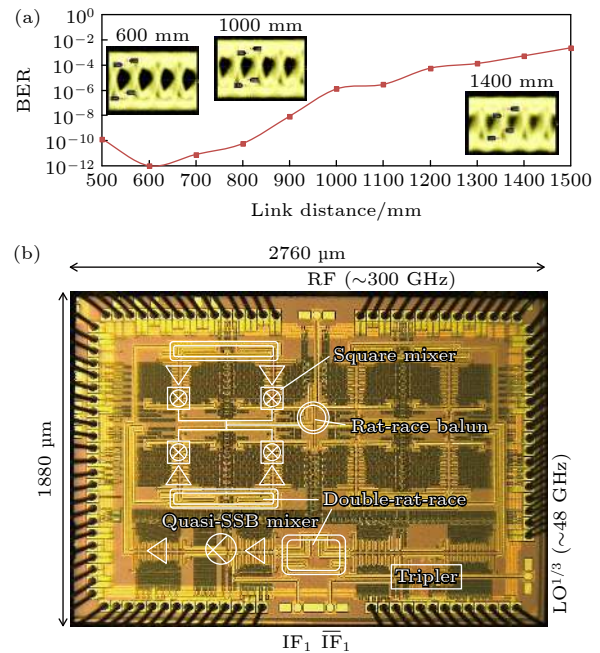


图 9 (a) 测量的 BER 性能与各种链路距离的关系及眼图, 由于信噪比的限制, 在 60 cm 处记录了最小误码率, 然后逐渐增加^[40]; (b) 广岛大学研发的最高单通道数据速率为 105 Gbit/s 的 Tx 的显微图像^[41]

Fig. 9. (a) Measurements of bit error rate performance for various link distance and eye-diagrams, and the minimum BER was recorded at 60 cm then increased gradually, due to the SNR limitation^[40]; (b) microimages of Tx with the highest single-channel 105 Gbit/s data rate developed by Hiroshima University^[41].

用固体物理研究所研制了工作频段在 600 GHz 以上的 THz 单片集成电路 (TMIC), 该芯片采用了 35 nm $\text{In}_{0.80}\text{Ga}_{0.20}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 制作工艺, 并且测量出 w 波段 (75—110 GHz) 经 6 倍频器后, 可以实现在 580—625 GHz 频段内 -16 dBm 的平均输出功率^[43]. 基于此项芯片制作技术, 2015 年德国斯图加特大学在发射和接收射频前端使用完整的 MMIC 芯片集进行数据传输实验, 发现在 300 GHz 的载波频率上可传输高达 64 Gbit/s 的 QSPK (正交相移控键) 数据速率^[44]. 在国内, 电子科技大学在 2016 年提出了基于肖特基二极管收发器的无线通信系统, 在 220 GHz 频段上实现了数据传输速率为 3.52 Gbit/s, 传输距离为 200 m 的实时户外传输^[45]. 2020 年该团队又基于 220 GHz 固态收发器的双载波无线通信系统 (图 10) 实现了 20 m 实时无线传输, 数据速率达到 12.8 Gbit/s^[46]. 该系统的基带数据处理平台是通过模拟数字转换器 (ADC) 和数字模拟转换器 (DAC) 将数据进行转换, 然后经射频 (RF) 通道传输. 为了达到高速数据处理的目的, 在帧同步算法后将数据分别划分为 8 个通道, 以此减轻数据处理的压力, 且 Tx 和 Rx 上使用 50 dBi 卡塞格伦天线, 该天线具有高增益和窄波束的特点, 可以实现波束对准. 最后研究人员通过开关设备可实现多路 8 K 视频并行传输^[46]. 2017 年, 中国工程物理研究院将固态功率放大器和真空电子放大器进行级联, 开发了一种 0.14 THz 无线通信系统, 实

现近瓦级的输出功率, 可在 21 km 距离以 5 Gbit/s 的数据速率实时传输数据. 这证明了 0.14 THz 波段对重霾具有良好的穿透性, 并测量出重霾引起的衰减约 0.1 dB/km^[47].

与全电子通信技术相比, 光子学技术可提供更高的传输容量, 能在未来以 THz 频率工作的无线通信系统中发挥关键作用. 1997 年日本 NTT 公司推出的单行载流子光电探测器 (UTC-PD), 凭借其高输出功率和高带宽的性能作为 THz 无线通信链路的发射机, 而接收机则以肖特基二极管混频器和 MMIC 为主. 2012 年, NTT 公司的 Song 等^[48]利用 UTC-PD 和肖特基二极管混频器收发系统, 在 300 GHz 频段上实现了 24 Gbit/s ASK 信号的无误差传输且传输距离为 50 cm. 2013 年, 大阪大学与 NTT 联合, 在不使用数字信号处理 (DSP) 的情况下利用多电平调制技术实现了数据速率超过 100 Gbit/s 的实时传输, 并对基于光频梳发射机后的光路进行相位稳定, 从而在 100 GHz 的载波频率下实现 10.3 Gbit/s 的无错误传输, 以此说明相位稳定的重要性^[49]. 同年, 德国卡尔斯鲁厄技术研究所将 UTC-PD 作为发射机, MMIC 作为接收机, 通过选择一条光频梳发生器产生的光频并进行 16 QAM 调制后, 与本振 (LO) 光混频, 实现了 100 Gbit/s 的无线数据传输^[50]. 他们还对三条间隔为 12.5 GHz 的光频分别进行了 16 QAM 和 8 QAM 调制, 发现虽然同样也能实现 100 Gbit/s 的无线数据传输, 但是在 20 m 的无线传输距离处, 前者

