

文章编号: 2095-4980(2022)08-0790-14

光子太赫兹通信技术

邓秋卓, 张红旗, 张 鹿*, 余显斌*

(浙江大学 信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 随着无线数据传输速率需求的爆炸式增长, 太赫兹频段(0.1~10 THz)以其丰富的频谱资源备受关注。太赫兹光子学的通信技术因具有超宽带、调制效率高、谐波干扰小等技术优势, 被公认可以极大地促进数据传输速率向 Tbit/s 发展。本文以光子太赫兹通信 3 个方面关键技术的综述分析为基础, 包括光子太赫兹通信的收发器件、基带信号处理技术、系统架构与实验验证等, 探讨光子太赫兹通信技术的发展趋势, 并从宏观与微观尺度展望光子太赫兹通信的潜在应用场景。

关键词: 太赫兹通信; 太赫兹光子学; 太赫兹收发机; 基带信号处理

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021427

Terahertz photonic communication technologies

DENG Qiuzhuo, ZHANG Hongqi, ZHANG Lu*, YU Xianbin*

(College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: With the explosive growth of wireless data rate, the terahertz band(0.1~10 THz) has attracted increasing attention due to its rich frequency resources. The terahertz photonic communication technology has advantages such as broadband, high modulation efficiency and low harmonic distortions. It is expected to greatly promote the wireless transmission data rate toward the Tbit/s level. Based on the review of the key technologies for realizing ultra-high-rate terahertz photonic communication, including terahertz communication transceivers, digital baseband signal processing technologies, terahertz photonic communication system architectures and experimental demonstrations, the future development trends of the terahertz photonic communication technologies are discussed. The application scenarios of terahertz photonic technology from the micro to macro scales are also analyzed.

Keywords: terahertz communications; terahertz photonics; terahertz transceiver; baseband signal processing

近年来, 随着超宽带数据传输业务勃然兴起, 后 5G 时代与 6G 的用户数据流量呈指数级快速增长。根据 2020 年思科发布的年度网络报告白皮书, 2022 年无线和移动设备的数据流量将占到互联网总流量的 71%, 每月全球移动数据流量将达到 77 EB, 年流量将达到 1 ZB; 到 2023 年, 5G 连接产生的流量将是 4G 连接的 3 倍^[1]。根据 Edholm 定律, 无线通信网络的数据速率每隔 18 个月翻一番, 预计到 2030 年, 无线通信数据速率将接近有线通信水平, 且未来 5 至 10 年内, 无线通信峰值速率将超过 100 Gbit/s 乃至 Tbit/s 级别^[2]。然而, 基于微波/毫米波的无线通信技术难以支撑指数级增长的网络容量, 因此, 无线通信需要向更高的频率以及更宽的带宽窗口发展。太赫兹频段(0.1~10 THz)位于微波与红外光波之间, 具有丰富的频谱资源, 被认为是通信技术革命的下一个突破点^[3]。

太赫兹通信技术大致可以分为全电子、光子辅助、全光子 3 种类型, 光子辅助型与全光子型都可认为是基于光子技术路线的太赫兹通信实现方式。基于电子学的太赫兹通信技术能支持大功率太赫兹信号的辐射, 有利于实现长距离的无线传输。随着半导体工艺和集成电路技术的发展, 基于电子学的太赫兹通信器件在实现小型化和集成化方面已比较成熟。但基于电子学的太赫兹通信链路性能可能会受电子学器件工作带宽、调制效率、谐波干扰等因素的影响, 系统容量会受到一定程度的限制。与基于电子学的太赫兹通信技术相比, 基于光子学的

收稿日期: 2021-12-20; 修回日期: 2022-02-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFB1805700)

*通信作者: 张 鹿 zhanglu1993@zju.edu.cn; 余显斌 xyu@zju.edu.cn

太赫兹通信技术具有超宽带、调制效率高、谐波干扰小等潜在优势，有利于实现超高速的无线通信，且基于光子学的太赫兹通信技术能有效支持无线链路与高速光纤接入网络的无缝融合^[4]。因此，光子太赫兹通信技术受到广泛研究并用于实现超高速、超宽带的下一代无线通信。

本文以光子太赫兹通信的 3 个方面关键技术的综述分析为基础，包括光子太赫兹通信的收发器件、基带信号处理技术、系统架构与实验验证等，从器件、信号、系统 3 个层面探讨了光子太赫兹通信技术未来的发展趋势，并从微观与宏观两个尺度探讨了光子太赫兹技术潜在的应用场景。

1 光子太赫兹通信器件

1.1 太赫兹发射机

光子太赫兹无线通信的信号源主要分为光电外差拍频类和直接调制激光类。在光电外差拍频类中，单行载流子光电二极管(Uni-Traveling Carrier Photodiode, UTC-PD)通常作为太赫兹无线通信系统的外差混频器，产生太赫兹波；而光电导天线(Photoconductive Antenna, PCA)既能产生太赫兹波也能对太赫兹波进行探测接收^[5]。直接调制激光类太赫兹信号源的典型器件为太赫兹量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)。针对具体应用场景下对频率范围、功率大小、系统带宽的要求，不同种类的太赫兹发射机各具特征与优势。

1.1.1 单行载流子光电二极管

UTC-PD 为光电外差拍频类的光子太赫兹通信系统发射机的关键器件之一，与传统的正-本征-负光电二极管(Positive-Intrinsic-Negative Photodiode, PIN-PD)不同，UTC-PD 由 P 型中性光吸收层和 N 型宽带隙集结层构成，只依靠电子作为有源载流子，增大了饱和输出电流，加快了响应速度，输出功率可达毫瓦级^[6]。此外，UTC-PD 具有超宽带、易集成等特点，这些显著的优势使 UTC-PD 广泛用于太赫兹无线通信链路的发射机^[7]。

1997 年，日本电报电话公司发明了 UTC-PD，并在随后几年内制作出 200 GHz~1.5 THz 等超带宽的 UTC-PD^[8-9]。文献[10]中，UTC-PD 与宽带对数周期天线集成达到了 1.5 THz 的工作频率，并在 1.04 THz 频率上实现了 2.3 μW 的输出功率；文献[11]中，UTC-PD 与蝴蝶形天线集成能产生高达 2.5 THz 的太赫兹信号，并实现了在 300 GHz 频率上 20 μW 的输出功率；文献[12]中，UTC-PD 与槽式天线集成实现了在 700 GHz 频率上 148 μW 的功率输出。通过不断优化，UTC-PD 已经成为低频段太赫兹(0.1~1 THz)无线通信最有前景的发射器件之一^[6]。

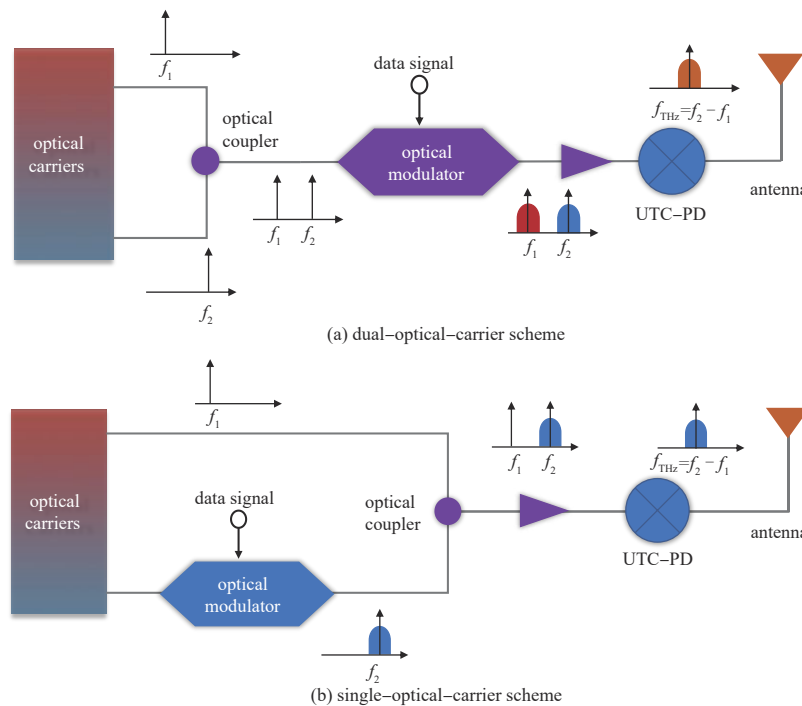


Fig.1 The photonic terahertz wireless communication system transmitter schemes based on photo-mixing
图 1 基于光混频器的两种光子太赫兹无线通信系统发射机方案图

UTC-PD 通常在光子太赫兹无线通信系统中基于外差混频技术产生太赫兹信号。图 1 为基于 UTC-PD 光混频器的两种光子太赫兹无线通信系统发射机方案图。在双光载波共调制方案中，激光器产生两束不同波长的光载

波信号, 经过耦合后, 通过光调制器将基带信息加载到两个光载波上。UTC-PD 作为光混频器, 产生波长为两载波波长差的太赫兹信号。在单光载波调制方案中, 只有一束光信号被数字信号调制, 另一束光信号作为本振信号与被调制后的光信号耦合后注入到 UTC-PD 上, 生成以两束光频率之差为载波频率的太赫兹信号^[13]。UTC-PD 具有高输出功率、超宽带、高响应速度、高灵敏度、低偏置电压等优点, 利用其光电转换功能产生太赫兹信号, 极大推动了高速光子太赫兹通信系统的发展^[11,14-17]。

