

文章编号: 2095-4980(2024)06-0665-06

全电子的 300 GHz 太赫兹无线通信

田 鹏, 韩 扬, 王明旭, 谭景文, 徐思聪, 张 冰, 魏 怡, 杨雄伟, 李韦萍, 张 尧, 余建军

(复旦大学 信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘 要: 太赫兹波作为一种新的高频段资源, 有着更高的载波频率, 可以承受更大的带宽和传输速率, 成为新一代宽带通信中的研究热点。本文基于纯电子学器件成功搭建 300 GHz 的太赫兹无线通信系统, 其发射机结构简单, 复杂度相比光子辅助系统更低。进行了无线距离 50 m 和 100 m 的信号传输实验, 对系统的传输性能进行了实验探究, 验证了传输性能和传输速率、发送电压之间的关系。目前, 在不使用功率放大器(PA)的情况下, 100 m 是全电子太赫兹无线传输系统能达到的最远距离。

关键词: 太赫兹; 无线通信; 离散多音调制; 全电子; 正交频分复用技术; 前向纠错

中图分类号: TN928

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023387

Demonstration of 300 GHz all-electronic terahertz wireless communications

TIAN Peng, HAN Yang, WANG Mingxu, TAN Jingwen, XU Sicong, ZHANG Bing, WEI Yi, YANG Xiongwei, LI Weiping, ZHANG Yao, YU Jianjun

(School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: As a new type of high-frequency band resource, terahertz wave has a higher carrier frequency, it can withstand larger bandwidth and transmission rate, therefore, it has become a research hotspot for new generation broadband communications. A 300 GHz terahertz wireless communication system is constructed based on pure electronic devices, in which the transmitter has a simple structure and the whole system is less complex than the photon-assisted system. Signal transmission experiments with wireless distances of 50 m and 100 m are conducted. The transmission performance of the system is explored and the relationships among the transmission performance, transmission rate and transmitting voltage are studied. As far as we know, 100 m is the longest distance that an all-electronic terahertz wireless transmission system can achieve without using a Power Amplifier(PA).

Keywords: terahertz; wireless communications; discrete multitone modulation; all-electronic; Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM); Forward Error Correction(FEC)

信息爆炸时代, 人们对宽带通信的依赖达到前所未有的程度。随着信号传输速率的提高, 其所需的频带宽度也随之增加。这意味着需要更多的频谱资源来支持日益增长的通信需求。无线通信技术的不断进步和创新正在努力满足这一需求。一种解决方案是通过先进的调制方案和信号处理技术来提高频谱效率。另一种解决方案是使用更高载波频率来增加信道带宽, 以提供足够的传输容量^[1]。而现有低频段频谱资源已趋于饱和, 处于更高频段的太赫兹无疑具有极大的应用前景。太赫兹波的频率范围为 0.1~10 THz, 波长介于 3 mm~30 μ m 之间, 位于微波和远红外光之间。太赫兹频段的长波段与毫米波有部分重叠, 而短波段与红外光有部分重叠, 可以看作是宏观经典理论与微观量子理论之间的过渡区域^[2]。与微波频段相比, 太赫兹的带宽更大, 能满足更高的比特率传输, 因而信息传输容量更高; 同时载波频率高, 意味着有效穿透能力更强; 波长短, 天线等器件的设计孔径更小, 易于器件小型化。另外, 与激光通信相比, 太赫兹的波束宽度适中, 对传输平台稳定性和跟瞄要求较低。且大气对太赫兹频段的吸收较强, 有利于实现空间保密通信^[3]。

目前太赫兹通信系统主要有 2 类典型的收发架构, 包括基于全电子混频调制的太赫兹系统和基于光子辅助的

收稿日期: 2023-11-21; 修回日期: 2024-01-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61935005; 61835002; 62305067; 62375219; 62331004)