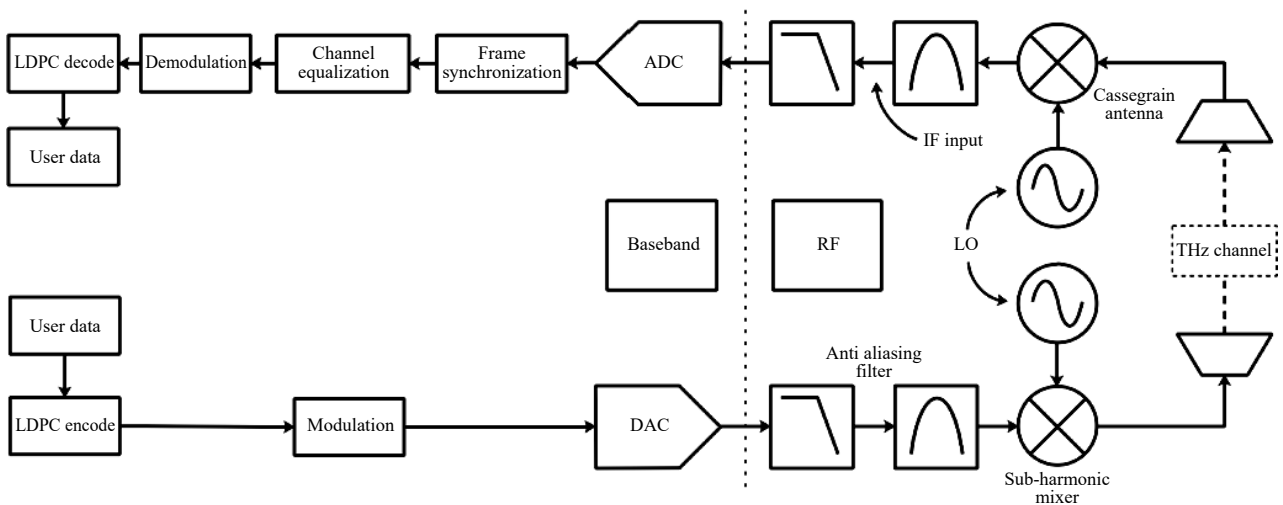


图 10 220 GHz 双载波通信系统的原理图, 该系统由一组固态收发器组成, 具有 2 个信号载波和 2 个基带^[46]

Fig. 10. Schematic of the 220 GHz dual-carrier communication system consisting of a set of solid-state transceivers with two signal carriers and two basebands^[46].

的误码率更低^[50]. 2018年, 大阪大学工程科学研究院研制了由 UTC-PD 和次谐波混频器作为收发机的无线通信系统^[51], 在 670 GHz 频段上实现了超过 10 Gbit/s 的无误差传输. 其中 UTC-PD 采用 WR-1.5 矩形金属波导进行封装, 通过耦合器电路上的微带线, 产生的 THz 波在 400—850 GHz 的宽频率范围内能有效地耦合到空心波导 (图 11(a)). 研究人员测量了直流偏置电压 V_B 为 -0.8 V、光电流 I_{PD} 为 0.6 mA 和 0.9 mA 时, 输出功率与频率的关系 (图 11(b)). 研究发现, 当频率在 500 GHz 时, 输出功率最大, 且当 $I_{PD} = 9$ mA 时, 输出功率几乎高达 13 μ W.

近几年国内光子学技术的研究和发展也颇为丰富. 2016 年浙江大学、天津大学和丹麦技术大学联合在 300—500 GHz 频段内利用频分复用技术调制 8 个间隔为 25 GHz 子信道的 THz 无线链路, 系统将 8 个光频和由同一光频梳产生的单个本振光在 UTC-PD 进行光混频, 得到了高频率稳定、低相位噪声的 THz 载波, 该系统中 8 个通道都由 10 Gbaud Nyquist QPSK 进行数据调制, 传输数据速率高达 160 Gbit/s 且其通信传输距离为 50 cm, 图 12(a) 显示了 50 cm 无线传输后 8 个子信道测量得到的误码率, 所有子信道都获得了低于前向纠错 (FEC) 的误码率性能^[52]. 在此基础上, 他们又提出了一种在 350—475 GHz 频段的多信道 THz 无线通信系统, 该系统采用 6 个载波频分复用, 总容量可达 120 Gbit/s, 无线传输后, 每个信道中的

