

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.04.001

光子辅助太赫兹通信技术研究进展

李小军*, 王迪, 龚静文

(中国空间技术研究院西安分院空间微波技术国家级重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘要: 面对互联网时代呈指数增长的全球数据流量, 超高速通信的发展需求日益迫切, 太赫兹通信因拥有巨大的可用带宽资源, 成为下一代超高速无线通信关键技术之一。太赫兹通信系统分为电子学与光子辅助两种类型, 其中后者在通信速率、频率灵活调控、与光纤接入网无缝融合等方面具有独特优势。首先介绍了典型光子辅助太赫兹通信系统的基本原理, 在此基本原理框架下, 梳理了系统中信号生成与接收、多维复用以及概率整形等技术的研究进展, 并探讨了该类通信系统需要进一步解决的问题。

关键词: 光通信; 太赫兹通信; 光子辅助; 信号生成与处理; 多维复用; 概率整形

中图分类号: TN92 文献标识码: A 文章编号: 1007-5461(2023)04-00423-13

Research progress of photonics-assisted terahertz communications

LI Xiaojun*, WANG Di, GONG Jingwen

(National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology-Xi'an, Xi'an 710100, China)

Abstract: With the exponential growth of global data traffic in the internet era, the demand of ultra-high-speed communications is becoming increasingly urgent. Because of its huge available bandwidth resources, terahertz communication has become one of the key technical approaches for the next generation of ultra-high-speed wireless communications. Terahertz communication systems can be divided into two types: the systems based on electronics technology and those based on photonics-assisted technology. The latter has some unique advantages, such as high communication rate, flexible frequency tunability, and seamless integration with optical fiber access networks. The basic principles of typical photonics-assisted terahertz communication systems are introduced firstly. Then, under these basic principles, the research progresses of signal generation and reception, multi-dimensional multiplexing and probabilistic constellation shaping in the systems are reviewed. Finally, the developing problems need to be solved in the photonics-assisted terahertz communication system are discussed.

Key words: optical communication; terahertz communication; photonics-assisted; signal generation and reception; multi-dimensional multiplexing; probabilistic constellation shaping

基金项目: 科技部重点研发项目(2018YFB1801505), 重点实验室基金项目(6142411205205)

作者简介: 李小军(1971-), 陕西西安人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事卫星通信方面的研究。E-mail: lxjzhl@163.com

收稿日期: 2021-05-12; 修改日期: 2021-06-30

*通信作者。

0 引言

随着高比特率无线服务(例如6G无线通信)、超高清视频、海量数据无线下载等无线传输的需求不断增强,地面无线通信的数据速率向着超100 Gbit/s甚至1 Tbit/s的方向快速发展。此外,随着高分辨率天基对地观测系统空间分辨率的提升,未来空间各种侦察卫星、飞行器等数据传输速率需求将达到100 Gbit/s量级,更高速率的信息传输也是卫星通信的必然趋势^[1]。为了满足未来通信带宽需求,需要探索更高频的频率资源,例如毫米波/太赫兹无线通信和无线光通信^[2]。目前毫米波无线通信的通信速率已经达到10 Gbit/s以上,美国联邦通信委员会将28、37、39 GHz频段推荐为5G时代的毫米波工作频段^[3]。但是毫米波频段可用带宽最大为7~9 GHz,对于100 Gbit/s通信速率,需要11 bit/s/Hz以上的频谱效率,实现难度大。地面无线光通信通常是将红外光波作为信号的载波,大雾、尘土、大气湍流等恶劣环境下会导致红外光波衰减过大,直接影响其链路传输性能。太赫兹(THz)频段介于微波与红外光之间,拥有巨大带宽,相较于毫米波可以在较低频谱效率情况下实现超高的无线通信速率,其信号传输的方向性更好;相较于红外光通信,太赫兹波对云雾穿透力更强,可以在大风、沙尘和浓烟等恶劣环境下进行正常通信,具有更高的鲁棒性^[4]。日本NTT公司首次采用光子辅助技术在120 GHz的载频上实现了10 Gbit/s的数据传输^[5],推动了太赫兹无线通信系统及其相关器件的高速发展。

根据太赫兹信号的生成方法,将太赫兹通信系统分为电子学系统与光子辅助系统两类。其中电子学系统根据信号生成方式可分为混频产生和直接产生,前者具有高集成度和输出功率高的特点,后者输出频率范围更大但输出功率较低。光子辅助系统根据信号生成方式可分为光外差产生和直接产生,前者具有输出频率灵活可调谐和支持复杂的调制格式等优势但输出功率较低,后者输出功率更大、输出频率范围更大,但需要低温的工作环境。电子学系统的传输功率高,可支持远距离无线传输,但其倍频谐波干扰大、相噪高、频偏大,受电子学器件工作带宽、调制效率的影响,纯电子学的系统容量受限^[4]。光子辅助太赫兹无线通信典型系统采用电光调制器将基带信号调制到光载波上,再通过光学外差法产生太赫兹信号,可实现超高速的无线通信。此外光子辅助太赫兹无线通信系统结合光载射频(RoF)技术,能与现有的光纤网络无缝融合,共享城市基础设施,可大大降低网络升级的成本^[6]。

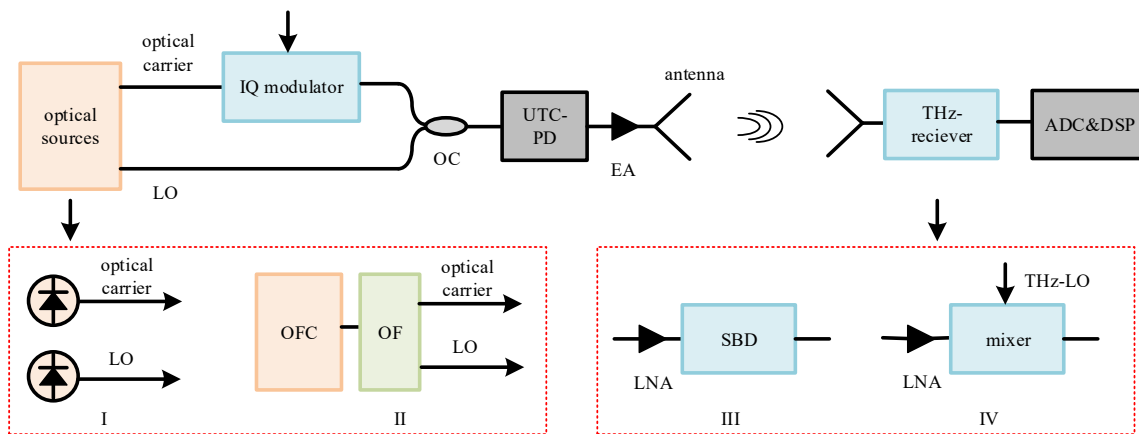
鉴于光子辅助太赫兹无线通信系统在通信速率、可与光纤接入网无缝融合等方面的优势,在未来无线通信中具有巨大发展潜力,本文着重总结分析了光子辅助太赫兹无线通信系统的研究动态。