1.1.2 量子级联激光器

QCL 基于电子在导带子带间跃迁, 光学声子共振辅助隧穿原理实现粒子数反转并辐射激光。1994 年, 美国贝尔实验室采用分子束外延技术发明了第一个 QCL^[18]。自 2002 年首个太赫兹 QCL (THz QCL) 诞生, 基于 THz QCL 的太赫兹无线通信得以快速发展^[19]。图 2 为基于 QCL 的光子太赫兹无线通信系统发射机方案图。THz QCL 体积小, 结构紧凑, 载流子寿命很短, 可直接对激光器高速调制^[20]。通过外调制器, QCL 可实现 10 GHz 以上信号带宽的调制^[21]。THz QCL 通常在高频太赫兹窗口产生 1 THz 以上的太赫兹信号, 最高的激射频率可达 5.2 THz^[22]。基于 THz QCL 发射机, 已经实现以 3.8 THz, 4.1 THz 为通信载波的太赫兹无线通信^[23-25]。因此, THz QCL 更适合用于高频段 (>1 THz) 的太赫兹无线通信。

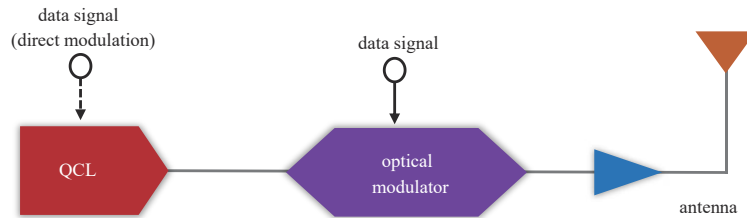


Fig.2 Transmitter scheme diagram of photonic terahertz wireless communication system based on THz QCL

图2 基于 THz QCL 的光子太赫兹无线通信系统发射机方案图

采用 THz QCL 能产生超高频率的 THz 信号, 但对器件性能要求苛刻。在 THz QCL 中, 光子的能量比光学声子的能量低, 当 THz QCL 工作温度较高时, 热激发的声子散射会使较高能级电子的寿命降低, 影响 THz QCL 的增益, 因此 THz QCL 需要在一个温度较低的环境下进行工作, 这是限制 THz QCL 在实际光子太赫兹无线通信系统中应用的主要因素^[5-6,26]。

表 1 总结了不同光子太赫兹发射机的主要特点。光子太赫兹发射机可通过 THz QCL 直接调制的方式产生太赫兹信号或通过基于 UTC-PD 外差混频技术产生太赫兹信号。THz QCL 具有非常宽的载波调谐范围, UTC-PD 外差混频也可以实现灵活的载波调频。THz QCL 通常能产生超高频率的 THz 信号, 而 UTC-PD 更适合于亚太赫兹窗口的无线通信。THz QCL 的输出功率更高, 而 UTC-PD 的输出功率相对较低 (一般小于 mW 级), 限制了 UTC-PD 作为光子太赫兹发射机的通信系统信息传输距离。此外, THz QCL 的工作性能受温度的影响较大, 必须工作在比较低的温度之下, 这限制了 THz QCL 在实际光子太赫兹无线通信中的应用。与全电子技术的太赫兹发射机相比, 基于光子技术的太赫兹发射机具有带宽大, 调制效率高, 谐波干扰小等优点, 随着载波频率的不断提高, 基于光子技术的太赫兹发射机 (UTC-PD, THz QCL) 将会在太赫兹无线通信中发挥越来越重要的作用^[27]。但同时不容忽视的是, 基于全电子技术的太赫兹发射机因其发射功率高、易于集成等优点也被广泛研究, 并与光子太赫兹源的发展互相促进。其中, 中国电科网络通信研究院于 2021 年 5 月实现了目前国内频率最高的固态电子学太赫兹源, 振荡频率突破 1 THz^[28]; 国外实现了目前已报道最高振荡频率的磷化铟 (Indium Phosphide, InP) 基太赫兹共振隧穿二极管 (Resonant Tunneling Diode, RTD) 振荡源, 振荡频率为 1.98 THz^[29]。这些成果为未来太赫兹高速通信和设备的小型化提供了良好的技术支撑, 光子技术与电子技术相互促进, 共同推动太赫兹通信向高速、大容量、长距离、集成化方向发展。

表 1 不同光子太赫兹发射机的特点

Table1 Characteristics of two different photonic terahertz transmitters

terahertz transmitters	characteristics
UTC-PD	1. Generating THz signal based on outlier mixing technology and supporting complex modulation formats. 2. Flexible carrier frequency modulation. 3. Low output power.
THz QCL	1. Generating THz signal based on direct modulation and supporting simple modulation formats. 2. Ultra-wide tunable range. 3. High output power. 4. Low temperature working environment.

1.2 太赫兹接收机

光子太赫兹接收机既可使用基于光子学的太赫兹接收机，也可使用基于电子学的太赫兹接收机。光子太赫兹通信系统接收机主要有两种方案：直接探测、相干探测。图 3 为太赫兹接收机两种探测方案，图 3(a)为直接探测方案，也称非相干探测，通常直接探测方案由基于电子的肖特基势垒二极管 (Schottky Barrier Diode, SBD)或基于光子的量子阱探测器(Quantum Well Photodetector, QWP)实现。图 3(b)为相干探测方案，与直接探测不同，相干探测需要一个本振信号源，实现复杂，但检测灵敏度与频谱效率高。对于窄带连续太赫兹波，利用混频器可以实现相干探测。在太赫兹波段，只有少数几种混频器具有较高的转换效率和较低的噪声。常见的混频器包括 SBD 混频器、超导-绝缘体-超导 (Superconductor-Insulator-Superconductor, SIS)混频器、热电子辐射(Hot Electron Bolometer, HEB)混频器^[30]。此外，基于电子的次谐波混频器(Subharmonic Mixer, SHM)和基于光子的 PCA 同样是实现相干探测方案的关键器件。

1.2.1 肖特基势垒二极管与次谐波混频器

SBD 基于金属-半导体接触特性而制成，当肖特基势垒处于太赫兹电场中的电压足够大时，半导体一侧的电子就会穿过肖特基势垒到达金属一侧，形成电流。SBD 是多数载流子导电器件，不存在少数载流子寿命和反向恢复问题，反向恢复时间快，适合于高频的应用^[31]。SBD 基于其非线性特性而被广泛用作外差探测混频器中的非线性元件^[5,32]。同时，SBD 能直接用作直接探测的关键器件，可以快速响应监测太赫兹信号包络。当接收到信号调制格式为振幅键控(Amplitude Shift Keying, ASK)/二进制振幅键控(On-Off Keying, OOK)等二元(一阶)调制格式时，SBD 作为直接探测器，对信号进行包络检测^[33]。因此，SBD 兼具混频相干探测与直接探测的功能，广泛用于太赫兹无线通信的接收机。2013 年，日本电报电话公司与大阪大学成功实现 SBD 直接探测 300 GHz 载频下传输速率为 40 Gbit/s 的 OOK 信号^[13]；2018 年，德国卡尔斯鲁厄理工学院利用 SBD 混频器实现了以 300 GHz 为载波频率，传输速率为 100 Gbit/s 的正交相位调制(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)信号无线传输^[34]；2020 年，浙江大学实现了传输速率为 119.1 Gbit/s，传输距离为 26.8 m 的无线传输链路，SBD 混频器与倍频器组合实现了对 PS(Probabilistic Shaping)-16QAM(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)-OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)信号的探测^[35]。

随着接收的高频信号频率达到太赫兹频段，外差探测对本振信号频率的要求越来越高，传统的混频器不再满足太赫兹信号频率转换的要求。图 4 为二次谐波混频器变频的原理方案图，SHM 主要是利用二极管的非线性特性获得本振信号的偶次谐波，接收到的太赫兹信号与偶次谐波混频，最终输出相应的中频信号，大大降低了本振源的技术难度和成本要求。自 M Cohn 等于 1974 年发明了第一个 SHM 起，经过多年的发展，SHM 工作的频率范围已经从 GHz 级到了 THz 级。