QPSK 信号的误码率低于硬判决前向纠错 (HD-FEC) 限制阈值 3.8×10^{-3} ^[53]. 虽然基于空间/频分复用技术演示的无线通信系统可以获得大于 100 Gbit/s 的高数据传输速率, 但这也会导致系统的复杂性和能耗增加. 为解决这一问题, 2018 年, 浙江大学与英国皇家理工学院信息通信技术学院等多所大学合作研制了不使用任何空间/频分复用技术的单通道 0.4 THz 光子无线链路, 该系统采用 16 QAM 调制和 DSP 技术, 该技术在发射机端对加载到任意波形发生器 (AWG) 之前的信号进行预处理并对在接收机端执行的信号进行重构和解调的后处理, 实现了 106 Gbit/s 的高吞吐量^[54]. 为了进一步提高频谱效率和增加系统容量, 2020 年他们又提出基于 THz 正交极化双天线方案, 在 320—380 GHz 波段进行了混合 THz 光子无线传输的实验演示^[55], 通过概率整形技术-64QAM-正交频分复用技术 (PS-64QAM-OFDM) 调制格式, 成功地实现了 612.65 Gbit/s (约 2×300 Gbit/s) 的潜在系统总吞吐量, 且其传输距离为 2.8 m, 当光功率在 12—13 dBm 时, 双通道的误码率值都低于 0.03 (图 12(b)). 2018 年德国卡尔斯鲁厄技术研究所 0.3 THz 载波频率上试验了在 110 m 的距离内可传输 100 Gbit/s 的 QPSK 信号^[56], 该系统在接收机处使用 Kramers-Kronig 算法处理肖特基二极管. 当 UTC-PD 输入的总光功率在 11.6 mW 且载波信号功率比 (CSPR) 维持在 13.7 dB 时, 考虑使用指数 KK 算法, 实现了 2.6×10^{-3} 的误码率,

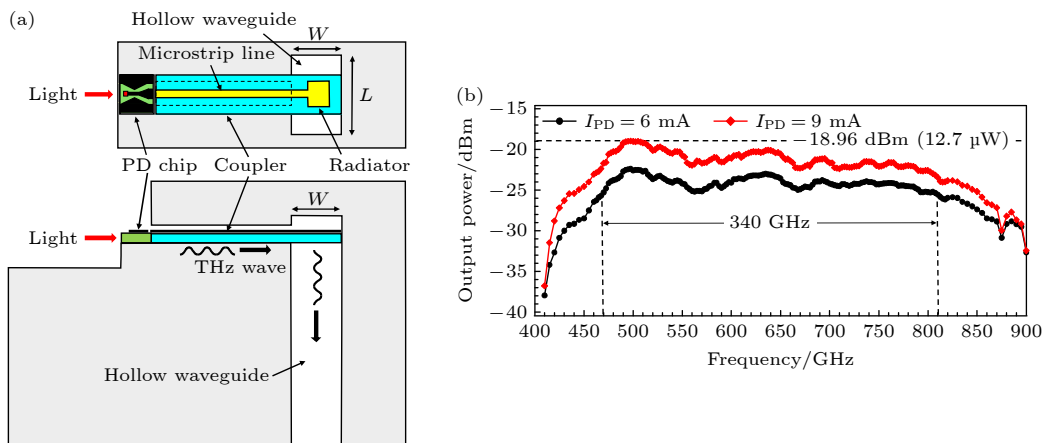


图 11 (a) 矩形波导输出的光电二极管的俯视图和侧视图, 对于 600 GHz 波段波导 (WR-1.5), 内部波导尺寸为 $L = 0.381$ mm, $W = 0.191$ mm; (b) 直流偏置电压 V_B 为 -0.8 V, 光电流 I_{PD} 为 6 mA 和 9 mA 时输出功率与频率关系^[51]

Fig. 11. (a) Top view and side view of a photodiode with a rectangular waveguide output. In a 600-GHz-band waveguide (WR-1.5), interior waveguide sizes are $L = 0.381$ mm, and $W = 0.191$ mm; (b) output power and frequency relationship when V_B is -0.8 V, I_{PD} is 6 mA and 9 mA^[51].