1 光子辅助太赫兹无线通信系统基本原理

光子辅助太赫兹无线通信系统大多采用光子技术生成太赫兹矢量信号,经由太赫兹频段的天线进行自由空间信号的发射与接收,而接收采用纯电子技术处理方法。当前太赫兹信号的光子生成技术方案主要包括:(1)光学外差法,一般在THz频段的低频窗口中(1 THz以下)产生毫瓦级功率太赫兹信号;(2)太赫兹量

子级联激光器 (QCL), 可产生百毫瓦量级功率的太赫兹信号, 其频率覆盖 0.84 THz 到 5.2 THz, 但是一般需要在低温环境下工作 (目前最高温度为 210 K); (3) 光学非线性技术, 可在 THz 频段的低频窗口中 (远大于 1 THz) 产生毫瓦功率级的太赫兹信号, 但是所需要的非线性晶体的尺寸较大^[7]。其中光学外差法生成的太赫兹矢量信号频率调谐范围大, 能根据信道占用率和天气状况在各种大气窗口之间切换, 可在室温环境下工作, 所需器件尺寸较小, 是光子辅助 THz 无线通信系统研究的重点之一。

图 1 为光子辅助太赫兹无线通信系统原理示意图, 该方案以单行载流子光电二极管 (UTC-PD) 作为光电混频器, 将两个频率差为 THz 量级的光波下变频到 THz 频段。其中激光源可以采用如图 1(I) 所示的两个自由运转激光器; 或者如图 1(II) 所示, 采用光频梳 (OFC) 生成器结合光滤波器 (OF) 选出两个频率梳齿^[8-10]。前者产生的 THz 波的相位噪声和频率漂移会受到两束光的频率偏移影响, 需要采用数字处理技术补偿激光器频率波动对信号性能的影响; 后者光载波和光本振来源于同一光源, 所以相位噪声和频率稳定性优于前者, 但是由于光频梳中各梳齿的能量较弱, 需要加入额外的光放大器。在光学外差法中, 高速、高响应度的 UTC-PD 是扩展系统工作频段、提升发射功率的关键。UTC-PD 模块覆盖高达 THz 量级的宽频率范围^[11], 但是大响应带宽与高输出功率难以同时满足。针对这一问题科研人员提出了诸多优化方案, 例如清华大学研制出双漂移层结构 MUTC 探测器芯片, 实现 106 GHz 带宽和 7.3 dBm 的饱和输出功率^[12]。系统中的接收机可以采用直接探测技术, 即用肖特基势垒二极管 (SBD) 对太赫兹信号直接进行平方律包络检测 [(图 1(III))], 该方法结构简单易于实现, 消耗功率低且易于集成, 但同时灵敏度较低; 也可以利用混频器将太赫兹信号的频率降低到中频进行处理 [图 1(IV)], 其中本振信号与所接收的 THz 信号频率接近, 所以在太赫兹的外差接收机中通常会集成倍频器^[4], 混频接收机灵敏度较高且带宽更大, 但其消耗功率高且不利于集成。



LO: local oscillator; OC: optical coupler; UTC-PD: uni-travelling carrier photodiode; EA: electronic amplifier; ADC: analog-to-digital converter; DSP: digital signal processing; OFC: optical frequency comb; OF: optical filter; LNA: low noise amplifier; SBD: Schottky barrier diode

图 1 光子辅助太赫兹无线通信系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photonics-assisted terahertz wireless communication system

2 光子辅助太赫兹无线通信系统关键技术

太赫兹无线通信系统的关键技术包括太赫兹信号生成和功率放大技术、太赫兹信号接收检测技术、太赫兹调制解调技术和相关先进信号处理技术等。本文主要针对光子辅助太赫兹无线通信系统,梳理了光子相关的信号生成与接收、多维复用和概率整形技术的相关研究成果与进展。

2.1 光子辅助太赫兹矢量信号生成与接收技术

在光子辅助太赫兹无线通信系统的发射端,与光通信系统类似,首先采用电光调制器将基带数据调制到光载波上,后经过 UTC-PD 与光本振混频生成各种调制格式的太赫兹信号。电光调制器是其中的核心器件之一,常用的高速调制器是马赫曾德尔调制器 (MZM),由两个平行的相位调制器 (PM) 构成,光载波经过一个 3 dB 耦合器分光,两路光载波分别在一对相互平行的波导中传播,通过对上下两臂波导加电将基带数据调制到光载波上,两路光信号经 3 dB 耦合器合路干涉耦合后实现强度调制。采用 MZM 可以实现二元调制,如振幅键控 (ASK) 和二进制开关键控 (OOK)。由两个 MZM 和一个 PM 可以构成电光 IQ 调制器,两个 MZM 工作于推挽状态,其中一路经过 90° 相位偏转的相位调制器。光载波分别经过上下两路 MZM 调制上基带 I/Q 数据,可以实现多元正交调制,如 m 阶正交幅度调制 (QAM) 和 m 阶相移键控 (PSK) 调制,如图 2 所示。