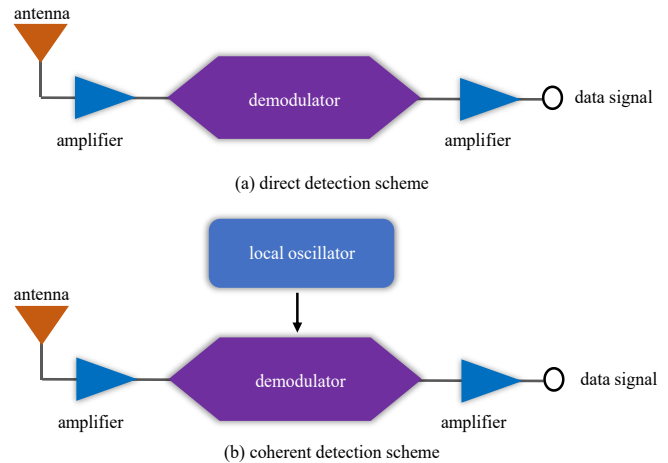


Fig.3 The detection schemes for terahertz receivers
图3 太赫兹接收机两种探测方案图

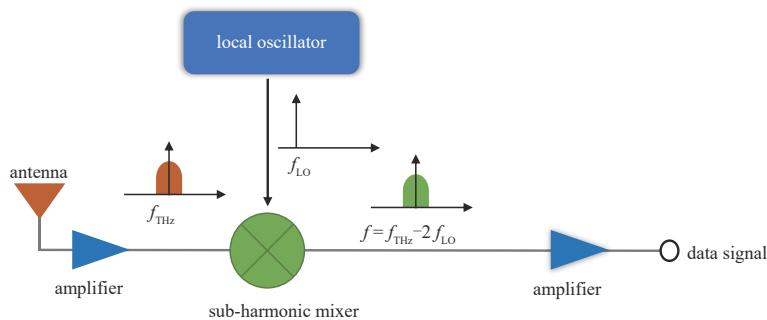


Fig.4 Schematic diagram of the frequency conversion of the sub-harmonic mixer
图4 二次谐波混频器变频的原理方案图

目前太赫兹波段的 SHM 大都基于 SBD 进行设计。相对于工作在低温的超导混频器(如 SIS 混频器、HEB 混频器), SBD 可以在室温环境下正常工作; 相对于加工工艺和成本较高的三极管混频器, SBD 结构简单, 易于加工, 且噪声系数更好^[36]。SBD 混频器可以工作在常温, 具有工艺成熟、损耗低、便于集成等特点, 成为目前 SHM 设计中的主流技术方案^[37]。2012 年中国工程物理研究院设计了以二次谐波混频器为接收机的太赫兹无线通信系统, 该系统成功实现了在 0.34 THz 频段实时传输并解调 16QAM 信号^[38]; 2018 年, 大阪大学研制了由 UTC-PD 和 SHM 作为收发机的无线通信系统, 在 670 GHz 频段上实现了超过 10 Gbit/s 的无误码传输^[39]; 电子科技大学基于电子谐波混频技术, 研制出国内首套 220 GHz 实时通信系统, 实验演示了 220 GHz, 10 Gbit/s, 1 km 通信传输^[40]。

1.2.2 量子阱探测器

QWP 是量子阱红外探测器在太赫兹波段的扩展, 其工作原理是量子阱中的束缚电子吸收光子能量激发到连续态, 光生电子在外偏压的作用下形成光电流。由于 QWP 内在载流子寿命较短, 探测器响应速度快, 灵敏度高, 响应带宽可达数十 THz^[41-44], 在超宽带超高速的太赫兹无线通信中具有很大的应用潜力。

以 THz QWP 为接收机的光子太赫兹通信系统通常是以 THz QCL 作为发射机。以 3.8 THz, 4.1 THz 等为通信频点的太赫兹无线通信已实现^[23-25], 此外, 文献[45]中, 快速 QWP 研制成功, 具有千兆赫兹级别的调制响应带宽, 成功实现了对 6.2 GHz 单音信号调制的太赫兹信号的探测。这项技术还能用于 QCL 的外差检测, 此外, QWP 体积小、易集成化的优势有利于推动光子太赫兹通信系统向集成化的方向发展。

1.2.3 光电导天线

PCA 又称为光电导开关, 20 世纪 80 年代由 D Auston, D Grischowsky 首次提出, 实现了对脉冲宽带太赫兹波的产生与探测^[46-50]。经过多年发展, PCA 已广泛用于太赫兹时域光谱系统中, 成为脉冲宽带太赫兹波产生与探测的关键器件。图 5 为 PCA 产生脉冲宽带太赫兹波的示意图。当飞秒激光器的脉冲照射到 PCA 的光电导区域, 光生电子-空穴对被激发, 并在外加偏置电压的作用下形成光生瞬态电流, 该光生电流作为辐射源驱动金属天线向外辐射太赫兹脉冲^[51]。

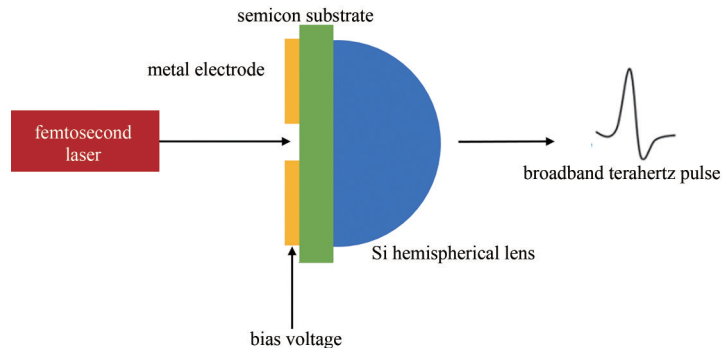


Fig.5 Schematic diagram of PCA generating pulsed broadband terahertz wave
图 5 PCA 产生脉冲宽带太赫兹波的示意图

作为目前太赫兹波段最重要的常温探测器之一, PCA 在连续窄带太赫兹波的产生与探测中表现优异, 可用于太赫兹无线通信中的收发机^[5,30]。图 6 为 PCA 对连续窄带太赫兹波混频探测的方案。激光器产生的两束光信号耦合后作为 PCA 的光本振信号, 接收到的太赫兹波与光本振信号混频产生期望的中低频信号。2005 年, 使用一对 PCA 作为太赫兹发射器和接收器的无线音频传输链路成功实现^[52]。T Harter 等于 2017 年基于 PCA 接收机成功实现了太赫兹下变频无线通信系统, 随后两年实现了数据传输速率达 30 Gbit/s 的信息传输, 无线传输距离为 58 m^[53-54]。太赫兹无线通信传输速率通常受接收机带宽的限制, PCA 宽带宽的特点使 PCA 在超宽带、超高速太赫兹无线通信中具有很大的应用价值^[13]。

综上, 光子太赫兹通信系统接收机主要有两种方案: 直接探测与相干探测。表 2 对比了接收机中两种探测方案的主要特点。直接探测法通常由光子 QWP 或 SBD 完成, 用来探测信号包络, 系统结构简单且消耗功率少, 但频谱效率、灵敏度等性能受限^[55-56]。相干探测利用接收机(如 SHM 和 PCA)实现接收信号与本振信号的混合, 系统结构复杂, 功率消耗更多, 但相干探测法不仅能探测强度调制信号, 还能探测频率、相位调制信号以及更高级调制格式信号, 系统灵敏度高, 带宽更宽, 因此更广泛用于太赫兹通信系统中^[21,35,57-61]。随着新型材料技术的突破, 太赫兹探测器也得到了新的发展。2017 年中国电科 13 所与中科院实现了工作频率在 650 GHz 的石墨烯太赫兹探测器, 这是当时在国际上首次实现石墨烯的外差混频探测^[62]; 来自俄罗斯、英国、日本、意大利的科学

家团队于 2018 年开发出一种基于石墨烯的微米级太赫兹探测器^[63]。这些成果都说明新型材料技术将在太赫兹通信中发挥重要的作用，促进太赫兹通信向着集成化、微型化方向发展。

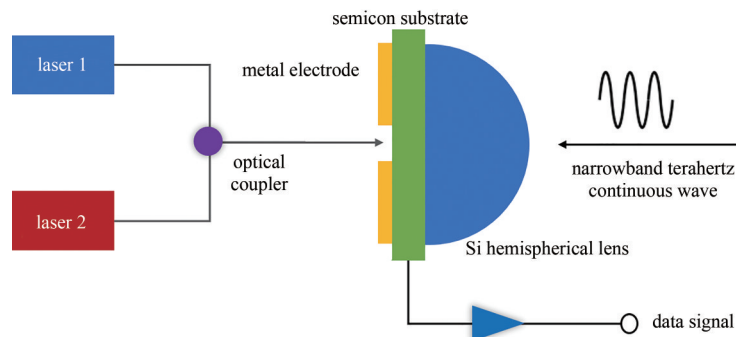


Fig.6 PCA photo-mixing detection of narrowband terahertz continuous wave
图 6 PCA 对连续窄带太赫兹波混频探测方案图

表 2 不同光子太赫兹接收机的特点

Table2 Characteristics of two different photonic terahertz receivers

detection schemes	terahertz receivers	characteristics
direct detection	SBD	1. Detecting the envelope of terahertz signal (Detecting intensity modulated signals).
	THz QWP	2. Simple system structure and lower power consumption. 3. Limited spectral efficiency and sensitivity.
coherent detection	SMH	1. Detecting intensity, frequency, phase modulated signals and other formats.
	PCA	2. Complex system structure and higher power consumption. 3. High system sensitivity and greater detection bandwidth.