太赫兹系统^[4]。太赫兹光子辅助系统能更方便地与光纤有线设施结合起来,实现光载无线技术(Radio over Fiber, RoF)^[5],目前为止全固态电子混合方法在发射功率和带宽方面均优于光子辅助系统^[6]。大部分太赫兹传输实验均是使用光子辅助技术在视距情况下进行的,无线传输距离较短,同时对功率放大器(PA)的需求较高^[7-16]。文献[17]演示了复旦大学太赫兹传输距离达 850 m,这是已知最远的光子辅助太赫兹传输距离。本实验采用纯电子学器件构成的太赫兹系统,其优点在于发射机结构简单,复杂度相比光子辅助系统更低。

1 理论分析与链路预算

Friis 自由空间传播模型可用于预测视距传输中接收信号的强度^[4]。令 d (单位: m)表示自由空间中发射天线与接收天线之间的距离。假设发射天线是全向的理想天线,则接收点的信号功率为:

$$P = \frac{P_T}{4\pi d^2} \quad (1)$$

式中 P_T 为发射功率,考虑到发射天线的有向增益 G_T 和接收天线的有效孔径 A_R 以及大气损耗 L_{am} ,式(1)变为:

$$P_R = \frac{P_T}{4\pi d^2} G_T A_R L_{am} \quad (2)$$

式中 P_R 为接收功率,一般天线的有效孔径和天线增益的关系如下:

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R \quad (3)$$

式中: λ 为信号波长; G_R 为接收天线的增益。将式(3)代入式(2),得到:

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R L_{am} \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (4)$$

将单位换成 dBm,使用对数模型:

$$P_R = P_T + G_T + G_R + L_{am} - L_{FSP} \quad (5)$$

其中,太赫兹频段大气损耗大约在 10 dB/km。由表 1 可知,在 50 m 的短距离太赫兹传输系统中,大气损耗的影响很小。依据式(4),可推导得到自由空间路径损耗(Free Space Path Loss, FSPL):

$$L_{FSP} = 20 \lg \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (6)$$

表 1 50 m 和 100 m 链路预算
Table 1 50 m and 100 m link budget

parameter	value
transmitter power/dBm	-8
transmitting antenna gain/dBi	25
transmitting lenses gain/dB	12
free space path loss/dB	116/122
atmospheric loss/dB	0.5/1.0
receiving antenna gain/dB	25
receiving lenses gain/dB	30
receiver power/dBm	-32.5

2 太赫兹全电子无线通信系统

本实验中所搭建的太赫兹纯电传输系统的结构如图 1 所示。在发射端,首先由一个 12.5 GHz 的本地振荡器(Local Oscillator, LO)经过 24 倍上变频的倍频器生成 300 GHz 的射频信号,接着把 Matlab 离线产生的发射数据载入输出波特率范围在 0~12 GHz 的任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)中,由其产生所需要的模拟信号,完成数字信号到模拟信号的转换,之后携带了调制信息的信号经过上变频的射频信号相互拍频产生 300 GHz 的太赫兹信号。