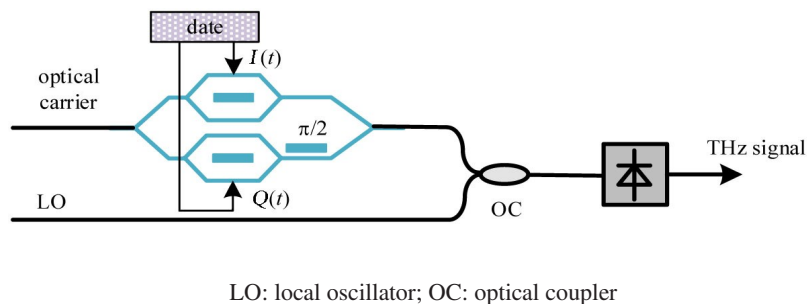


图2 基于电光调制的多调制格式 THz 信号生成方案

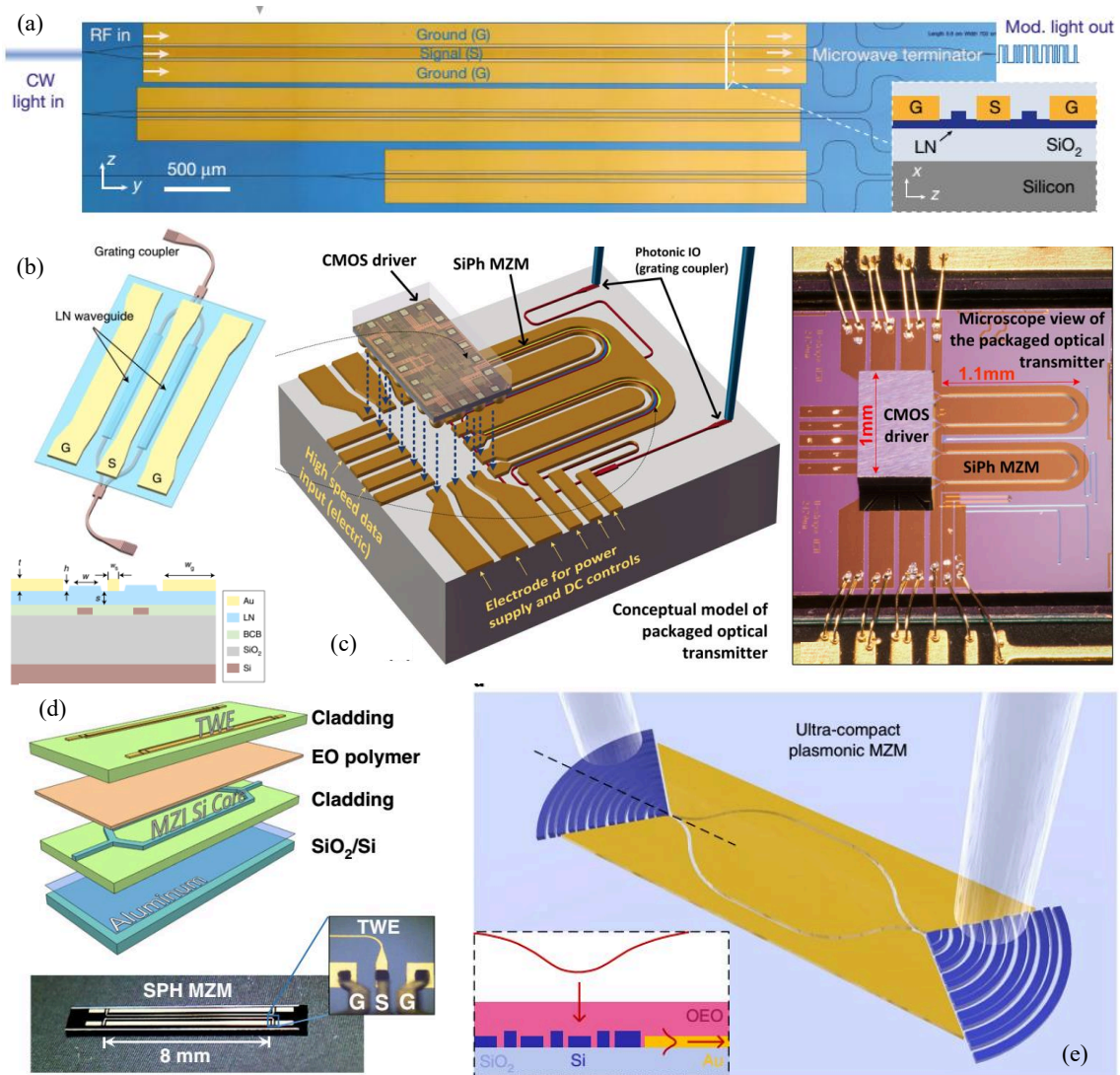
Fig. 2 THz signal with multi-modulation format generation scheme based on electro-optical modulation

目前,电光调制器发展相对成熟,调制速率可达几十甚至上百 Gbit/s。近年来,随着面向高速集成光通信/微波光子/光子辅助太赫兹技术的发展,超大电光调制带宽、低损耗、工作电压与互补金属氧化物半导体 (CMOS) 兼容的芯片级电光调制器成为研究焦点。2018~2020 年,国内外研究学者先后采用不同的材料研制出具有 CMOS 兼容驱动电压的单片集成铌酸锂电光调制器、硅基-铌酸锂薄膜调制器、U 型结构的耗尽型硅基调制器、硅基-电光聚合物调制器和超紧凑硅基-等离子体高速电光调制器等,如图 3 所示。这些调制器可支持高达 100 Gbit/s 甚至 200 Gbit/s 的数据速率^[13-17]。它们的具体性能参数与特性如表 1 所示。新型高速集成调制器应满足高集成度、低损耗、大带宽、大消光比、驱动电压与 CMOS 兼容等。由于所用材料的固有局限性,集成调制器平台尚不能同时满足这些要求。这些材料各自具有独特优势,例如,与标准 CMOS 工艺兼容 (硅)、低驱动电压 (聚合物、铌酸锂薄膜)、超高带宽 (聚合物、等离子体) 和小尺寸 (硅、等离子体)。

太赫兹通信接收处理方法有多种类型。由于受电光调制器工作带宽限制,大多数演示系统采用纯电接收处理技术,其中对于二元调制,以采用 SBD 进行非相干解调的方式为主;对于多元正交调制,采用 SBD 混

频实现外差相干解调。但是电子接收机工作频率的调谐性无法与光子辅助发射机相匹配, 限制了整个通信系统的灵活性, 而光子辅助太赫兹接收技术可以克服这一限制。

2018 年, 伦敦大学学院首次提出将 UTC-PD 用作电光混频器, 两路光信号通过透镜光纤耦合到 UTC-PD 生成光外差拍频信号 (作为本振信号), 射频 (RF) 信号和直流 (DC) 电压偏置通过共面探头提供给 UTC-PD, 如图 4(a) 所示, 最终由 UTC-PD 输出 RF 与光外差拍频信号的下变频信号。该团队分别在 35.1 GHz 和 60 GHz 的无线通信链路中对此接收技术进行了实验验证^[18,19]。