2 太赫兹基带信号调制与处理

随着光子太赫兹器件不断成熟，太赫兹无线通信可支撑的有效带宽越来越大，数据传输速率需求正向着 Tbit/s 的方向发展，传统的通信基带处理方式已无法满足超高传输速率的要求，太赫兹通信的实际应用受到很大限制。此外，太赫兹频段的特征，如路径损耗高、信道稀疏、时间扩展严重、延迟扩散高、载波频率偏移、相位噪声高、多普勒偏移扩展变大等，给太赫兹基带信号处理带来诸多挑战^[36]。因此，适合太赫兹频段特性的宽带信号处理方法是提高信息传输速率、提高噪声容限的关键。

太赫兹无线通信系统采用的信号传输方案主要分为两类：单载波信号、多载波信号。单载波信号传输系统大都采用二元幅度调制(ASK/OOK)或幅度和相位多元正交调制(QPSK,QAM)。对于太赫兹频段，可用信道较宽，单载波传输的数据传输速率可以很高。为进一步提高信道信息传输容量，可采用更多维度的复用调制技术，如偏振复用(Polarization Division Multiplexing, PDM)、波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)、正交频分复用(OFDM)实现多载波传输。此外，可以利用多输入多输出技术(Multiple Input Multiple Output, MIMO)提升太赫兹通信网络的可达容量。

2.1 单载波调制传输技术

目前太赫兹无线通信系统采用的单载波调制(Single Carrier Modulation, SCM)传输技术主要为二元幅度调制(ASK/OOK)或幅度和相位多元正交调制(QPSK,QAM)。ASK/OOK 是振幅调制方式，易于实现超高速通信，对信道幅度相位特性要求不高。国内外诸多科研小组通过利用 ASK/OOK 调制格式实现了高速数据传输，如，2004 年，日本电报电话公司在 120 GHz 频段实现以 10 Gbit/s 速率同时传输 6 路 ASK 调制的高清晰度电视(High Definition Television, HDTV)信号，并用于 2008 年北京奥运会赛事直播中^[64]；2013 年日本大阪大学在 300 GHz 频段实现以 40 Gbit/s 无差错无线传输 OOK 信号，这是当时在无前向纠错前提下实现的最高数据传输速率^[13]；2014 年法国里尔大学以 400 GHz 为频点实现 46 Gbit/s 速率无线传输 ASK 信号^[65]。但 ASK/OOK 调制信号存在占用带宽太宽，频率利用率低，系统传输容量有限等问题，相比之下，QPSK、QAM 等高阶调制格式可以高效地提升系统传输容量，为实现超高速光子太赫兹通信提供新的技术途径^[55]。

QPSK 是一种相位调制方式，利用载波不同的相位差表征输入的数据信息，具有恒包络的特征。QAM 是一种幅度相位调制方式，利用彼此正交的两个载波幅度和相位的变化来表征输入的数据信息。相较于 ASK/OOK，QPSK,QAM 频带利用率高，系统频带利用率会随着调制阶数的提高而增大。2011 年，日本国家信息与通信研究

所在 W 波段实现了 16QAM 光载无线信号的传输, 传输速率达到 40 Gbit/s^[66]; 同年, 丹麦技术大学在光无线混合链路中实现了 W 波段 16QAM 信号传输速率 100 Gbit/s 的突破^[67]。

QAM 阶数的提高增大了系统频带利用率, 但与此同时, QAM 星座图中各点的欧氏距离缩短, 星座点更密集的高阶调制格式信号对传输过程中存在的噪声和非线性损伤更为敏感, 导致系统误码率提高, 严重影响太赫兹无线通信质量, 利用星座整形技术和先进的数字信号处理算法对提高系统通信质量至关重要^[68]。目前星座整形技术分为概率整形(PS)和几何整形两大类。几何整形是通过调整星座图中各星座点之间的欧式距离来实现; 在概率整形技术中, 其对应的星座图中各个星座点的间隔是等距的, 但每个星座点具有不同的概率。最常见的概率整形方案是基于麦克斯韦-玻兹曼分布原理, 内环分布的较低能量星座点传输概率比外环分布的较高能量星座点更高, 这样降低了平均发射功率, 从而有效提高比特能量效率, 改善噪声容限^[58]。相较于几何整形, 概率整形技术只改变了信号出现的概率, 仍可利用现有的数字信号处理算法进行解调, 对设备提出的要求更低, 更容易实现^[69]。2017 年复旦大学利用 300 GHz 频段实现了 32 Gbit/s PS-16QAM 信号的传输。实验结果表明, 与星座图均匀分布相比, 采用概率整形技术可有效降低误码率^[70]。

2.2 多载波调制传输技术

太赫兹单载波传输方式对频率响应不平坦的信道很敏感, 存在信道多径扩展的特点, 由于“木桶效应”, 系统的信噪比受信道的影 响较大。利用多载波传输能适应太赫兹信道不平坦的特性, 提高系统通信的信噪比。此外, 利用多载波传输方式能提高信道的利用率和信道信息传输容量^[27]。

光纤通信中, WDM 是将多种不同波长的光载波复用汇合到一起并耦合至光纤中进行传输的技术。基于光子学的太赫兹通信系统能利用光纤通信中的波分复用技术, 使通信系统在传统单载波调制技术的基础上实现系统容量的成倍增长。PDM 作为光纤通信中另一光学调制技术也能运用到太赫兹多信道传输调制中。当信道传输带宽受限时, 偏振复用成为了提高信道传输容量的有效方法之一。偏振复用技术实现是基于光载波具有两个正交的偏振态, 每个偏振态都可以独立地调制信号。这种复用方式使得信道的信息传输能力提高了一倍且不需要额外的带宽资源, 对实现超高速光子太赫兹通信有重大意义。

在传统的 FDM 中, 整个传输信道带宽分成 N 个子频带, 为防止各子频带之间相互干扰, 各频带之间存在保护间隔, 使频带的利用率下降。OFDM 技术允许各子频带之间重叠, 由于各子频带的信号是正交的, 每个载波的频谱零点和相邻载波的零点重叠, 减小了载波间的干扰, 频带利用率提高。针对 OFDM 的子载波, 可以灵活调整每个子载波上的星座信息, 合理调整星座点和功率分配, 以提高整个系统的熵^[27]。此外, 正交的子载波可以利用快速傅里叶变换(FFT/IFFT)实现调制和解调, 大大减少了运算量^[68]。因此, OFDM 技术对实现超高速太赫兹无线通信也具有很大的价值。

此外, 为满足通信容量增长的需求, MIMO 技术得以迅速发展与应用。MIMO 技术使用多套发送接收设备, 每套收发机的各天线单位之间存在充分的间隔, 削弱了天线间的相关性, 这样发射机与接收机之间存在多个相对独立的空间信道。MIMO 技术使得在不增加带宽的情况下成倍地提高通信系统的容量和利用率。将 WDM, PDM, OFDM 等复用技术与 MIMO 技术结合, 将对太赫兹无线通信速率向 Tbit/s 发展起到推动作用。2014 年, 英国的 H Shams 结合 PDM 与 MIMO 技术, 实现了在 200 GHz 频段以 75 Gbit/s 传输速率双通道 QPSK 信号实时传输^[71], 随后一年便实现了传输速率达 100 Gbit/s 的四载波传输系统, 说明多载波传输可有效增加数据传输速率, 降低光电转换器件的带宽要求^[72]; 2015 年丹麦科技大学实现了以 400 GHz 为载频, 以 60 Gbit/s 传输速率传输 WDM-QPSK 信号, 打破了当时高于 300 GHz 的载频上最高传输速率的记录^[73]; 2018 年, 复旦大学使用 4×4 MIMO 系统, 利用概率整形、奈奎斯特整形、查找表等先进数字信号处理技术, 实现 1.056 Tbit/s 的数据传输^[74]; 2020 年, 浙江大学基于波分复用与太赫兹正交极化双天线方案成功实现了以 612.65 Gbit/s(大约 2×300 Gbit/s)数据传输速率传输 PS-64QAM-OFDM 信号^[58]。

在实现光子太赫兹无线通信系统中, 宽带光电器件为太赫兹通信系统提供宽带资源, 但会引起严重的非线性损伤, 因此需对非线性信号进行处理^[55-56]。2020 年浙江大学 L Zhang 等提出了一种非线性信号处理的迭代方案, 包括线性均衡、相位噪声补偿、非线性均衡 3 个部分^[27]。首先, 线性均衡导频在时域中交错, 然后通过简单的估计算法, 如最小二乘算法, 对频域中的信号进行补偿; 第二步, 通过快速傅里叶逆变换(IFFT)操作将信号重新调制到时域, 并使用子样本拟合或插值算法在时域中补偿相位噪声; 第三步, 时域中的 OFDM 信号通过非线性滤波进行均衡, 可采用基于 Volterra 级数的滤波。使用三阶 Volterra 核和自适应过滤波算法进行系数训练(如递归最小二乘算法)。随后将非线性滤波后的信号恢复到频域。最后通过 QAM 解映射恢复信号^[27]。经验证, 两次迭代即可有效补偿失真^[35,58]。

3 光子太赫兹无线通信系统

基于光子技术的太赫兹通信系统通常利用光学外差拍频或直接调制方法产生太赫兹信号进行传输。与全电子太赫兹通信系统相比，基于光子技术的太赫兹系统可以实现超宽带和超高速传输、与高速光纤网络的无缝链接，是连接无线网络与有线网络之间的“桥梁”^[27]。根据光子太赫兹通信系统接收方式的不同，光子太赫兹通信系统可以分为光子辅助型、全光子型太赫兹通信系统。光子辅助型通信系统的接收机主要使用基于电子学的器件，如混频器等。基于全光子的太赫兹通信系统接收机则使用光子型器件接收太赫兹信号，如 QWP,PCA 等。