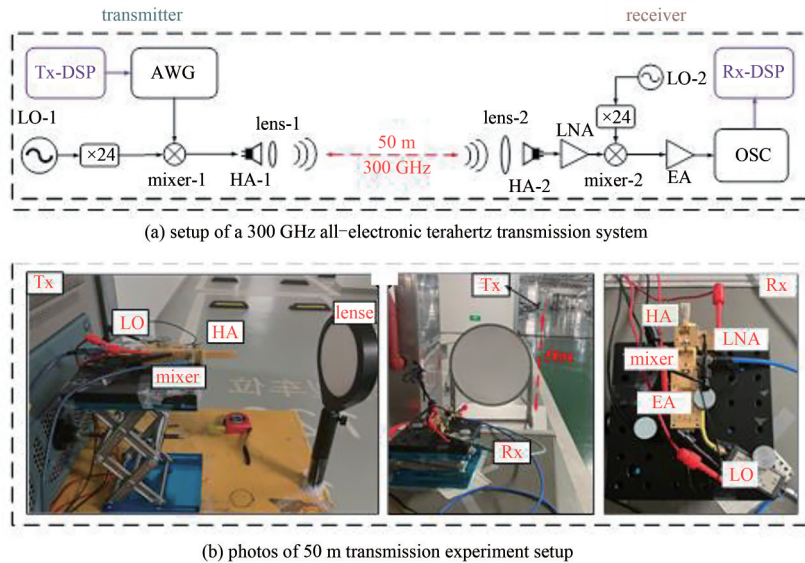


Fig.1 System architecture and experimental photos
图1 系统架构和实验照片

实验中传输了由 Matlab 离线产生的 DFTs(Discrete Fourier Transforms) –DMT(Discrete Multi-Tone) –QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 信号和 DFTs–DMT–16QAM(16-Quadrature Amplitude Modulation)信号。图 2 展示发送端和接收端离线数字信号处理(Digital Signal Processor, DSP)具体过程。发送数据通过星座点调制产生正交振幅调制(QAM)信号,串并转换后进行离散傅里叶变换(DFT)扩频。扩频后的信号进行归一化,插入导频,每个离散多音调制(DMT)符号中有 400 个子载波携带了正交相移键控(QPSK)或 16 阶正交幅度调制信号(16QAM),同时有 4 个子载波作为导频等间隔均匀插入到有效子载波中,另外将余下的子载波设为 0 以起到直流偏置和过采样的作用。导频和子载波合并后进行共轭对称,512 个子载波共轭对称后为 1 024 个子载波,由于快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)的共轭性质,经过 IFFT 之后信号变成实数信号,方便进行强度调制。由于采用了 DFT 扩频技术,在 IFFT 处理之前,每个子载波上的数据已不再是独立的源数据,而是各个源数据的叠加,相当于每个源数据扩展到了多个子载波上构成单载波,同时接收端中每个有效子载波的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)在 FFT 之后被重新分配,由此实现了 DMT 信号峰值平均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)的降低。在 IFFT 之后,又加上了长度为 16 的循环前缀(Cyclic Prefix, CP)以避免符号间干扰的影响(Inter-Symbol Interference, ISI)。

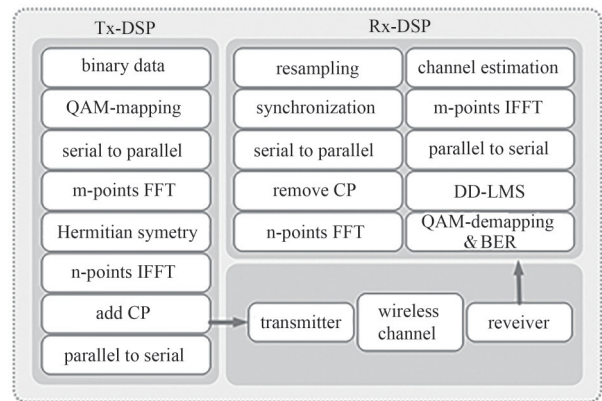


Fig.2 DSP routine
图2 数字信号处理流程

太赫兹信号通过一个增益为 25 dBi 的喇叭天线(Horn Antenna, HA)发射。高频段的太赫兹信号在自由空间传输过程中损耗较大,因此需要对 300 GHz 信号进行放大以支持无线传输。同时由于高频段的 HA 孔径相对较小,可以采用直径较小的平凸透镜来集中太赫兹光束并最大化接收端 HA 的接收功率。具体来说, Lens-1 的直径为 10 cm,而 Lens-2 的直径更大,为 30 cm。实验场景如图 1(b)所示。发送端和接收端位于复旦大学江湾校区地下车库的两端。

接收端通过外差相干的方式进行检测:经过 50 m 无线传输后,毫米波信号通过 Lens-2 聚焦,并由一个同样型号的喇叭天线 HA-2 接收。接收信号由具有 33 dB 增益的低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)放大。由于信号载频的频率过高,无法直接由数字示波器采样,故需要进行一次电域的下变频过程。LO-2 的本振频率为 12.79 GHz,同样经过 24 倍上变频后进入混频器 Mixer-2 与接收信号混频得到中频(Intermediate Frequency, IF)信号,中频为 6.96 GHz。下变频后,中频信号通过具有 26 dB 增益的电放大器(Electrical Amplifier, EA)进行增强,并最终由具有 100 GSa/s 采样率和 33 GHz~3 dB 带宽的数字存储示波器(Digital Storage Oscilloscope, DSO)捕获。