LN: lithium niobate; CMOS: complementary metal-oxide-semiconductor; SPH: silicon-polymer hybrid

图 3 几种新型高速集成电光调制器。(a) 单片集成铌酸锂电光调制器^[13]; (b) 硅基-铌酸锂聚合物马赫曾德尔调制器^[14];

(c) U 型结构的耗尽型硅基调制器^[15]; (d) 硅基-电光聚合物调制器^[16]; (e) 超紧凑硅基-等离子体高速电光调制器^[17]

Fig. 3 Several new high-speed integrated electro-optical modulators. (a) Integrated lithium niobate electro-optic modulator^[13];

(b) Hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators^[14]; (c) U-shaped silicon photonics carrier depletion modulator^[15]; (d)

Silicon-polymer hybrid modulator^[16]; (e) Ultra-compact silicon-electronic plasmonic high-speed modulator^[17]

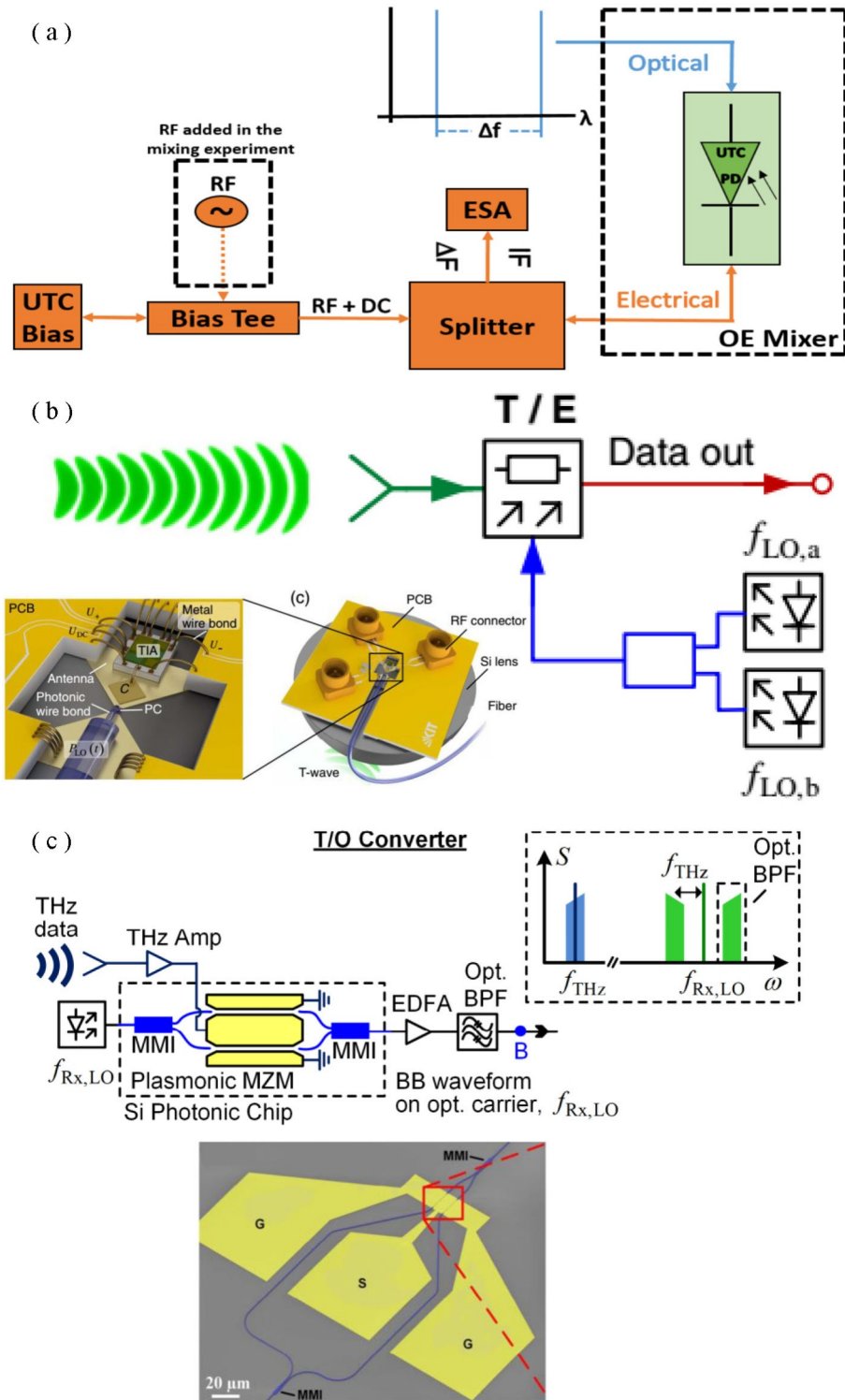
上述实验是在毫米波频段完成的,卡尔斯鲁厄理工学院的学者用光电导体替换了UTC-PD,将这种思想拓展到THz频段^[20]。如图4(b)所示,天线馈电点连接到光电导体,同时光电导体受到频率差与THz信号频率接近的两束光本振辐照,输出信号经过跨阻放大器(TIA)等后端电路滤出拍频后的中频(IF)信号。该团队采用此接收机搭建了毫米波/太赫兹无线通信系统,演示了其在3~340 GHz频率范围内的通信能力,并进一步展示了其在287 GHz至325 GHz频段内,对多达20个载波的多信道信号的生成、传输和接收处理能力。

随着新型电光材料的发展,科研人员发现有机电光材料与超紧凑型等离子体波导相结合的方式可以克服调制器的带宽限制,其带宽理论上可达1 THz以上,并基于此原理研制出等离子体-有机混合(POH)调制器^[21,22]。2019年,卡尔斯鲁厄理工学院首次采用基于超宽带硅基-等离子体调制器(3 dB带宽超过360 GHz)将载频为288.5 GHz的太赫兹波转换到光域,选择其中一个调制边带输入到内置光学本振的光学调制分析仪直接对光矢量信号进行相干解调和评估,如图4(c)所示。该接收机实验演示了对经过16 m空间无线传输、调制速率为50 Gbit/s的太赫兹正交相移键控(QPSK)信号的解调,误码率(BER)为 1.1×10^{-2} ^[23]。