3.1 全光子型太赫兹无线通信系统

在光子太赫兹系统中，利用光子型器件如 QWP、PCA 等接收太赫兹信号的系统可以认为是全光子太赫兹通信系统。2010 年，中国科学院在 4.1THz 频率实现了基于 THz QCL 与 THz QWP 的无线模拟通信链路，采用强度调制与直接探测的方式，实现了音频信号的无线传输^[24]，图 7 为该无线模拟通信链路方案图^[24]。待传输的音频或其他信号与直流电流偏移叠加并由功率放大器放大后直接驱动 QCL 产生调制光输出，两个离轴抛物面反光镜将 QCL 产生的 4.1 THz 信号聚集并沿室内空气传播后聚焦到 QWP 上，接收到的信号经跨阻放大器放大后，再进行高通滤波处理，以消除由暗电流和热漂移引起的低频过量噪声，最后经过可调增益放大器，馈送到终端示波器或扬声器^[24]。随后该团队基于 THz QCL 和 THz QWP 实现了 20 Gbit/s 的实时无线传输，验证了 THz QCL 和 THz QWP 实现超高速太赫兹通信的潜力^[75]。

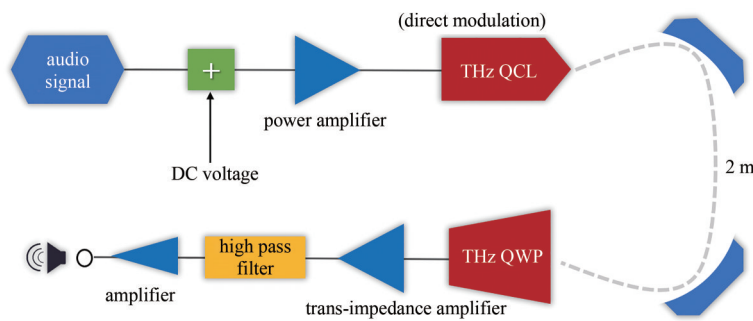


Fig.7 Wireless analog communication link based on THz QCL and THz QWP
图 7 基于 THz QCL 与 THz QWP 的无线模拟通信链路

PCA 作为光子型器件也用于太赫兹无线通信系统中。2017 年，德国卡尔斯鲁厄理工学院基于 PCA 接收机成功实现了太赫兹外差下变频无线通信系统，并于 2019 年实现了传输距离为 58 m，数据传输速率达 30 Gbit/s 的无线传输^[53-54]，图 8 为该无线通信链路的方案图^[53]。来自激光器的光束进入光调制器进行基带信号调制，调制后的光信号与本振光耦合，再叠加到 UTC-PD 上产生太赫兹信号；太赫兹信号通过喇叭天线被辐射到视距空间链路中，经两个级联的太赫兹放大器增强后由 PCA 探测接收；在接收端，由激光器发出的两个光载波耦合后作为 PCA 的本振光信号；窄带连续太赫兹信号在 PCA 中与本振光信号混合产生中频信号，并由示波器存储以供进一步处理^[53]。

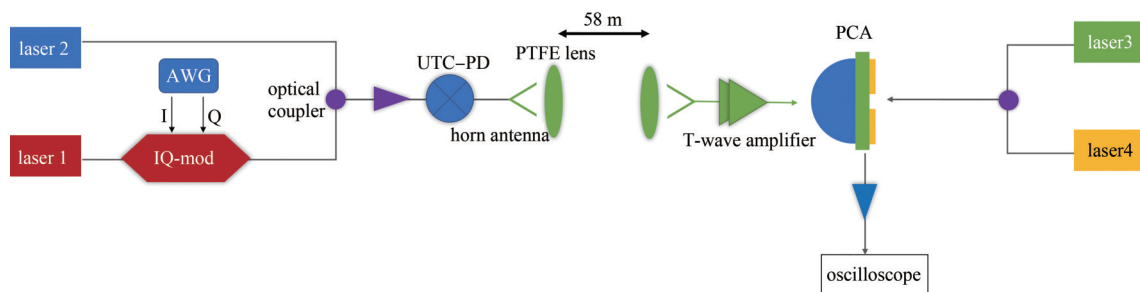


Fig.8 All-photonics terahertz wireless communication system based on PCA receiver of Karlsruhe Institute of Technology
图 8 德国卡尔斯鲁厄理工学院基于 PCA 接收器的全光子太赫兹无线通信系统

3.2 光子辅助型太赫兹通信系统

光子辅助型太赫兹通信系统是目前最常见的太赫兹无线通信系统。光子辅助型太赫兹无线通信系统通常利用 UTC-PD 作为发射机，通过光学外差拍频产生太赫兹信号，接收机通常采用基于电子学的 SBD、混频器、

SMH 等。基于 UTC-PD 轻松实现多载波传输，结合先进的调制、复用以及其他数字信号处理技术，光子辅助型太赫兹通信系统的系统性能显著提高，实现创纪录的超高速太赫兹通信。

2018 年，复旦大学利用概率整形、奈奎斯特整形、查找表等先进数字信号处理技术，实现 4×4 MIMO PS-64QAM 光子辅助毫米波信号在 3.1 m 无线链路上的传输，传输速率高达 1.056 Tbit/s^[74]，图 9 为该太赫兹通信系统方案图^[74]。在光发射端，上下两支路中的两组激光通过保偏耦合器(Polarization Maintaining Optical Coupler, PM-OC)耦合成两路双通道信号，两路双通道信号分别被 IQ 调制器调制后，经由保偏掺饵光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)放大，再通过偏振复用器产生两路双通道 PDM-64QAM 信号。随后两路双通道 PDM-64QAM 信号耦合到单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)中。在无线发射端，接收到的两路双通道信号通过一个最小网格为 10 GHz 的可编程 1×4 WSS(Wavelength Selective Switch)并被分离成两个双子载波光信号。两路双子载波光信号经过偏振控制器(Polarization Controller, PC)与偏振分光棱镜(Polarization Beam Splitter, PBS)，双子载波光信号两个偏振方向信号分离并分别与光本振信号混合，产生的 D 波段信号经由 EDFA 放大后通过 PD 转换为电毫米波信号。无线接收端则用混频器对两路 PDM-64QAM 信号混频接收，接收到的中频信号由示波器存储以供后续处理^[74]。

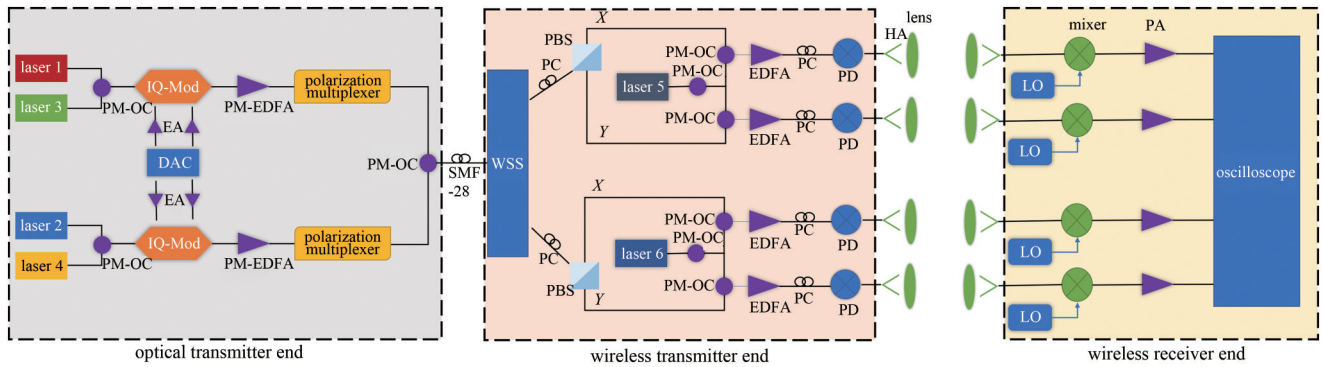


Fig.9 Photonic-assisted terahertz communication system of Fudan University
图9 复旦大学光子辅助型太赫兹通信系统

2020 年，浙江大学实现了基于太赫兹正交极化双天线方案的混合太赫兹光子无线传输。该方案采用 PS-64QAM-OFDM 调制格式，成功实现了 612.65 Gbit/s(大约 2×300 Gbit/s)数据传输速率^[58]，图 10 为该无线传输系统的方案图^[58]。将 30 GHz 信号调制到相位调制器上生成光频梳，选择两个频率作为光载频。IQ 光调制器由来自任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)的信号驱动。经过光放大后，两个基带通道被分开并使用 1 m 光纤延迟线对两通道光载波进行去相关操作。另一额外的激光器产生本振光信号与偏振对准后的光信号耦合并通向 2 个 UTC-PD 产生太赫兹信号。为减少极化串扰，两矩形长边分别沿水平、垂直极化轴。在接收器端，两路太赫兹信号通过 SBD 混频器下变频到中频段，随后混合输出被放大存储到数字存储示波器以便后续信号处理^[58]。2022 年，东南大学联合网络通信与安全紫金山实验室、鹏城实验室、复旦大学和中国移动等团队，搭建出 360~430 GHz 频段 100/200 Gbit/s 无线传输通信实验系统，实现单波长净速率为 103.125 Gbit/s、双波长净速率为 206.25 Gbit/s 的太赫兹实时无线传输^[76]。