采样后的信号保存通过 Matlab 离线处理即可恢复出原始比特信息。离线过程包括下变频、时钟恢复及同步、信号估计和恢复、基于判决引导的最小均方误差算法(Decision-Driven Least Mean Square, DD-LMS)、星座点解映射和误码率(Bit Error Ratio, BER)计算。在接收端 DSP 过程中,首先根据中频位置对来自 DSO 的输出信号进行下变频,得到基带信号。然后进行重采样和同步,并去除循环冗余。在 FFT 之后,信号和导频被分离,通过导频进行信道估计和均衡。之后进行反 DFT。然后使用 DD-LMS 进一步还原信号。DD-LMS 能够通过精细的线性均衡实现更好的信号恢复性能。最后,对信号进行解调,采取多组信号计算误码率后求平均。

3 实验结果分析

本套全电子太赫兹传输系统的发送和接收的天线均采用透镜天线的形式,由于试验场地中间有多个障碍物造成干扰,为实现最佳的通信性能,接收透镜天线需要严格地对准发送透镜天线,同时与 2 个喇叭天线之间距离也要保持在透镜焦点。通过瞄准镜对准并根据示波器电谱找到最佳信号接收位置后,分别传输了 DFTs-DMT-QPSK 信号和 DFTs-DMT-16QAM 信号,以探究此系统的传输性能。首先在固定距离的情况下探究了系统性能与发送信号波特率的关系,之后在固定信号发送波特率的情况下探究了系统性能与信号发送电压的关系。

3.1 系统性能与发送信号波特率的关系

首先,将无线传输距离固定在 50 m,取 AWG 最高发送电压 1 V,发送信号的波特率在 0~12 GHz 之间改变,得到的误码率-波特率曲线如图 3 所示。图 3(b)和图 3(c)是基带带宽为 6 GHz 和 12 GHz 时解得的 DFTs-DMT-QPSK 信号星座图;图 3(d)和图 3(e)是波特率为 2 GHz 和 4 GHz 时解得的 DFTs-DMT-16QAM 信号星座图。可以看到,误码率整体随信号的波特率增加而升高。对于 DMT-QPSK 信号,如图 3(a)所示,信号随着发送波特率从 6 GBaud 增加到 12 GBaud, BER 缓慢上升,这主要是由于信噪比的下降。图 4 展示了接收机性能随误码率的变化,可以看到,随着信噪比的增加,系统性能快速提升。而随着波特率的增加,ISI 现象变得更加明显,信噪比逐渐下降,导致系统性能下降。DFTs-DMT-16QAM 信号相比而言恶化速度更快。