表1 几种新型高速集成电光调制器的性能对比

Table 1 Performance comparison of several new high-speed integrated electro-optical modulators

序号	工艺技术	技术指标	优点	缺点	参考文献
1	绝缘体上铌酸锂(LNOI)+马赫曾德干涉仪(MZI)结构	当臂长为20 mm时,3 dB带宽为40 GHz,半波电压为1.5 V,芯片损耗小于0.5 dB,消光比为30 dB,调制速率210 Gbit/s (8ASK)。	超高速调制、低驱动电压、低损耗、高消光比	与标准CMOS工艺不兼容	[13]
2	绝缘体上硅(SOI)+薄膜铌酸锂+混合集成+MZI结构	当臂长为5 mm时,3 dB带宽大于70 GHz,半波电压为5.1 V,总插入损耗为2.5 dB,消光比大于40 dB,调制速率为112 Gbit/s (PAM4)			[14]
3	U型结构+耗尽型硅基调制器	调制效率(半波电压与长度乘积) $1.5 \text{ V} \cdot \text{cm}$,芯片损耗为6.9 dB,臂长2.47 mm,调制速率为112 Gbit/s (OOK)	尺寸小、与标准CMOS工艺兼容	硅光调制器的非线性可能会导致高级调制格式时出现信号失真	[15]
4	SOI+聚合物混合集成+MZI结构	3 dB带宽为68 GHz,半波电压为1.8 V,波导传输损耗0.22 dB/mm,长度8 mm,调制效率110 Gbit/s (OOK), 200 Gbit/s (PAM4)	大带宽、低驱动电压、低损耗	与标准CMOS工艺不兼容	[16]
5	SOI+等离子体混合集成+MZI结构	调制效率(半波电压与长度积)为 $240 \text{ V} \cdot \mu\text{m}$,插入损耗为27 dB,消光比为10 dB,调制速率为100 Gbit/s (OOK)	超大带宽、尺寸小	驱动电压较大、损耗大、与标准CMOS工艺不兼容	[17]



ESA: electronic spectrum analyzer; MMI: multimode interference; BPF: bandpass filter

图4 光学辅助THz外差接收技术。(a) 基于UTC-PD混频^[18];(b) 基于光电导体混频^[20];(c) 基于POH调制器电光调制^[23]

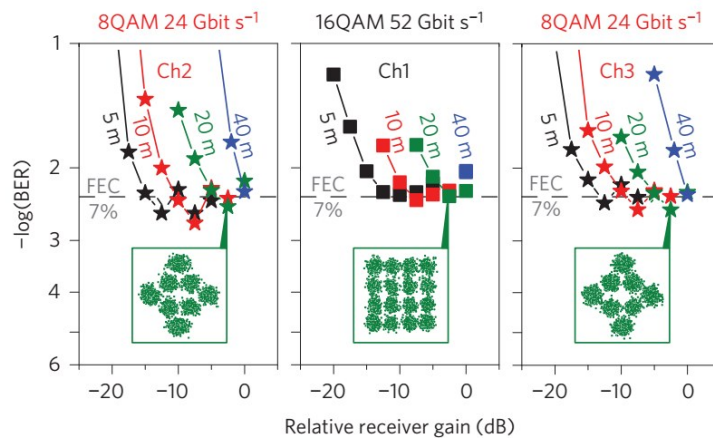
Fig. 4 Photonics-assisted THz heterodyne receiving technology. (a) Mixing based on UTC-PD^[18]; (b) Mixing based on photoconductor^[20]; (c) Electro-optical modulation based on POH modulator^[23]

2.2 光子辅助太赫兹无线通信复用技术

为了更好地推动光子辅助太赫兹无线通信系统的应用,需要增大通信容量和传输距离。光子辅助太赫兹无线通信系统汇集了光子技术和电子技术的优势,可利用光通信中光偏振复用技术(PDM)和光波分复用技术(WDM),以及无线电中的多入多出(MIMO)技术和天线极化复用技术(APM)等独立或者组合的方式,提高整个光子辅助太赫兹无线通信系统的通信容量和传输距离。

2.2.1 光波分复用技术

图1展示了光学外差生成单载频的太赫兹矢量信号的方法。采用多个激光器或者光频梳进行调制,即可将光通信系统中的波分复用技术引入到光子辅助太赫兹无线通信系统中,以增加系统通信容量。2013年卡尔斯鲁厄理工学院、弗劳恩霍夫应用固体物理研究所联合斯图加特大学等机构采用锁模激光器选择三个光载波通道调制不同格式的信号,以273.5 GHz频段的THz载频信号在20 m自由空间内传输,实现了高达100 Gbit/s的传输速率,其实验结果如图5所示^[24]。



QAM: quadrature amplitude modulation; BER: bit error ratio; FEC: forward error correction

图5 基于光波分复用技术太赫兹无线通信系统的典型实验结果^[24]

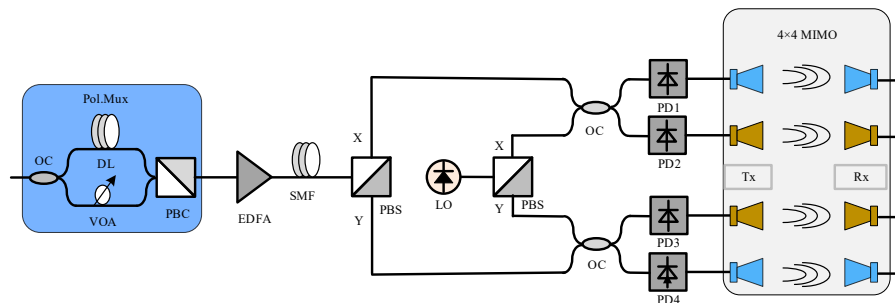
Fig. 5 Typical experimental results of terahertz wireless communication system based on optical wavelength division multiplexing technology^[24]

2015年,伦敦大学学院采用外部注入的增益切换光学梳状光源,实现四通道多载波THz信号产生,以12.5 Gbaud的QPSK信号进行调制,系统整体数据速率达到100 Gbit/s^[25]。随后,丹麦技术大学演示了一种实时光子辅助太赫兹无线通信系统,该系统工作在400 GHz载频上,在四个间隔为12.5 GHz超密集波分复用光载波上总共可加载高达60 Gbit/s的Nyquist-QPSK信号^[26]。