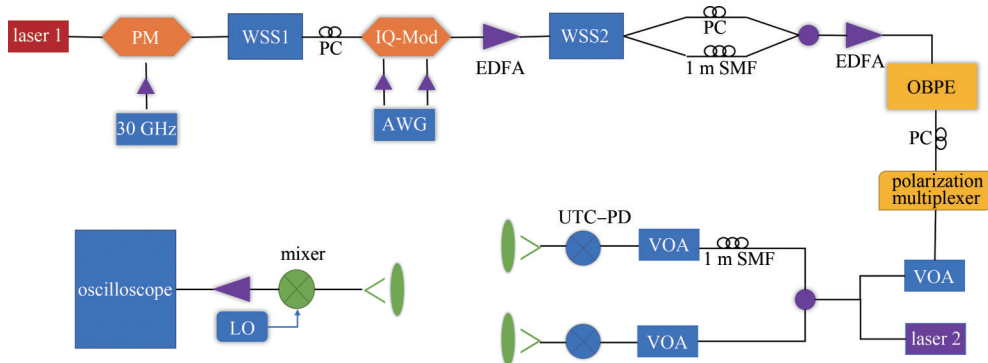


Fig.10 Photonic-assisted terahertz communication system of Zhejiang University
图10 浙江大学光子辅助型太赫兹通信系统

目前光子太赫兹通信系统大都利用 UTC-PD 基于光子外差技术或利用 QCL 直接调制实现太赫兹波的产生，

在接收端则利用基于电子学的器件太赫兹混频器等(如SBD混频器、SIS混频器、HEB混频器、SMH等)或光子器件PCA实现相干探测,而SBD与HEB混频器等器件能实现直接探测。与全电子太赫兹通信技术相比,光子太赫兹通信技术具有带宽大、调制指数高、谐波少等优点,利用UTC-PD光混频器可实现多载波传输。此外,利用光子技术能实现在光域、波长、偏振、复数振幅等多个维度复用,大大提高信息传输容量,极大地促进了超高速太赫兹无线通信技术的发展。不容忽视的是,光子太赫兹通信系统中的常用器件UTC-PD存在光电转换效率较低的缺点,产生的太赫兹信号功率较低,限制了太赫兹信号无线传输的距离;THz QCL则需要在极低温的环境下工作,限制了其应用场景等。这些都是光子太赫兹通信目前急需解决的问题。但值得一提的是,目前大多数的超高速太赫兹通信系统都为光子辅助型通信系统,即接收机都为电子器件,可以看出,太赫兹通信的电子与光子技术都因其具有不可替代的优势而相互促进,共同助力超高速太赫兹通信技术的发展^[27]。

4 光子太赫兹通信技术的发展趋势与应用

1) 太赫兹器件

随着光子集成技术的演进,它将成为提高太赫兹发射功率和降低能耗的可行途径之一。首先,光子集成能大大降低器件连接损耗;其次,通过单片光子集成,它的温度控制可以使能耗显著低于分立组件方式。同时,为了进一步提高太赫兹发射功率,可以集成多个光混频器,利用功率合成技术提升发射功率。此外,新材料与工艺也将会推动太赫兹器件的发展,如,石墨烯超材料可用于太赫兹调制器的研制,石墨烯场效应晶体管可用于太赫兹信号的检测等^[27]。

2) 太赫兹基带信号处理

运用星座整形技术特别是概率整形技术能提高太赫兹通信的比特能量效率,改善噪声容限,提高通信质量。目前整形方法大多基于加性高斯白噪声和线性信道响应的假设,为了适应太赫兹信道的特性,可利用机器学习或深度学习训练算法实现对星座点的概率智能分配或距离调整,实现星座整形的自适应训练。此外,为了减轻多载波信号载波间干扰,可以对多载波信号进行分组滤波,抑制带外旁瓣,节省频率保护带,还可以使用正交时频空调制技术等改进的多载波调制技术提高信道在时频双选信道下的噪声容限。同时,可运用5G中的超奈奎斯特传输技术提高太赫兹通信的频率利用效率^[27]。

3) 太赫兹通信系统

光子太赫兹通信系统应充分利用光子技术的优势,实现在光域、波长、偏振、复数振幅等多个维度的联合复用,结合先进的调制格式、数字信号处理技术提高通信系统的数据传输速率。值得注意的是,光子多维复用芯片的发展对推动光子太赫兹通信系统的实际应用至关重要,目前硅基光子集成电路的发展将在太赫兹通信的可持续发展中发挥重要作用^[27]。此外,充分发挥光载无线通信技术(Radio-over-Fiber)的优势,利用光纤传输的高带宽、低损耗特性,有效促进无线通信与光纤通信的紧密融合^[20,77]。

目前太赫兹通信系统大都处在室内或室外实验验证阶段,还没有大范围进入实际应用阶段,但随着高速太赫兹通信技术的发展,高速数据传输速率必定会催化高速率需求的应用出现,这些应用又会进一步促进太赫兹通信向着速率更快、容量更大的方向发展。如图11所示,太赫兹通信的应用场景可以大体分为两个尺度:宏观尺度、微观尺度。

4.1 宏观尺度

太赫兹通信宏观尺度应用场景主要是指传输距离大于1 m的应用场景,包括回传/前传链路、太空通信等。具有大容量的无线前传和回传网络是太赫兹无线通信的重要应用。由于移动用户的激增,国际移动通信联盟IMT-2020等要求前传链路的传输容量远大于10 Gbit/s^[78]。考虑到现有光纤链路的高容量、大规模部署与网络平滑演进的需求,光子太赫兹无线技术可以很好地满足这一要求。在这种应用场景下,太赫兹无线通信链路可作为无线网络和光纤网络之间无缝衔接的桥梁^[26]。但由于大气中水和氧气分子的吸收,太赫兹波传播时衰减较为严重,影响了光子太赫兹无线通信的覆盖范围和传输速率。因此,在光子太赫兹通信链路的设计时应当预留额外的链路预算^[78]。天线技术和功率控制的改进有

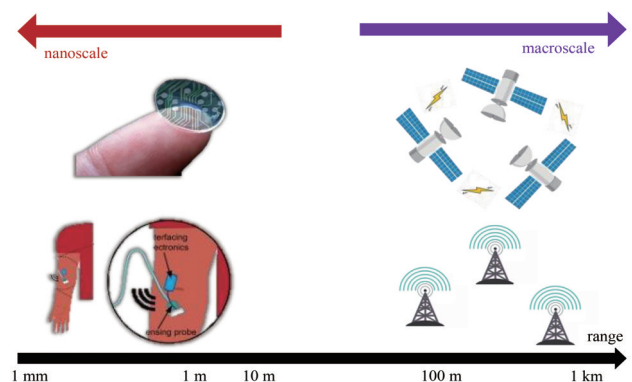


Fig.11 Application of photonic terahertz technology in nanoscale and macroscale

图 11 光子太赫兹技术在微观尺度与宏观尺度的应用

望解决太赫兹波路径损耗问题,同时引入智能反射面/可重构智能表面、无人机辅助通信等中继技术可以扩大太赫兹通信的覆盖范围。

在太空通信的应用中,由于太空中水、氧气分子的密度大幅降低,太赫兹衰减程度也大大降低,因此可用高传输速率的太赫兹系统代替传统的微波/毫米波无线电系统实现航天器之间的通信。此外,光子太赫兹通信终端结合高增益、自动对准的大型相控阵天线,可用于卫星通信链路,增强空间链路的连接性、可靠性与吞吐量。但尽管如此,太赫兹目前仍面临高增益极窄、定向波束难以对准的问题。

4.2 微观尺度

太赫兹通信的微观尺度应用场景主要是指通信距离小于 1 m 的应用场景,通信距离小于 1 m 可有效避免太赫兹波段高路径衰减和分子衰减带来的负面影响。微尺度的应用主要集中在生物医学、医疗保健等领域。由于太赫兹波长与分子尺寸接近,可以通过可穿戴的纳米传感器来监测血液中的钠、葡萄糖和其他离子、胆固醇、癌症生物标志物或不同病原体的存在等,可以通过构造纳米传感器网络收集用户的健康数据,建立大容量局域网来执行特定的任务^[3]。此外,实现芯片高速数据传输的片上或片间无线通信也会是太赫兹通信在微观尺度的一个重要应用,大大降低了面积开销。随着光子集成技术的演进与石墨烯等新型材料技术的突破,太赫兹通信器件向集成化、微型化方向发展,促进太赫兹通信微观尺度应用场景的实现。