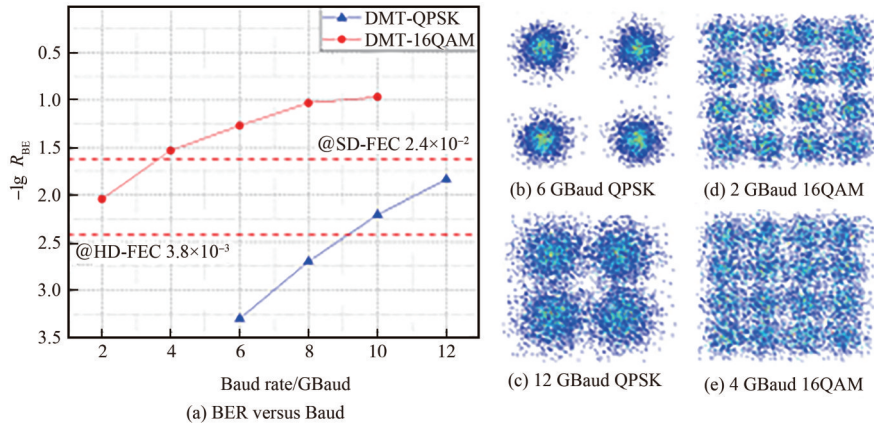


Fig.3 BER versus Baud rate and constellations
图3 误码率-波特率曲线与解调信号星座

对于 DMT 信号,传输净比特率=波特率×每符号比特数×(1-判决开销)×每帧中有效 OFDM 符号占比×每符号中有效子载波占比×(1-循环前缀长度占比)。根据以上关系式,去除 7% 的硬判决开销, DFTs-DMT-QPSK 可在 3.8×10^{-3} FEC 门限下实现 $8 \times 2 \times 93\% \times 1 \times (400/1024) \times (64/65)$ Gbit/s = 5.72 Gbit/s 的无误码稳定传输;在软判决门限 (2.4×10^{-2}) 的限制下 DFTs-DMT-16QAM 的波特率最高可做到 2 GHz 左右,去除 20% 的软判决开销,可以实现净速率 $2 \times 4 \times 80\% \times 1 \times (400/1024) \times (64/65)$ Gbit/s = 2.46 Gbit/s 的 DFTs-DMT-16QAM 信号传输。

3.2 系统性能与信号发送电压的关系

接着,由图 3 可知,信号波特率越小,系统信噪比越高。为了探究系统性能与发送电压的关系,将发送信号的波特率固定在 2 GHz,改变 AWG 的输出信号电压。由此得到的误码率-发送电压曲线如图 5 所示。1 V_{peak-to-peak} 发送信号电压对应的电功率为 4 dBm,该混频器损耗为 12 dB,这样对应的输出太赫兹功率为 -8 dBm。图 5 中,2 GBaud 的 DMT-16QAM 信号满足 20% 软决策前向纠错(Soft-Decision Forward Error Correction, SD-FEC)阈值 2.4×10^{-2} ,信号随着输入电压从 500 mV 增加到 800 mV, BER 下降,这主要是由于信噪比的提高。然而,当输入电压继续增加时,由于混频器的饱和效应,系统性能开始恶化。最佳输入电压为 900 mV,在此功率点,最小 FEC 前 BER 为 0.006 9。

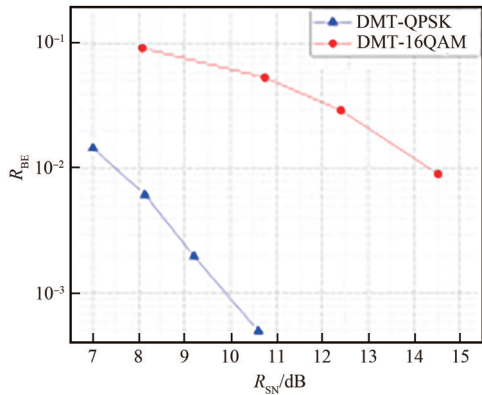


Fig.4 R_{BE} versus R_{SN}
图4 接收机误码率-信噪比曲线

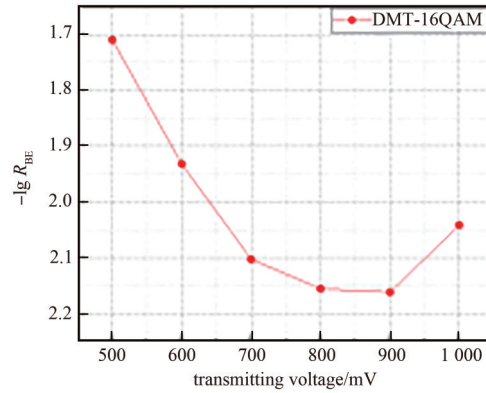


Fig.5 R_{BE} versus transmitting voltage
图5 误码率-发送电压曲线

3.3 100 m 太赫兹无线传输

将传输距离拉远调整到 100 m，重新测量误码率-波特率曲线。由于难以进行波束准直以及信号衰落，大带宽的信号信噪比较低，系统恶化严重。因此将发送信号的波特率在 0~2.5 GHz 之间改变，并对 DMT-QPSK 和 DMT-16QAM 分别进行测量，得到的误码率-波特率曲线如图 6 所示。1 GBaud 的 DMT-QPSK 信号仍然满足 3.8×10^{-3} 的硬判决门限，随着波特率增加，信噪比逐渐下降，在 1.5 G Baud 之后系统性能迅速恶化，越过 20% 开销的软判决门限。DMT-16QAM 信号仅在 100~200 Mbaud 的窄带宽情形下维持较高的信噪比，随着基带增加，信噪比迅速恶化。由于本实验中并没有加入功率放大器，故能够传输的信号功率较小，体现在频谱上 DMT 信号的信噪比较低，信号损失较大。因此合理的改进方向是在发射端加入一个功率放大器，或将实验中的喇叭天线替换成具有更大增益与更好方向性的卡塞格伦天线。