2.2.2 光偏振复用技术

在基于RoF技术的太赫兹通信系统中,采用光偏振复用技术可在一根光纤中传输两路正交偏振复用信号以提升频谱效率,进而提高通信系统容量。典型的光偏振复用系统如图6所示,一般包含偏振复用器和偏振解复用器,利用偏振复用器(Pol.Mux)实现两路偏振光正交复用。保偏光耦合器(OC)将光信号分成两路保偏光,其中上支路经过可变光延迟线(DL)实现两路光信号的解相关,下支路经过可变光衰减器(VOA)以

平衡两个光路功率。偏振解复用器一般利用保偏分束器 (PBS) 将偏振复用光信号解复用, 分为两路偏振正交的光信号, 通过两个高速探测器分别得到两路正交偏振的信号, 最后通过两对收发天线实现太赫兹信号无线传输。2015年复旦大学研究团队利用两路偏振光实现 W 波段信号生成与传输, 其传输速率为 16 Gbit/s^[27]。



OC: optical coupler; DL: delay line; Pol.Mux: polarization multiplexing; VOA: variable optical attenuator; PBC: polarization beam coupler; EDFA: erbium doped fiber application amplifier; SMF: single mode fiber; LO: local oscillator; PD: photodiode;

MIMO: multiple-input multiple-output

图6 基于PDM、APM和MIMO技术的W波段无线信号传输系统

Fig. 6 W-band wireless signal transmission system based on PDM, APM and MIMO

2.2.3 空间复用技术

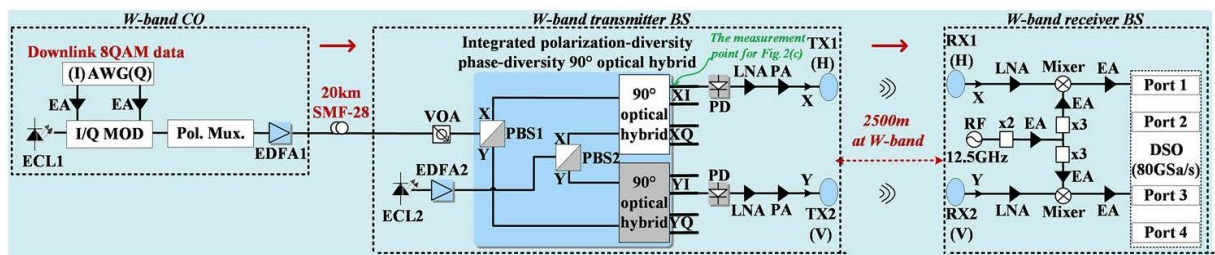
利用 MIMO 天线阵列进行多路太赫兹无线传输可以有效提升系统通信容量, 一种方案是每个阵列天线发射调制不同数据信息的信号, 2014年复旦大学同一团队采用 4×4 MIMO 技术实现了 4 路 W 波段无线信号传输, 其传输速率可达 432 Gbit/s, 但传输距离仅 2 m^[28]。2017年同一团队采用 2×2 MIMO 技术实现了传输速率为 51.2 Gbit/s 的 W 波段无线传输, 其传输距离可达 40 m^[29]。另一种方案为每个阵列天线发射调制相同数据信息的信号, 可以大幅增强信号的功率以及抗干扰能力, 从而延长信号传输距离。此外, 还可以通过增加基带调制阶数以提高传输更高速率的信号^[30]。2011年, 日本东京工业大学提出利用天线阵列波束赋形得到高增益单指向的波束, 能将传输速率为 50 Gbit/s 的太赫兹波输出功率提升 42 dBi, 大大提升了系统的传输距离^[31]。2015年中国移动通信研究院提出利用 $N \times M$ 对有源天线进行空间复用, 实现了多用户信道通信以提高通信容量, 同时采用信道估计误差最小化方法来提高系统通信质量^[32]。

2.2.4 天线极化复用技术

采用 MIMO 阵列天线进行太赫兹信号发射和接收时, 天线中可能会发生无线串扰, 且随着无线传输距离的增加而变得更加严重, 可采用多组正交极化天线对来降低串扰。因两个正交极化天线间存在较大的极化隔离 (超过 33 dB) 以及较高的方向性, 因此每个接收天线只能从相应的发射天线获取无线信号, 有效地抑制了无线串扰, 可以提升系统通信容量, 有效提高太赫兹信号的无线传输距离^[33]。天线极化复用太赫兹通信系统一般采用一对正交极化复用的收发天线。收发正交极化复用的太赫兹波天线可以是如图6所示的喇叭天线, 也可以是平面天线和抛物面天线。2017年, 日本东京工业大学在 500 GHz 载频处利用两对正交极化平面天线实现 28 Gbit/s 数据速率的无线传输^[34]。2017年英国伦敦大学玛丽女王学院和北京邮电大学联合研制了一种高增益偏置抛物面反射器天线, 通过前后两个发射器发射出两束正交极化的频率为 300 GHz 的太赫兹波, 可以在不增加系统带宽的情况下实现两倍的数据速率^[35]。

2.2.5 多维复用技术

采用多维复用技术,并选择合适的信号调制方式,可进一步提高系统性能。2017年复旦大学开发了如图7所示无线信号传输系统,该系统集合了PDM、APM和具有大功率卡塞格伦天线的 2×2 MIMO等复用技术,并且在结合MQAM调制提升频谱效率的同时,还利用了具有预失真和决策定向最小均方均衡功能的高级数字信号处理,最终在W波段实现了传输速率为54 Gbit/s的双向光子辅助光纤无线传输,其传输距离可达2500 m^[36]。2018年,该课题组将WDM、PDM和MIMO技术结合,构建了工作频段为375~500 GHz的太赫兹无线通信系统,利用6个频率间隔为25 GHz的半导体激光器提供多个光载波,采用5 Gbaud的QPSK调制信号实现了142 cm距离内的120 Gbit/s的数据传输^[37]。此外,轨道角动量模式(OAM)复用技术也被引入到光子辅助太赫兹通信系统中,如南加州大学Zhou等^[38]采用两个太赫兹频率、两个偏振态和两个OAM模态构成了8路数据通道,实现80 Gbit/s数据速率的传送。