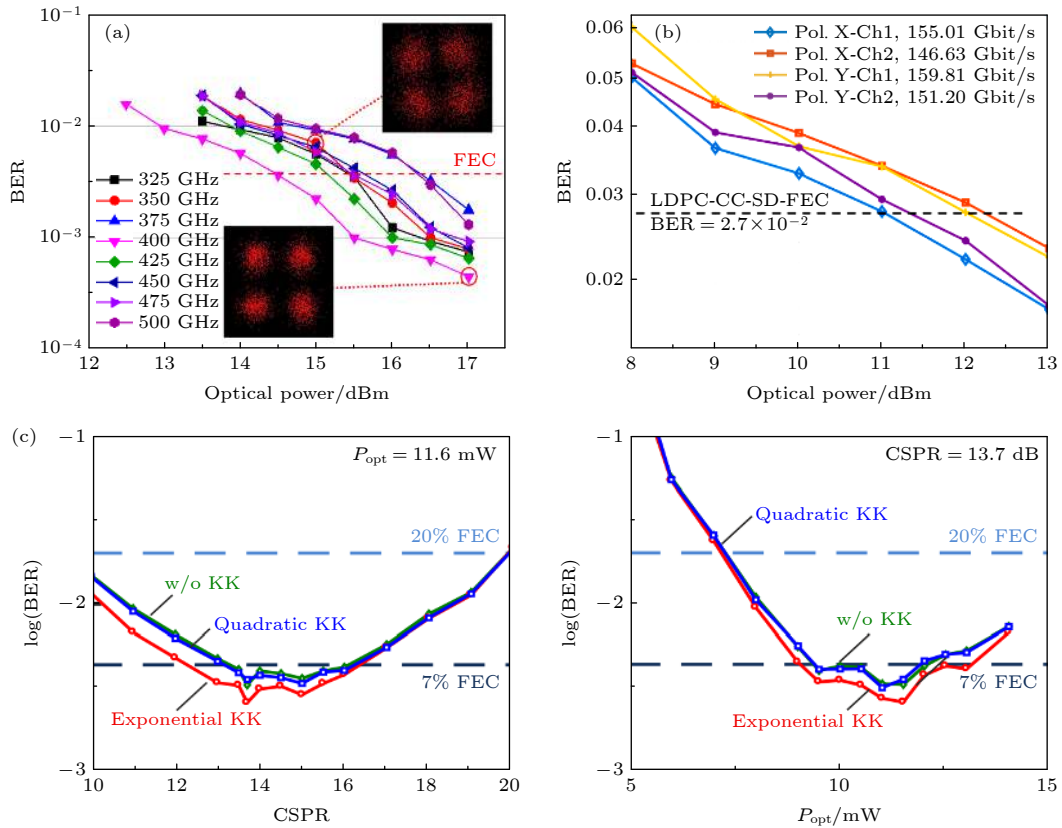


图 12 (a) 300—500 GHz 频段上在 50 cm 的无线传输后对 8 个信道的误码率性能的测量^[52]; (b) 在 2.8 m 无线传输后, 对 X 和 Y 路径中的两路 THz 信号进行了评估, 图中为比特 BER 性能与 UTC-PDS 光功率的函数^[55]; (c) “w/o KK”、“二次 KK”、“指数 KK”的 BER 与 CSRR 及 UTC-PD 输入的光功率的函数曲线^[56]

Fig. 12. (a) Measurements of BER performance after 50 cm wireless transmission for 8 channels in the 300–500 GHz band^[52]; (b) the evaluation of two-way THz signals in the X and Y paths after 2.8 m wireless transmission and a function of bit BER performance with UTC-PDS optical power in this figure^[55]; (c) function curve of BER and the optical power input from CSRR and UTC-PD for “w/o” KK”, “quadratic KK” and “exponential KK”^[56].

低于 FEC 的 7%, 与没有使用 KK 处理的传统外差接收 (w/o KK) 相比, 误码率明显降低 (图 12(c)). 2020 年, 浙江大学联合中国工程物理研究院电子工程研究所微太中心研制了基于无线电超纤 (RoF) 的 350 GHz 频段的高速 THz 光子无线通信系统, 该系统采用 OFDM 作为调制格式, 又将 PS 用于 OFDM 信号上, 提高系统效率, 降低比特能耗, 当线路速率达到 119.1 Gbit/s 时, 16 QAM 信号实现了 26.8 m 无线链路传输. 同时研究人员又结合 RoF 链路构建了一个准实现化的 THz 无线传输系统, 通过 10 km 光纤传输和 26.8 m 无线链路实现了线路速率 106.2 Gbit/s 的无线通信^[57]. 随着光学拓扑绝缘体的发展, 拓扑扭结状态可作为片上 THz 通信的信息载体, 应用在未来 6G 无线网络中. 2020 年, 南洋理工大学的杨怡豪等^[58]实现了高效、可集成、低成本的 THz 拓扑光子片上通信, 并利用该芯片实现了实时传输未压缩的 4 K

高清视频. 研究发现在 THz 拓扑光子芯片中, 拓扑扭结态对急剧弯曲是免疫的. 他们在 $26 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 硅片上制作了一个高度扭曲的具有十个尖角的畴壁, 测量拓扑扭结态沿扭曲畴壁的传输, 并将测量结果与由直畴壁和无畴壁组成的 VPC 中的传输进行比较 (图 13), 发现每个弯曲的最小弯曲损耗约小于 0.1 dB. 若用此畴壁进行 THz 通信实验, 可实现在载波频率为 0.335 THz, 数据传输速率为 11 Gbit/s, 误码率小于 10^{-11} 的传输. 采用相位调制器和高阶多级调制方案, 可以进一步提高载波频率及数据传输速率^[58].