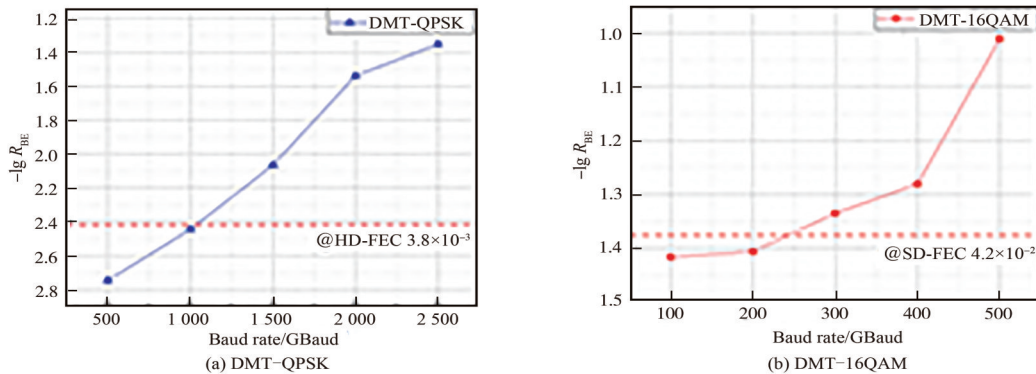


Fig.6 BER versus Baud rate
图6 误码率-波特率曲线

4 结论

由于太赫兹的频率较高，因此很难实现具有良好性能的太赫兹系统，特别是在纯电子学器件的情况下，系统性能受到各个电子器件带宽限制的影响较大。在此实验中，在没有功率放大器的情况下实现了 50 m 距离 300 GHz 的太赫兹可靠传输，对比分析了波特率和发送电压对信号质量的影响，对今后的研究与实际应用具有指导意义。同时进行 100 m 太赫兹的无线传输，由于缺少功率放大器，发送信号的功率不足，导致接收信号信噪比较低，因此只能进行低带宽传输。在当前太赫兹高频段研究的热潮下，此纯电子学太赫兹系统仍然是 5G 前传(Front haul)网络的一种有效解决方案。对于太赫兹无线传输来说，在未来高速无线网络和大数据应用领域有着相当可观的前景。

参考文献：

[1] 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.) doi:10.11805/TKYDA201806.0931.