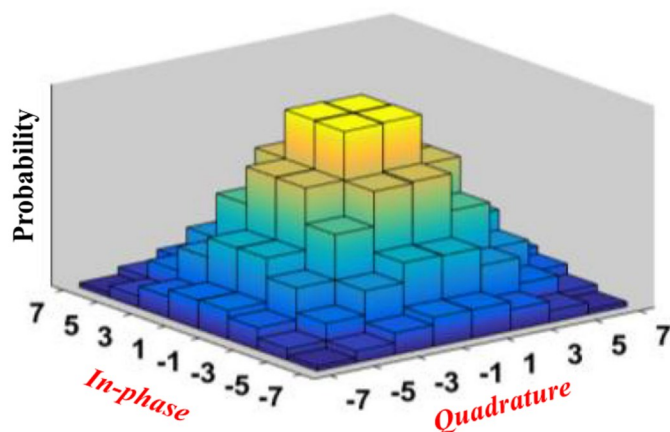
CO: central office; BS: base station; AWG: arbitrary waveform generator; EA: electronic amplifier; ECL: external cavity laser; MOD: modulator; Pol.Mux: polarization multiplexing; EDFA: erbium doped fiber application amplifier; VOA: variable optical attenuator; PD: photodiode; LNA: low noise amplifier; PA: power amplifier; DSO: digital storage oscilloscope

图7 基于WDM、PDM、APM和MIMO技术的无线信号传输系统^[36]

Fig. 7 Wireless signal transmission system based on WDM, PDM, APM and MIMO^[36]

2.3 光子辅助太赫兹无线通信中的概率整形技术

为了提高通信速率,通常采用高阶调制,但是调制阶数的提升会导致系统误码率的上升。近年来越来越多的学者开始研究概率整形技术,其基本原理是重新整形分配星座点的概率,即能量低的星座点获得更高的发送概率,而能量高的星座点将减小发送概率,其发送概率一般遵循麦克斯韦-玻尔兹曼分布,如图8所示^[39]。使用概率整形技术可以减少每个符号的有效位数,从而降低有效传输比特率,提升光网络的传输容量。光子辅助太赫兹无线通信系统发射前端与光通信发射机类似,因此概率整形技术也可以有效提升该系统灵敏度,弥补远距离无线传输时系统信噪比不足以支持高阶调制格式的问题^[4]。复旦大学和浙江大学两个团队将概率整形技术应用于光子辅助太赫兹无线通信系统中,并搭建了演示系统进行验证^[2,40-42]。2018年,Wang等^[40]在450 GHz的太赫兹波段使用经过整形的16进制正交幅度调制(PS-16QAM)信号,在1.42 m内实现了32 Gbit/s数据传输,在BER为 2.0×10^{-2} 的SD-FEC阈值下,概率整形技术将系统灵敏度提高大约1 dB,结果证明了概率整形技术可以有效改善THz频段无线系统中的BER性能。此外,Jia等^[42]采用概率整形的64进制正交幅度调制的正交频分复用调制格式与正交极化双天线结合的方案,搭建了高传输速率光子辅助太赫兹无线通信演示系统,系统总速率达612.65 Gbit/s,每个天线的平均净频谱效率为4.445 bit/s/Hz。

图8 概率整形信号概率分布图^[39]Fig. 8 Probability distribution diagram of signal after probability constellation shaping^[39]

3 结 论

经过近20年的发展,光子辅助太赫兹无线通信系统在电光调制、光子辅助接收、光学和无线电多维复用以及概率整形等技术方面得到了深入研究。总结分析了太赫兹信号生成及接收处理的类型及其关键技术,详细分析了光子辅助太赫兹无线通信复用技术的类型及性能。技术成果展现了光子辅助太赫兹无线通信系统在通信速率、频率灵活调控方面的优势。但与工程应用需求相比,目前还存在一些不足:

(1) 太赫兹信号发射功率偏小: 目前 UTC-PD 在 300 GHz 输出只有 1 mW, 在 1 THz 输出只有几 μW , 为了提高通信距离, 需要从激光器发射功率、调制器耐受射频功率、探测器输入功率阈值及响应度等方面开展深入研究工作;

(2) 光子辅助太赫兹通信系统集成度低: 光子器件(如激光器、UTC-PD、调制器等)均为分立部件,系统体积较为庞大。为了提升系统集成度,科研人员已进行了初步探索,后续仍需要进一步开展光电集成技术研究,提升系统的光子和光电集成度。

(3) 光子辅助技术会引起信噪比劣化: 系统采用的激光器、探测器等光电器件会引入额外的相对强度噪声、散弹噪声,电光调制解调会引入较大的链路损耗,从而造成系统信噪比恶化。

针对这些不足,后续还需要采用电子学系统中的高增益/大功率放大器、阵列式天线、太赫兹信号处理等技术,进一步促进系统传输距离、通信速率、可靠性和小型化等性能提升,推动太赫兹通信技术的发展应用。

参考文献:

- [1] Lei H W, Wang H, Yang X, *et al.* Analysis and progress of terahertz techniques applied in space science [J]. *Space Electronic Technology*, 2017, 14(2): 1-7, 12.
雷红文, 王虎, 杨旭, 等. 太赫兹技术空间应用进展分析与展望 [J]. *空间电子技术*, 2017, 14(2): 1-7, 12.
- [2] Wang S W, Lu Z J, Li W, *et al.* 26.8-m THz wireless transmission of probabilistic shaping 16-QAM-OFDM signals [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(5): 056105.
- [3] Federal Communication Commission. Report and order and future notice of proposed rulemaking [OL]. <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-22-50A1.pdf>.