尽管上述研究采用了不同技术, 如 COMS 技术、MMIC 技术和光子学技术, 系统仍主要集中在 300—500 GHz 通信频段. 中国科学院 THz 固态技术重点实验室基于 THz 量子级联激光器 (THz QCL) 和 THz 量子阱探测器 (THz QWP) 研制出了 THz 短程无线通信系统, 用以实现 THz 音频

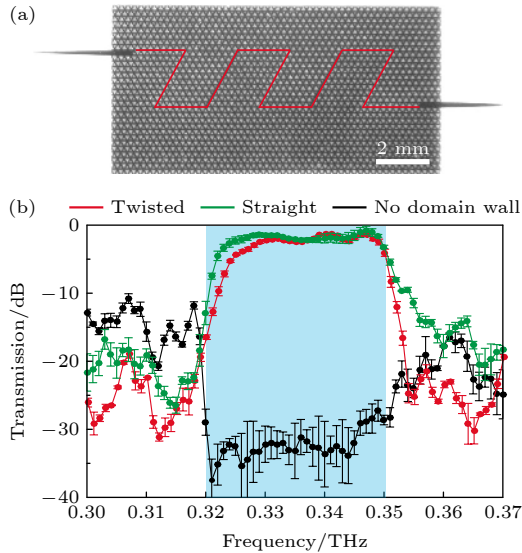


图 13 (a) 扭曲畴壁的光学图像; (b) 具有直畴壁、十个角的扭曲畴壁和无畴壁的 VPC 的传输曲线, 无畴壁的 VPC, 在 0.32—0.35 THz 之间的传输明显降低, 而具有扭曲或直畴壁的 VPC, 带隙内的传输接近统一.[58]

Fig. 13. (a) An optical image of the fabricated twisted domain wall; (b) measured transmission curves for a VPC with a straight domain wall, a twisted domain wall with ten corners and no domain wall, transmission between 0.32–0.35 THz is significantly reduced, while transmission within the band gap in the VPC with twisted or straight domain walls is nearly uniform[58].

传输[59]、图片文本传输[60]、视频传输[61]. 2011 年, Chen 等[59] 基于四阱共振声子和双金属波导设计了 QCL 有源区, 尺寸为 $40\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ mm}$, 可辐射 4.1 THz 的辐射波. 基于 GaAs/AlGaAs 材料体系, 采用分子束外延技术生长制作了 QWP, 两者分别处在 10 K 和 4 K 的低温工作环境中. 整个通信系统的音频传输距离为 2 m, 通信过程中采用调制带宽约为 580 kHz 的直接电压调制[59]. 同年, Tan 等[60] 又利用相同的收发装置, 搭建了传输频点为 4.13 THz 的图片文本无线传输演示系统. 2013 年, 该实验室搭建了 3.9 THz 的 2.4 m 通信链路来传输实时视频信号, 该系统采用直接开关调制和强度检测技术, 实现了数据传输速率为 2.5 Mb/s 的数字视频信号传输, 并发现当传输速率低于 5 Mb/s 时, 传输无错误率[61]. 紧接着在 2015 年, 该团队[62] 研制了传输速率比之前快了将近 10 倍的无线演示系统(图 14(a)), 并发现数据速率为 20 Mbit/s 时, BER 值低于 10^{-8} (图 14(b)), 而随着比特率升高至 24 Mbit/s 以上, 符号间干扰严重会导致 BER 的增加从而使眼图不清晰. NICT 在 2018 年提出

了 3.8 THz 的通信系统, 该通信系统提取了光频梳中产生的两束光频, 经马赫-曾德尔调制器处理, 通过 UTC-PD 产生 THz 信号[63]. 在接收端的超导 HEBM 中将 THz 信号与 QCL 输入的 LO 信号混合以实现外差探测. 系统采用锁相环 (PLL) 稳定 QCL 的振荡频率, 100 kHz 下其相位噪声为 -70 dBc/Hz [63].

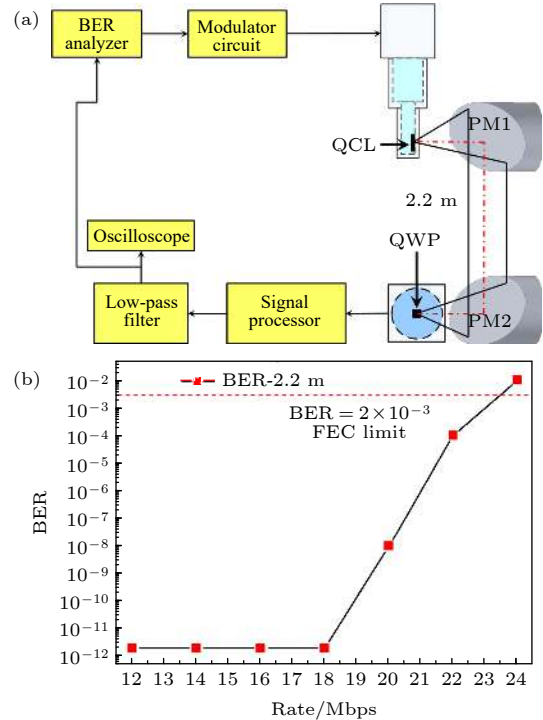


图 14 (a) 基于 THz QCL 和 THz QWP 的传输系统; (b) 测量的误码率性能与数据比特率间关系[62]

Fig. 14. (a) Scheme of the transmission setup based on a THz QCL and a THz QWP; (b) measurements of BER performance versus data bit rate[62].