- [2] 秦超逸,许育铭,王哈达,等. W 波段高速远距离无线实时通信[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(6):829–832,847. (QIN Chaoyi,XU Yuming,WANG Hada,et al. W-band high speed long distance wireless real-time communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(6):829–832,847.) doi:10.11805/TKYDA201606.0829.
- [3] YU Jianjun,WANG Yanyi,DING Junjie,et al. Broadband photon-assisted terahertz communication and sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023,41(11):3332–3349. doi:10.1109/JLT.2023.3252821.
- [4] DING Junjie,YU Jianjun,LI Weiping,et al. High-speed and long-distance photonics-aided terahertz wireless communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023,41(11):3417–3423. doi:10.1109/JLT.2023.3251976.
- [5] CAI Yuancheng, XIANG Shitong, ZHU Min, et al. Spectrally efficient multi-service fiber-wireless access in low-cost direct-detection THz system at 300 GHz[J]. Optics Letters, 2023,48(17):4554–4557. doi:10.1364/OL.498886.
- [6] YU Jianjun,WEI Yi. Digital signal processing for high-speed THz communications[J]. Chinese Journal of Electronics, 2022,31(3):534–546. doi:10.1049/cje.2021.00.258.
- [7] SHI Junting,YU Jianjun,ZHANG Jiao,et al. 65,536-QAM OFDM signal transmission over a fiber-THz system at 320 GHz with delta-sigma modulation[J]. Optics Letters, 2023,48(8):2098–2101. doi:10.1364/OL.486349.
- [8] DING Junjie,WANG Mingxu,LI Weiping,et al. Wireless transmission of a 200-m PS-64QAM THz-wave signal using a likelihood-based selection radius-directed equalizer[J]. Optics Letters, 2022,47(15):3904–3907. doi:10.1364/OL.465696.
- [9] LI Weiping,YU Jianjun,ZHU Bowen,et al. Photonics-aided THz-wireless transmission over 400 m at 335 GHz[J]. Science China Technological Sciences, 2022,65(12):3082–3084. doi:10.1007/s11431-022-2225-8.
- [10] ZHU Min,ZHANG Jiao,LIU Xiang,et al. Photonics-assisted THz wireless transmission with air interface user rate of 1-Tbps at 330–500 GHz band[J]. Science China Information Sciences, 2023,66(9):199302. doi:10.1007/s11432-022-3830-9.
- [11] LI Weiping,YU Jianjun,ZHU Bowen,et al. Photonics 60 GBaud PDM-16QAM fiber-wireless 2 × 2 MIMO delivery at THz-band[J]. Chinese Optics Letters, 2023,21(7):073901.
- [12] WANG Kaihui,YU Jianjun,LI Weiping,et al. Demonstration of DSM-OFDM-1024QAM transmission over 400 m at 335 GHz[J]. Science China Information Sciences, 2023,66(8):189302. doi:10.1007/s11432-023-3761-0.
- [13] ZHAO Feng, YANG Xiongwei, ZHAO Li, et al. Demonstration of 4096QAM THz MIMO wireless delivery employing one-bit delta-sigma modulation[J]. Optics Letters, 2022,47(24):6361–6364. doi:10.1364/OL.477155.
- [14] ZHAO Li, LONG Jianyu, DING Jiejun, et al. Demonstration of 5.12-Tbps THz-over-fiber transmission in 80-channel WDM system[J]. 2023,66(2023):1480–1482. doi:10.1007/s11431-022-2286-4.
- [15] WANG Chen, YU Jianjun, ZHANG Jiao, et al. Beyond 300-Gbps/λ photonics-aided THz-over-fiber transmission employing MIMO single-carrier frequency-domain equalizer[J]. Optics Letters, 2023,48(6):1363–1366. doi:10.1364/OL.485425.
- [16] DING Junjie, TAN Yuxuan, WANG Yanyi, et al. 352-Gbit/s single line rate THz wired transmission based on PS-4096QAM employing hollow-core fiber[J]. Digital Communications and Networks, 2023,9(3):717–722. doi:10.1016/j.dcan.2022.04.018.
- [17] LI Weiping,YU Jianjun,ZHU Bowen,et al. Photonic terahertz wireless communication:towards the goal of high-speed kilometer-level transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024,42(3):1159–1172. doi:10.1109/JLT.2023.3329351.

作者简介:

田 鹏(2001–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹波通信技术、光子辅助毫米波技术. email: 22210720225@m.fudan.edu.cn.

韩 扬(1999–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为毫米波系统中的数字信号处理技术.

王明旭(1998–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为矢量毫米波、光载无线等.

谭景文(2000–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为光子毫米波/太赫兹通信技术.

徐思聪(2000–), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为毫米波通信中的神经网络算法.

张 冰(1996–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为毫米波和太赫兹波通信技术.

魏 怡(1995–), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹波通信和光载无线.

杨雄伟(1996–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为毫米波和太赫兹波通信技术、光子太赫兹技术等.

李韦萍(1994–), 男, 博士, 主要研究方向为光生毫米波技术、太赫兹通信等.

张 尧(1999–), 女, 硕士, 主要研究方向为高速光纤传输、光生毫米波技术等.

余建军(1968–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高速光纤通信技术、毫米波和太赫兹波通信技术、光纤无线融合技术等.