5 结论

本文从光子太赫兹通信收发器件、光子太赫兹通信基带信号处理技术、光子太赫兹通信系统架构与实验验证等 3 个层面对光子太赫兹通信技术进行了分析。对于光子太赫兹通信器件,UTC-PD 基于光子外差拍频方式产生太赫兹信号,因其能进行灵活的载波调频,支持复杂的调制格式,广泛用于亚太赫兹频段的光子太赫兹通信系统中。在接收端,SBD 既能用于外差探测又能用于直接探测,对太赫兹通信接收机的发展起到至关重要的作用。相比直接探测方案,外差检测表现出更高的灵敏度和更大的带宽,而直接检测更具低成本的效益。在太赫兹基带信号处理方面,本文分析了光子太赫兹通信中常见的调制格式、复用技术以及信号处理方法,为满足超高速率、超高容量的无线通信,更高阶的调制格式、复用技术与先进的数字信号处理方法相结合,可有效推动光子太赫兹通信传输速率向 Tbit/s 的层级迈进。在光子太赫兹通信系统层面,光子辅助型的太赫兹通信系统展现出太赫兹通信中电子与光子技术相互促进、共同助力超高速通信技术发展的趋势。基于对光子太赫兹通信关键技术分析,本文进一步探讨与展望了太赫兹技术在器件、信号、系统 3 个层面的发展方向以及超高速光子太赫兹技术在空间通信、无线前传与回传网络等方面的潜在应用前景,并分析了相关应用场景下的关键技术与挑战。

参考文献:

- [1] Cisco Annual Internet Report(2018~2023) White Paper[R/OL]. (2020-03-09)[2021-12-15]. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>.
- [2] CHERRY S. Edholm's law of bandwidth[J]. IEEE Spectrum, 2004,41(7):58-60.
- [3] ELAYAN H, AMIN O, SHIHADA B, et al. Terahertz band: the last piece of RF spectrum puzzle for communication systems[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2019(1):1-32.
- [4] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [5] YU X B, CHEN Y, GALILI M, et al. The prospects of ultra-broadband THz wireless communications[C]// 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Graz, Austria: IEEE, 2014:1-4.
- [6] 张真真, 王长, 谭智勇, 等. 面向 6G 无线通信应用的太赫兹收发器[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6):772-779. (ZHANG Zhenzhen, WANG Chang, TAN Zhiyong, et al. Terahertz transceivers for 6G wireless communication[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(6):772-779.)
- [7] NAGATSUMA T, DUCOURNAU G, RENAUD C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. Nature Photonics, 2016, 10(6):371-379.
- [8] ITO H, FURUTA T S, KODAMA, et al. InP/InGaAs uni-travelling-carrier photodiode with 310 GHz bandwidth[J]. Electronics Letters, 2000, 36(21):1809-1810.
- [9] ITO H, HIRATA A, MINOTANIT, et al. High-power photonic millimetre wave generation at 100 GHz using matching-circuit-integrated uni-travelling-carrier photodiodes[J]. IEEE Proceedings-Optoelectronics, 2003, 150(2):138-142.
- [10] ITO H, FURUTA T, NAKAJIMA F, et al. Photonic generation of continuous THz wave using uni-traveling-carrier photodiode[J].

- Journal of Lightwave Technology, 2005,23(12):4016–4021.
- [11] ISHIBASHI T, MURAMOTO Y, YOSHIMATSU T, et al. Uni-traveling-carrier photodiodes for terahertz applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014,20(6):79–88.
- [12] ITO H, ISHIBASHI T. Photonic terahertz-wave generation using slot-antenna-integrated uni-traveling-carrier photodiodes[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017,23(4):1–7.
- [13] NAGATSUMA T, HORIGUCHI S, MINAMIKATA Y, et al. Terahertz wireless communications based on photonics technologies[J]. Optics Express, 2013,21(20):23736–23747.
- [14] WANG S W, ZHANG L, LU Z J, et al. Photonic generation of terahertz dual-chirp waveforms ranging from 364 to 392 GHz[J]. Optics Express, 2021,29(13):19240–19246.
- [15] WANG Shiwei, LU Zijie, ZHANG Hongqi, et al. Photonic heterodyne generation of phase-coded terahertz signals[J]. Optics Communications, 2021(499):127253.
- [16] WANG Shiwei, LU Zijie, ZHANG Hongqi, et al. A terahertz photonic imaging radar system based on inverse synthetic aperture technique[C]// 2021 26th Optoelectronics and Communications Conference. Hong Kong, China: Optical Society of America, 2021: M3E–4.
- [17] LU Z, WANG S, ZHANG H, et al. Precise Terahertz frequency measurement based on an opto–electronic terahertz comb[C]// 2021 26th Optoelectronics and Communications Conference. Hong Kong, China: Optical Society of America, 2021: M3E–2.
- [18] FAIST J, CAPASSO F, ZHUO Y H, et al. Quantum cascade laser[J]. Science, 1994,264(5158):553–556.
- [19] KÖHLER R, TREDICUCCI A, BELTRAM F, et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser[J]. Nature, 2002,417(6885):156–159.
- [20] 赵明明, 余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):931–937. (ZHAO Mingming, YU Jianjun. Terahertz communication system: present and outlook[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):931–937.)
- [21] 顾立, 谭智勇, 曹俊诚. 太赫兹通信技术研究进展[J]. 物理学报, 2013,42(10):695–707. (GU Li, TAN Zhiyong, CAO Juncheng. Terahertz communication technology[J]. Acta Physica Sinica, 2013,42(10):695–707.)
- [22] CHAN C W I, HU Q, RENO J L. Ground state terahertz quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2012,101(15):151108-1–4.
- [23] GRANT P D, LAFRAMBOISE S R, DUDEK R, et al. Terahertz free space communications demonstration with quantum cascade laser and quantum well photodetector[J]. Electronics Letters, 2009,45(18):952–954.
- [24] CHEN Z, TAN Z Y, HAN Y J, et al. Wireless communication demonstration at 4.1 THz using quantum cascade laser and quantum well photodetector[J]. Electronics Letters, 2011,47(17):1002–1004.
- [25] TAN Z, CHEN Z, CAO J, et al. Wireless terahertz light transmission based on digitally-modulated terahertz quantum-cascade laser[J]. Chinese Optics Letters, 2013,11(3):031403.
- [26] ZHANG Hongqi, ZHANG Lu, YU Xianbin, et al. Terahertz band: lighting up next-generation wireless communications[J]. China Communications, 2021,18(5):153–174.
- [27] ZHANG L, PANG X, JIA S, et al. Beyond 100 Gb/s optoelectronic terahertz communications: key technologies and directions[J]. IEEE Communications Magazine, 2020,58(11):34–40.
- [28] 网络通信研究院在国内首批实现太赫兹 RTO 辐射源 1 THz 频率突破[R/OL]. (2021–5–14). https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_12681654. (Network Communication Research Institute achieved the first breakthrough in 1 THz frequency of terahertz RTO radiation source in China[R/OL]. (2021–5–14). https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_12681654.)
- [29] IZUMI R, SUZUKI S, ASADA M, et al. 1.98 THz resonant-tunneling-diode oscillator with reduced conduction loss by thick antenna electrode[C]// 2017 42th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW–THz). Cancun, Mexico: IEEE, 2017:1–2.
- [30] 张真真, 黎华, 曹俊诚. 高速太赫兹探测器[J]. 物理学报, 2018,67(9):090702. (ZHANG Zhenzhen, LI Hua, CAO Juncheng. Ultrafast terahertz detectors[J]. Acta Physica Sinica, 2018,67(9):090702.)
- [31] RIEH J S, YOON D, YUN J. An overview of solid–state electronic sources and detectors for Terahertz imaging[C]// 2014 12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT). Guilin, China: IEEE, 2014:1–4.
- [32] SIZOV F. THz radiation sensors[J]. Opto–Electronics Review, 2010,18(1):10–36.
- [33] MONTERO–DE–PAZ J, HOEFLE M, OPREA I, et al. Compact Schottky barrier diode receiver for E-band(60–90 GHz) wireless communications[C]// 2012 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics. Noordwijk: IEEE, 2012:244–247.
- [34] HARTER T, FÜLLNER C, KEMAL J N, et al. 110-m THz wireless transmission at 100 Gbit/s using a Kramers–Kronig Schottky