THz 波不仅能在空气中传播, 还能在等离子体介质中传播. 2019 年天津大学通过实验证明 THz 波在超声速飞行器通信中有良好的应用前景[64]. 当飞行器以超声速飞行时, 其周围温度能达到空气电离的阈值温度, 当被电离气体分子形成等离子体鞘围绕在飞行器上时, 会造成飞行器与外界通信中断的问题, 而将电磁波频率提高到 THz 频段能有效降低等离子体介质的屏蔽效应[64].

6 总结与展望

随着无线通信系统的发展, 6G 技术作为各国通信发展的竞争焦点, 预计将为人类社会打造一个无处不在、触手可及的智能移动网络. 本文主要从

6G 性能标准、6G 发展现状、规划愿景及关键技术等方面介绍了 6G 的发展趋势. THz 通信具备高数据传输速率和宽带宽等优点, 信息传输过程中安全性能高, 有望引入 6G 系统中. 通过探索 THz 产生新方法、发展新天线技术来提高 THz 信号的增益, 优化系统资源分配, 进而实现小型化、低功耗和低成本的 THz 通信系统, 增加通信覆盖面, 提升数据传输速率和传输距离, 使 6G 无线网络“随时、随地、随心”为人们提供生活的便利.

参考文献

- [1] You X H, Yin H, Wu H Q 2020 *Chin. J. Int. Things* **4** 3 (in Chinese) [尤肖虎, 尹浩, 邬贺铨 2020 物联网学报 **4** 3]
- [2] You X H 2020 *Broadcasting Realm* **6** 9 (in Chinese) [尤肖虎 2020 视听界 **6** 9]
- [3] Chen S Z, Liang Y C, Sun S H, Kang S L, Cheng W C, Peng M G 2020 *IEEE Wirel. Commun. Lett.* **27** 218
- [4] You X H, Wang C X, Huang J, et al. 2020 *Sci. China Inform. Sci.* **64** 110301
- [5] Zhang Z Q, Xiao Y, Ma Z, Xiao M, Ding Z G, Lei X F, Karagiannidis G K, Fan P Z 2019 *IEEE Veh. Technol. Mag.* **14** 28
- [6] Song H J, Ajito K, Shimizu N, Kukutsu N, Nagatsuma T 2011 *XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium Istanbul*, August 13–20, 2011 p1
- [7] Liu S J, Xue F J, Liu L X, Wang D P 2020 *Satellite Network* **7** 50 (in Chinese) [刘帅军, 徐帆江, 刘立祥, 王大鹏 2020 卫星与网络 **7** 50]
- [8] Joo C, Choi J 2018 *J. Commun. Netw-s kor* **20** 102
- [9] Shakhatareh H, Sawalmeh A H, Al-Fuqaha A, Dou Z C, Almaita E, Khalil I, Othman N S, Khreishah A, Guizani M 2019 *IEEE Access* **7** 48572
- [10] Wang M M, Zhang J J, You X H 2020 *IEEE Commun. Surv. Tut.* **22** 2550
- [11] Xia T T, Wang M M, Zhang J J, Wang L 2020 *IEEE Wirel. Commun. Lett.* **27** 188
- [12] Ahmad I, Shahabuddin S, Kumar T, Okwuibe J, Gurtov A, Ylianttila M 2019 *IEEE Commun. Surv. Tut.* **21** 3682
- [13] Dorri A, Luo F J, Kanhere S S, Jurdak R, Dong Z Y 2019 *IEEE Commun. Mag.* **57** 120
- [14] Han S F, Chih-Lin I, Li G, Wang S, Sun Q 2017 *IEEE Commun. Mag.* **55** 150
- [15] Li R P, Zhao Z F, Zhou X, Ding G R, Chen Y, Wang Z Y, Zhang H G 2017 *IEEE Wirel. Commun. Lett.* **24** 175
- [16] Kibria M G, Nguyen K, Villardi G P, Zhao O, Ishizu K, Kojima F 2018 *IEEE Access* **6** 32328
- [17] Liu J, Liu W J, Hou X L, Kishiyama Y, Chen L, Asai T 2020 *31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* London, August 31–September 3, 2020 p1
- [18] Hadani R, Rakib S, Tsatsanis M, Monk A, Goldsmith A J, Molisch A F, Calderbank R 2017 *Wireless Communications and Networking Conference*, San Francisco CA USA, March 19–22, 2017 p1
- [19] Zhu L P, Xiao Z Y, Xia X G, Oliver Wu D 2019 *IEEE Access* **7** 116123
- [20] Shirvanimoghaddam M, Condoluci M, Dohler M, Johnson S J 2017 *IEEE J. Select. Areas Commun.* **35** 2238
- [21] Niu K, Dai J S, Piao J N 2020 *J. Commun.* **41** 9 (in Chinese) [牛凯, 戴金晟, 朴瑁楠 2020 通信学报 **41** 9]