- [4] Li W. *High-speed Photonic Terahertz Wireless Communication System Assisted by Probabilistic Shaping* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
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.
- [5] Kukutsu N, Hirata A, Kosugi T, *et al.* 10-Gbit/s wireless transmission systems using 120-GHz-band photodiode and MMIC technologies [C]. *Annual IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium*. Greensboro, USA, IEEE, 2009: 1-4.
- [6] Kanno A, Dat P T, Sekine N, *et al.* Seamless fiber-wireless bridge in the millimeter- and terahertz-wave bands [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(20): 4794-4801.
- [7] Zhang L, Pang X D, Jia S, *et al.* Beyond 100 Gb/s optoelectronic terahertz communications: Key technologies and directions [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(11): 34-40.
- [8] Shams H, Fice M J, Balakier K, *et al.* Photonic generation for multichannel THz wireless communication [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 23465-23472.
- [9] Yu X, Jia S, Hu H, *et al.* 160 Gbit/s photonics wireless transmission in the 300-500 GHz band [J]. *APL Photonics*, 2016, 1(8): 081301.
- [10] Yu J G, Li K L, Chen Y X, *et al.* Terahertz-wave generation based on optical frequency comb and single Mach-Zehnder modulator [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(1): 1-8.
- [11] Ishibashi T, Ito H. Uni-traveling carrier photodiodes: Development and prospects [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(2: Optical Detectors): 1-6.
- [12] Xiong B, Chao E F, Luo Y, *et al.* Research on ultra-wideband and high saturation power uni-traveling carrier photodetectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20211052.
熊兵, 晁恩飞, 罗毅, 等. 超宽带高饱和单行载流子光探测器研究 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(7): 20211052.
- [13] Wang C, Zhang M, Chen X, *et al.* Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages [J]. *Nature*, 2018, 562(7725): 101-104.
- [14] He M B, Xu M Y, Ren Y X, *et al.* High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit s⁻¹ and beyond [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(5): 359-364.
- [15] Li K, Liu S H, Thomson D J, *et al.* Electronic-photonics convergence for silicon photonics transmitters beyond 100 Gbps on-off keying [J]. *Optica*, 2020, 7(11): 1514-1516.
- [16] Lu G W, Hong J X, Qiu F, *et al.* High-temperature-resistant silicon-polymer hybrid modulator operating at up to 200 Gbit s⁻¹ for energy-efficient datacentres and harsh-environment applications [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4224.
- [17] Koch U, Uhl C, Hettrich H, *et al.* A monolithic bipolar CMOS electronic-plasmonic high-speed transmitter [J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(6): 338-345.
- [18] Mohammad A W, Shams H, Balakier K, *et al.* 5 Gbps wireless transmission link with an optically pumped uni-traveling carrier photodiode mixer at the receiver [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2884-2890.
- [19] Mohammad A W, Shams H, Liu C P, *et al.* 60-GHz transmission link using uni-traveling carrier photodiodes at the transmitter and the receiver [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4507-4513.
- [20] Harter T, Ummethala S, Blaicher M, *et al.* Wireless THz link with optoelectronic transmitter and receiver [J]. *Optica*, 2019, 6(8): 1063-1070.
- [21] Haffner C, Heni W, Fedoryshyn Y, *et al.* All-plasmonic Mach-Zehnder modulator enabling optical high-speed communication at the microscale [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(8): 525-528.
- [22] Haffner C, Chelladurai D, Fedoryshyn Y, *et al.* Low-loss plasmon-assisted electro-optic modulator [J]. *Nature*, 2018, 556(7702): 483-486.
- [23] Ummethala S, Harter T, Koehnle K, *et al.* THz-to-optical conversion in wireless communications using an ultra-broadband plasmonic modulator [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(8): 519-524.
- [24] Koenig S, Lopez-Diaz D, Antes J, *et al.* Wireless sub-THz communication system with high data rate [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(12): 977-981.

- [25] 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.
- [26] Yu X B, Asif R, Piels M, *et al.* 60 Gbit/s 400 GHz wireless transmission [C]. *International Conference on Photonics in Switching*. Florence, Italy, IEEE, 2015: 4-6.
- [27] Li X Y, Yu J J, Xiao J N, *et al.* W-band PDM-QPSK vector signal generation by MZM-based photonic frequency octupling and precoding [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 1-6.
- [28] Yu J J, Li X Y, Zhang J W, *et al.* 432-Gb/s PDM-16QAM signal wireless delivery at W-band using optical and antenna polarization multiplexing [C]. *The European Conference on Optical Communication*. Cannes, France, IEEE, 2014: 1-3.
- [29] Wang K H, Yu J J. Transmission of 51.2 Gb/s 16 QAM single carrier signal in a MIMO radio-over-fiber system at W-band [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, 59(11): 2870-2874.
- [30] Akyildiz I F, Jornet J M, Han C. TeraNets: Ultra-broadband communication networks in the terahertz band [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(4): 130-135.
- [31] Oshima N, Hashimoto K, Suzuki S, *et al.* Wireless data transmission of 34 Gbit/s at a 500-GHz range using resonant-tunnelling-diode terahertz oscillator [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(22): 1897-1898.
- [32] Han S F, Chih-lin I, Xu Z K, *et al.* Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(1): 186-194.
- [33] Li X Y, Yu J J, Chi N, *et al.* Antenna polarization diversity for high-speed polarization multiplexing wireless signal delivery at W-band [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1169-1172.
- [34] Oshima N, Hashimoto K, Suzuki S, *et al.* Terahertz wireless data transmission with frequency and polarization division multiplexing using resonant-tunneling-diode oscillators [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017, 7(5): 593-598.
- [35] Shu C, Hu S Q, Yao Y, *et al.* A high-gain antenna with polarization-division multiplexing for terahertz wireless communications [C]. *43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. Nagoya, Japan, IEEE, 2018: 1-2.
- [36] Li X Y, Yu J J, Wang K H, *et al.* Bidirectional delivery of 54-Gbps 8QAM W-band signal and 32-Gbps 16QAM K-band signal over 20-km SMF-28 and 2500-m wireless distance [C]. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*. Los Angeles, USA, IEEE, 2017: 1-3.
- [37] Li X Y, Yu J J, Wang K H, *et al.* 120 Gb/s wireless terahertz-wave signal delivery by 375 GHz-500 GHz multi-carrier in a 2×2 MIMO system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 606-611.
- [38] Zhou H B, Su X Z, Minoofar A, *et al.* Utilizing multiplexing of structured THz beams carrying orbital-angular-momentum for high-capacity communications [J]. *Optics Express*, 2022, 30(14): 25418-25432.
- [39] Li X Y, Yu J J, Chang G K. Photonics-aided millimeter-wave technologies for extreme mobile broadband communications in 5G [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 366-378.
- [40] Wang K H, Li X Y, Kong M, *et al.* Probabilistically shaped 16QAM signal transmission in a photonics-aided wireless terahertz-wave system [C]. *Optical Fiber Communications Conference and Exposition*. San Diego, USA, IEEE, 2018: 1-3.
- [41] Li X Y, Yu J J, Zhao L, *et al.* 1-Tb/s millimeter-wave signal wireless delivery at D-band [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(1): 196-204.
- [42] Jia S, Zhang L, Wang S W, *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.