- barrier diode receiver[C]// 2018 European Conference on Optical Communication(ECOC). Rome,Italy:IEEE, 2018:1–3.
- [35] WANG S, LU Z, LI W, et al. 26.8 m THz wireless transmission of probabilistic shaping 16-QAM-OFDM signals[J]. *APL Photonics*, 2020,5(5): 056105.
- [36] 姜航,姚远. 高速长距离太赫兹通信系统研究现状与难点综述[J]. *无线电通信技术*, 2019,45(6):634–637. (JIANG Hang, YAO Yuan. An overview on research status and difficulties of high speed long distance terahertz communication system[J]. *Radio Communications Technology*, 2019,45(6):634–637.)
- [37] 李宇. 基于肖特基二极管的太赫兹次谐波混频器研究[D]. 成都:电子科技大学, 2021. (LI Yu. Study on THz subharmonic mixer based on the Schottky diode[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2021.)
- [38] 王成,陆斌,缪丽,等. 0.34THz 无线通信收发前端[J]. *强激光与粒子束*, 2013,25(6):1530–1534. (WANG Cheng,LU Bin,MIAO Li,et al. 0.34 THz T/R front-end for wireless communication[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013,25(6):1530–1534.)
- [39] NAGATSUMA T,KUROKAWA T,SONODA M,et al. 600 GHz band waveguide-output uni-traveling-carrier photodiodes and their applications to wireless communication[C]// 2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium(IMS). Philadelphia,PA: IEEE, 2018:1180–1183.
- [40] CHEN Z,MA X,ZHANG B,et al. A survey on terahertz communications[J]. *China Communications*, 2019,16(2):1–35.
- [41] GUO X G,CAO J C,ZHANG R,et al. Recent progress in terahertz quantum-well photodetectors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012,19(1):8500508.
- [42] ZHANG R,SHAO D X,FU Z L,et al. Terahertz quantum well photodetectors with metal-grating couplers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016,23(4):1–7.
- [43] LI Ruizhi,FU Zhanglong,TAN Zhiyong,et al. Wide spectrum terahertz quantum well photodetector[J]. *Electronics Letters*, 2020, 56(16):843–845.
- [44] LIU H C,SONG C Y,SPRING-THORPE A J,et al. Terahertz quantum-well photodetector[J]. *Applied Physics Letters*, 2004,84 (20):4068–4070.
- [45] TAN Z,LI H,WAN W,et al. Direct detection of a fast modulated terahertz light with a spectrally matched quantum-well photodetector[J]. *Electronics Letters*, 2017,53(2):91–93.
- [46] AUSTON D H. Subpicosecond electro-optic shock waves[J]. *Applied Physics Letters*, 1983,43(8):713–715.
- [47] AUSTON D H,CHEUNG K P,SMITH P R. Picosecond photoconducting Hertzian dipoles[J]. *Applied Physics Letters*, 1984,45(3): 284–286.
- [48] AUSTON D H,SMITH P R. Generation and detection of millimeter waves by picosecond photoconductivity[J]. *Applied Physics Letters*, 1983,43(7):631–633.
- [49] SMITH P R, AUSTON D H, NUSS M C. Subpicosecond photoconducting dipole antennas[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988,24(2):255–260.
- [50] KETCHEN M B,GRISCHKOWSKY D,CHEN T C,et al. Generation of subpicosecond electrical pulses on coplanar transmission lines[J]. *Applied Physics Letters*, 1986,48(12):751–753.
- [51] 陈龙超. 光电导太赫兹器件关键问题及应用研究[D]. 西安:中国科学院大学, 2012. (CHEN Longchao. Study on the key problems and applications of terahertz photoconductive devices[D]. Xi'an,China:University of Chinese Academy of Sciences, 2012.)
- [52] LIU T A,LIN G R,CHANG Y C,et al. Wireless audio and burst communication link with directly modulated THz photoconductive antenna[J]. *Optics Express*, 2005,13(25):10416–10423.
- [53] HARTER T,UMMETHALA S,BLAICHER M,et al. Wireless THz link with optoelectronic transmitter and receiver[J]. *Optica*, 2019,6(8):1063–1070.
- [54] HARTER T,WEBER M,MUEHLBRANDT S,et al. Wireless THz communications using optoelectronic techniques for signal generation and coherent reception[C]// 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics(CLEO). San Jose,CA:IEEE, 2017:1–2.
- [55] QIAO M Y,ZHANG L,WANG S W,et al. 60 Gbit/s PAM-4 wireless transmission in the 310 GHz band with nonlinearity tolerant signal processing[J]. *Optics Communications*, 2021,492(1):126988.
- [56] ZHANG L,QIAO M Y,WANG S W,et al. Nonlinearity-aware optoelectronic terahertz discrete multitone signal transmission with a zero-bias diode[J]. *Optics Letters*, 2020,45(18):5045–5048.
- [57] ZHANG H Q, ZHANG L, WANG S W, et al. Tbit/s multi-dimensional multiplexing THz-Over-Fiber for 6G wireless communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021,39(18):5783–5790.
- [58] JIA S,ZHANG L,WANG S,et al. 2×300 Gbit/s line rate PS-64QAM-OFDM THz photonic-wireless transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020,38(17):4715–4721.

- [59] JIA S, LO M C, ZHANG L, et al. Integrated dual-DFB laser for 408 GHz carrier generation enabling 131 Gbit/s wireless transmission over 10.7 meters[C]// 2019 Optical Fiber Communication Conference. San Diego,CA:IEEE, 2019:Th1C-2.
- [60] ZHANG H,ZHANG L,WANG S,et al. Aggregated 1.059 Tbit/s photonic-wireless transmission at 350 GHz over 10 meters[C]// 2021 Optoelectronics and Communications Conference. Hong Kong,China:Optical Society of America, 2021:T5A-3.
- [61] LU Z,WANG S,LI W,et al. 26.8 m 350 GHz wireless transmission of beyond 100 Gbit/s supported by THz photonics[C]// 2019 Asia Communications and Photonics Conference. Chengdu,China:IEEE, 2019:M4D-6.
- [62] QIN Hua,SUN Jiandong,HE Zezhao,et al. Heterodyne detection at 216,432,and 648 GHz based on bilayer graphene field-effect transistor with quasi-optical coupling[J]. Carbon, 2017(121):235-241.
- [63] BANDURIN D A,SVINTSOV D,GAYDUCHENKO I,et al. Resonant terahertz detection using graphene plasmons[J]. Nature Communications, 2018,9(1):1-8.
- [64] KUKUTSU N,HIRATA A,KOSUGI T,et al. 10 Gbit/s wireless transmission systems using 120-GHz-band photodiode and MMIC technologies[C]// 2009 Annual IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Greensboro,NC:IEEE, 2009:1-4.
- [65] DUCOURNAU G, SZRIFTGISER P, BECK A, et al. Ultrawide-bandwidth single-channel 0.4-THz wireless link combining broadband quasi-optic photomixer and coherent detection[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014,4(3):328-337.
- [66] KANNO A,INAGAKI K,MOROHASHI I,et al. 40 Gb/s W-band(75~110 GHz) 16-QAM radio-over-fiber signal generation and its wireless transmission[J]. Optics Express, 2011,19(26):B56-B63.
- [67] PANG Xiaodan,CABALLERO Antonio,DOGADAEV Anton,et al. 100 Gbit/s hybrid optical fiber-wireless link in the W-band (75~110 GHz)[J]. Optics Express, 2011,19(25):24944-24949.
- [68] 李伟. 基于概率整形的高速光子太赫兹无线通信系统[D]. 杭州:浙江大学, 2020. (LI Wei. High-speed terahertz photonic wireless communication assisted by probabilistic shaping[D]. Hangzhou,China:Zhejiang University, 2020.)
- [69] 乔梦瑶. 基于直接检测的高速光子太赫兹无线通信系统[D]. 杭州:浙江大学, 2021. (QIAO Mengyao. High-speed terahertz photonic wireless communication assisted by direct detection[D]. Hangzhou,China:Zhejiang University, 2021.)
- [70] WANG K,LI X,KONG M,et al. Probabilistically shaped 16QAM signal transmission in a photonics-aided wireless terahertz wave system[C]// 2018 Optical Fiber Communication Conference. San Diego,CA:IEEE, 2018:M4J-7.
- [71] SHAMS H,FICE M J,BALAKIER K,et al. Photonic generation for multichannel THz wireless communication[J]. Optics Express, 2014,22(19):23465-23472.
- [72] SHAMS H,SHAO T,FICE M J,et al. 100 Gb/s multicarrier THz wireless transmission system with high frequency stability based on a gain-switched laser comb source[J]. IEEE Photonics Journal, 2015,7(3):1-11.
- [73] YU X B,ASIF R,PIELS M,et al. 60 Gbit/s 400 GHz wireless transmission[C]// 2015 International Conference on Photonics in Switching(PS). Florence,Italy:IEEE, 2015:4-6.
- [74] LI X,YU J,ZHAO L,et al. 1-Tb/s photonics-aided vector millimeter-wave signal wireless delivery at D-band[C]// 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition(OFC). San Diego,CA,USA:IEEE, 2018:1-3.
- [75] GU L,TAN Z Y,WU Q Z,et al. 20 Mbps wireless communication demonstration using terahertz quantum devices[J]. Chinese Optics Letters, 2015,13(8):081402.
- [76] ZHANG Jiao,ZHU Min,LEI Mingzheng, et al. Real-time demonstration of 103.125 Gbps fiber-THz-fiber 2x2 MIMO transparent transmission at 360~430 GHz based on photonics[J]. Optics Letters, 2022,47(5):1214-1217.
- [77] ZHANG L,UDALCOVS A,LIN R,et al. Toward terabit digital radio over fiber systems:architecture and key technologies[J]. IEEE Communications Magazine, 2019,57(4):131-137.
- [78] 刘利平,营梦楠,陈艺戩. 太赫兹技术发展及其应用于6G的挑战分析[J]. 中兴通讯技术, 2021,27(2):17-24. (LIU Liping, JIAN Mengnan, CHEN Yijian. Development and challenges of terahertz technology for 6G applications[J]. ZTE Technology Journal, 2021,27(2):17-24.)

作者简介:

邓秋卓(2000-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为光子太赫兹通信.email:deng_qz_2000@163.com.

张鹿(1993-),男,博士,副研究员,博士生导师,主要研究方向为光子太赫兹通信与感知、光子AI计算、光通信与光网络.

张红旗(1996-),男,在读博士研究生,主要研究方向为光子太赫兹通信.

余显斌(1976-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为太赫兹光子学、光纤通信、毫米波/太赫兹技术及其应用.