- [22] Trifonov P 2015 *IEEE 2015 International Symposium on Wireless Communication Systems* Brussels, Belgium, August 25–28, 2015 p331
- [23] Zhu K, Wu Z J 2020 *Wireless Communications and Networking Conference Workshops*, Seoul, Korea, April 6–9, 2020 p1
- [24] Bashir S, H. Alsharif M, Khan I, Albream M A, Sali A, Mohd Ali B, Noh W 2020 *Comput. Mater. Con.* **66** 263
- [25] Akyildiz I F, Jornet J M 2016 *Nano Commun. Netw.* **8** 46
- [26] Ngo H Q, Ashikhmin A, Yang H, Larsson E G, Marzetta T L 2015 *16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications* Stockholm, Sweden, June 28–July 1, 2015 p201
- [27] Feng Y, Wang M H, Wang D M, You X H 2019 *International Conference on Communications* Shanghai, China, May 20–24, 2019, p1
- [28] Xu Y, Ren H, Wang T 2021 *Telecom. Sci.* **37** 102 (in Chinese) [许颖, 任红, 王坦 2021 电信科学 **37** 102]
- [29] Li L M, Wang D M, Niu X K, Chai Y, Chen L H, He L, Wu X, Zheng F C, Cui T J, You X H 2018 *Sci. China Inform. Sci.* **61** 021301
- [30] Shi J Y, Niu W Q, Xu Z Y, Chi N 2021 *Radio Commun. Technol.* **47** 692 (in Chinese) [施剑阳, 牛文清, 徐增熠, 迟楠 2021 无线电通信技术 **47** 692]
- [31] Bian R, Tavakkolnia I, Haas H 2019 *J. Lightwave Technol.* **37** 2418
- [32] Matinmikko-Blue M, Yrjola S, Ahokangas P 2020 *2nd 6G Wireless Summit*, Levi, Finland, March 17–20, 2020 p1
- [33] Cao Q, Wang J 2020 *China Radio* **9** 13 (in Chinese) [曹倩, 王健 2020 中国无线电 **9** 13]
- [34] Huang K, Wang Z 2011 *IEEE Microw. Mag.* **12** 108
- [35] Abbasi N A, Hariharan A, Nair A M, Molisch A F 2020 *14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* Copenhagen, Denmark, March 15–20, 2020 p1
- [36] Kokkonen J, Lehtomaki J, Juntti M 2019 *16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Oulu, Finland, August 27–30, 2019 p441
- [37] Wang M, Wang J F, Wu Q Y, Huang Y X 2014 *Acta. Phys. Sin.* **63** 154101 (in Chinese) [王敏, 王俊峰, 吴秋宇, 黄一辛 2014 物理学报 **63** 154101]
- [38] Ma X Y, Chen Z, Chen W J, Li Z X, Chi Y J, Han C, Li S Q 2020 *IEEE Access* **8** 99565
- [39] Ma J J, Shrestha R, Moeller L, Mittleman D M 2018 *APL Photon.* **3** 051601
- [40] Song H J, Kosugi T, Hamada H, Tajima T, El Moutaouakil A, Matsuzaki H, Kawano Y, Takahashi T, Nakasha Y, Hara N, Fujii K, Watanabe I, Kasamatsu A, Yaita M 2016 *International Microwave Symposium (IMS)*, San Francisco, CA, May 22–27, 2016 p1
- [41] Takano K, Amakawa S, Katayama K, Hara S, Dong R B, Kasamatsu A, Hosako I, Mizuno K, Takahashi K, Yoshida T, Fujishima M 2017 *International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)* San Francisco, CA, February 5–9, 2017, p308
- [42] Hara S, Katayama K, Takano K, Dong R B, Watanabe I, Sekine N, Kasamatsu A, Yoshida T, Amakawa S, Fujishima M 2017 *International Microwave Symposium-(IMS)* Honolulu, HI, USA, June 4–9, 2017 p1703
- [43] Tessmann A, Schlechtweg M, Bruch D, Lewark U J.; Leuther A, Massler H, Wagner S, Seelmann-Eggebert M, Hurm V, Aidam R, Kallfass I, Ambacher O 2013 *Asia Pacific*

- Microwave Conference (APMC 2013)* Seoul, Korea (South), November 5–8, 2013 p203
- [44] Kallfass I, Dan I, Rey S, Harati P, Antes J, Tessmann A, Wagner S, Kuri M, Weber R, Massler H, Leuther A, Merkle T, Kurner T 2015 *IEICE T. Electron.* **E98.C** 1081
- [45] Chen Z, Zhang B, Zhang Y, Yue G G, Fan Y, Yuan Y 2016 *IEICE Electron. Expr.* **13** 20160282
- [46] Niu Z Q, Zhang B, Wang J L, Liu K, Chen Z, Yang K, Zhou Z, Fan Y, Zhang Y H, Ji D F, Feng Y N, Liu Y 2020 *China Commun.* **17** 131
- [47] Wu Q Y, Lin C X, Lu B, Miao L, Hao X, Wang Z H, Jiang Y, Li W Q, Den X J, Chen H B, Yao J, Zhang J 2017 *IEEE 2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* Cancun, Mexico, August 27–September 1, 2017 p1
- [48] Song H J, Ajito K, Muramoto Y, Wakatsuki A, Nagatsuma T, Kukutsu N 2012 *Electron. Lett.* **48** 953
- [49] Nagatsuma T, Horiguchi S, Minamikata Y, Yoshimizu Y, Hisatake S, Kuwano S, Yoshimoto N, Terada J, Takahashi H 2013 *Opt. Express* **21** 23736
- [50] Koenig S, Lopez-Diaz D, Ante J, Boes F, Henneberger R, Leuther A, Tessmann A, Schmogrow R, Hillerkuss D, Palmer R, Zwick T, Koos C, Freude W, Ambacher O, Leuthold J, Kallfass I 2013 *Nature Photon.* **7** 977
- [51] Nagatsuma T, Kurokawa T, Sonoda M, Ishibashi T, Shimizu M, Kato K 2018 *International Microwave Symposium-IMS Philadelphia PA, USA, June 10–25, 2018* p1180
- [52] Yu X, Jia S, Hu H, Galili M, Morioka T, Jepsen P U, Oxenloewe L K 2016 *APL Photon.* **1** 081301
- [53] Jia S, Yu X B, Hu H, Yu J L, Morioka T, Jepsen P U, Oxenloewe L K 2017 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **29** 310
- [54] Jia S, Pang X D, Ozolins O, Yu X B, Hu H, Yu J L, Guan P Y, Da Ros F, Popov S, Jacobsen G, Galili M, Morioka T, Zibar D, Oxenloewe L K 2018 *J. Lightwave Technol.* **36** 610
- [55] Jia S, Zhang L, Wang S W, Li W, Qiao M Y, Lu Z J, Idrees N, Pang X D, Hu H, Zhang X M, Oxenloewe L K, Yu X B 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 4715
- [56] Harter T, Fullner C, Kemal J N, Ummethala S, Brosi M, Brundermann E, Freude W, Randel S, Koos C 2018 *European Conference on Optical Communication (ECOC)* Rome, Italy September 23–27, 2018 p1
- [57] Wang S W, Lu Z J, Li W, Jia S, Zhang L, Qiao M Y, Pang X D, Idrees N, Saqlain M, Gao X, Cao X X, Lin C X, Wu Q Y, Zhang X M, Yu X B 2020 *APL Photon.* **5** 056105
- [58] Yang Y H, Yamagami Y, Yu X B, Pitchappa P, Webber J, Zhang B, Fujita M, Nagatsuma T, Singh R 2020 *Nature Photon.* **14** 446
- [59] Chen Z, Tan Z Y, Han Y J, Zhang R, Guo X G, Li H, Cao J C, Liu H C 2011 *Electron. Lett.* **47** 1002
- [60] Tan Z Y, Chen Z, Han Y J, Zhang R, Li H, Guo X G, Cao J C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 098701 (in Chinese) [谭智勇, 陈镇, 韩英军, 张戎, 黎华, 郭旭光, 曹俊诚 2012 物理学报 **61** 098701]
- [61] Chen Z, Gu L, Tan Z Y, Wang C, Cao J C 2013 *Chin. Opt. Lett.* **11** 112001
- [62] Gu L, Tan Z Y, Wu Q Z, Wang C, Cao J C 2015 *Chin. Opt. Lett.* **13** 081402
- [63] Morohashi I, Irimajiri Y, Kannno A, Kawakami A, Yamamoto N, Sekine N, Kasamatsu A, Hosako I, 2018 *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)* Toulouse, October 22–25, 2018 p1
- [64] Chen K, Xu D G, Li J N, Geng X N, Zhong K, Yao J Q 2020 *Optik* **208** 164090

SPECIAL TOPIC—Terahertz biophysics

6G technology development vision and terahertz communication^{*}

Feng Wei¹⁾ Wei Shu-Ting¹⁾ Cao Jun-Cheng^{2)†}

1) (*School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

2) (*Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

(Received 16 September 2021; revised manuscript received 15 October 2021)

Abstract

The future sixth-generation (6G) wireless network has advantages of global coverage, high spectrum efficiency, low cost, high safety, and higher intelligent level. The 6G technology can create ubiquitous intelligent mobile networks for human society. Terahertz wireless communication has the characteristics of high data transmission rate, low delay, and anti-interference, which may be widely used in 6G technology. This paper mainly introduces the planning vision, development status, and key 6G technology, and analyzes the terahertz devices, channels, communication systems, and the possible development trend of 6G technology.

Keywords: 6G technology, terahertz quantum cascade laser, uni-traveling-carrier photodiode, terahertz communication

PACS: 43.72.+q, 42.79.Sz, 95.85.Fm, 85.60.Jb

DOI: [10.7498/aps.70.20211729](https://doi.org/10.7498/aps.70.20211729)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61927813).

[†] Corresponding author. E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn