

文章编号: 2095-4980(2018)06-0931-07

太赫兹通信系统的研究现状与应用展望

赵明明, 余建军*

(复旦大学 通信科学与工程系 电磁波信息科学重点实验室, 上海 200433)

摘 要: 随着无线通信技术的发展, 对无线通信速率和频率的要求逐年提高。现有无线通信频段已趋于饱和, 而太赫兹频段是一个全新的空间。本文按照产生方式分类对近年国内外太赫兹通信研究最新进展进行了综述, 并给出未来太赫兹通信系统在光载无线通信、空间领域、军事领域上的可能应用方向。

关键词: 太赫兹通信; 太赫兹产生; 光学外差法; 太赫兹通信应用

中图分类号: TN911

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.0931

Terahertz communication system: present and outlook

ZHAO Mingming, YU Jianjun*

(Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: With the development of wireless mobile communication technology, the demand on wireless communication rate and frequency increases year by year. Existing wireless mobile communication frequency has the tendency of being saturated, yet terahertz spectrum is a new space. In this article, the latest research progress of terahertz communication at home and abroad are summarized according to the method for terahertz wave generation, and the possible future application of THz communication systems in Radio over Fiber communication, space application, and the field of military are also discussed.

Keywords: Terahertz communication; Terahertz wave generation; optical heterodyne; Terahertz wave communication application

在过去 30 年内, 平均每 18 个月无线传输速率增加 2 倍^[1], 速率需求驱动无线通信的快速发展。中国移动为 4G 分时期长期演进(Time Division Long Term Evolution, TD-LTE)网络划分的频段最高为 2.6 GHz^[2], 虽然第五代移动通信(The Fifth Generation, 5G)标准尚未完成, 但 33~46 GHz 频段的时分双工(Time Division Duplexing, TDD)网络频率范围正在考虑中^[2], 目前主要使用 28 GHz 频率进行 5G 通信试验。可以看出, 载波频率不断增加, 波长不断减小是无线通信的发展趋势, 频率更高、波长更短的太赫兹(THz)通信有望成为未来移动通信的主导方向。

THz 通信在传统无线电通信基础上应运而生。THz 波的频率为 0.1~10 THz, 波长为 3 mm~30 μm , 波段介于微波与远红外光之间。THz 波的长波段与毫米波(波长为 10~1 mm)的波段部分重合, 其短波段与红外光(波长为 1~760 nm)部分重合, 可认为 THz 波处于宏观经典理论向微观量子理论的过渡区^[3]。与微波相比, THz 波频率更高, 能实现微波不能满足的高速无线传输; 波束更窄, 方向性更好, 定位更精确^[3]; 与红外光相比, THz 波能穿透沙尘烟雾, 可在大风或沙尘天气正常工作; THz 波的光子能量约为可见光的四十分之一, 利用 THz 波做信息载体能量效率高^[4]。THz 通信具有独特的性质, 如大气不透明, 速率高, 容量大, 方向性好, 散射小^[5], 安全性好, 保密性高。

1 太赫兹通信系统的研究现状

全球移动数据通信量将在 2019 年增长到 24.3×10^{15} bit^[6], 因此需要新的技术以支持更高的无线流量。无线保

收稿日期: 2018-03-21; 修回日期: 2018-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61325002; 61250018; 61527801; 61675048; 61720106015)

*通信作者: 余建军 email: comdtu2012@gmail.com

真(Wireless Fidelity, Wi-Fi)是目前使用最广泛的无线通信技术,但其能提供的短距离速率仅为 10 Gbit/s^[7];新兴的可见光通信技术具有更高的频率,但光束需要严格对准,在雾天每公里的衰减达到 200 dB,而 THz 波的衰减很少^[8-9]。所以,THz 通信在大容量无线通信系统中前景广阔。

THz 通信系统的分类方法较多,可按产生方式、调制格式、波段等分类,本文按其产生方式分类。

1.1 基于纯电子器件

这类 THz 发生器由射频源(Radio Frequency source, RF source)、倍频器(Multiplier)、电信号混频器(Mixer)及电信号放大器(Amplifier)组成。射频信号源产生频率约为几十 GHz 的射频信号,经过倍频器上变频,使用电信号混频器产生调制信号,经放大后由天线(Antenna)发送,如图 1 所示。该方式的优势是发射机结构简单,但对电子设备带宽和增益的要求较高,调制和解调时有较大的转换损失,设备通常较为昂贵。

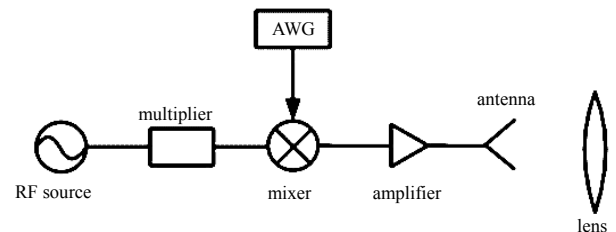


Fig.1 Terahertz emission end based on electronic devices(AWG:arbitrary waveform generator)

图 1 基于纯电子器件的 THz 发射端

2008 年,德国 Braunschweig 实验室在 300 GHz 信道上成功实现模拟视频信号的实时传输^[10]。2011 年,德国应用固体物理研究所研制了工作在 220 GHz 的全固态 THz 通信系统,发射和接收前端使用有源多功能毫米波单片集成电路(Multi-functional Millimeter-wave Microwave Integrated Circuits, MMICs)集成了倍频器、混频器和放大器,可实现 256 QAM 正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)信号传输,通断键控(On Off Keying, OOK)信号速率可达到 25 Gbit/s,是使用纯电子方式进行 THz 通信的成功尝试^[11]。韩国的 Tae Jin Chung 等在 240 GHz 和 300 GHz 载频上实现了 1.485 Gbit/s 的高清电视(High-Definition TV, HDTV)信号实时无线传输^[12]。美国贝尔实验室使用全电子学方式实现了 625 GHz 的 THz 通信系统,是载波频率的新突破。该系统使用双二进制(Duo Binary)基带调制,能达到 2.5 Gbit/s 的传输速率^[13],实现无误码传输^[14]。2012 年,德国卡尔斯鲁厄理工学院使用 MMIC 在 220 GHz 的载频上实现了 25 Gbit/s 的 10 m 无线 OOK 信号传输^[15]。2014 年,日本的 SONG H J 等实现了直接正交调制解调 MMIC,芯片集成了半基尔伯特单元混频器,可实现信号平衡,转换效率更高。该系统在 300 GHz 频段下使用正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制格式达到 50 Gbit/s 的传输速率^[16]。

在国内,2011 年,中国工程物理研究院在 0.14 THz 频段实现了 10 Gbit/s 的 16 QAM 信号无线通信,同时进行 4 路 HDTV 信号的实时传输与解调,传输距离达到 500 m^[17]。2014 年,中国工程物理研究院使用纯电子器件方式实现了国内首个 50 m 视距信道下的 0.34 THz 数据链路,能实时调制和解调 3 Gbit/s 的数据。研究人员同时基于该链路提出了基于 IEEE 802.11b/g 协议的 0.34 THz 无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)的通信协议,是 THz 波用在 WLAN 中可行性的初步验证^[18]。中国工程物理研究院实现了 0.14 THz OOK 通信系统,达到 15 Gbit/s 的传输速率^[19],系统调制解调可用模拟器件直接完成,并结合高阶 QAM 调制、谐波混频以及级联放大技术。同 OOK 调制方式相比,频谱利用率高,可用先进数字信号处理技术进行信道估计与均衡^[19]。

目前使用倍频方法产生的载波频率最高为 625 GHz,该方式需要上下变频和多种调制混频技术,电子器件的转换损失使发射和接收功率较低,故传输速率不高,无线传输距离较近。调制格式主要使用 OOK 调制,其属于较低阶调制,频谱效率不高,也有研究尝试了正交调制如 QPSK、QAM 调制。

1.2 光子辅助方式(光学外差法)

第 2 种产生 THz 波的方案是光子辅助方式,即光学外差法。目前 THz 通信系统大部分使用该方式,产生的 THz 波频率在 1 THz 以下。发射端由外腔激光器(External Cavity Laser, ECL)、光调制器、保偏光耦合器(Polarization-Maintaining Optical Coupler, PM-OC)、保偏掺铒光纤放大器(Polarization-Maintaining Erbium-Doped Fiber Amplifier, PM-EDFA)、可调节光衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA)、电放大器(Electrical Amplifier, EA)及单向载流子光电二极管(Uni-Traveling Carrier-Photo Detector, UTC-PD)等元器件组成。激光器产生 2 束或多束光信号,将信息调制到光载波上,再结合 UTC-PD,利用光学外差法即可产生频率为 2 束光频率之差的 THz 信号,如图 2 所示。若能产生具有一定频率间隔的光信号(光频梳),那么可选择任意 2 束光的频率之差作为 THz 信号的频率。该方法需要较为精密的光学器件及平台,优势是频率调节较容易,能方便地获得不同频率的 THz 信号,多载波系统中使用该方法可提升系统容量。

2004年,日本NTT公司在120 GHz的频段上实现振幅键控(Amplitude Shift Keying, ASK)调制10 Gbit/s信号的无线传输,可同时传输6路未被压缩的HDTV信号,无线距离超过1 km,在2008年用于北京奥运会赛事直播^[20]。2006年,日本的Hirata等设计了120 GHz频段毫米波通信系统,数据传输速率为10 Gbit/s,通信距离可达200 m,由天线增益和输出光功率估计的最大传输距离可达3~4 km。该无线链路可与10 Gbit/s的光纤通信系统连接,用于光纤通信最后一公里的接入^[21],这是THz通信的另一个重要应用领域。

2011年,日本国家信息与通信技术研究所在W波段(75~110 GHz)实现了40 Gbit/s的16 QAM光载无线信号(Radio over Fiber, RoF)传输^[22]。在特殊时期(如自然灾害)光纤设备遭到破坏时,该链路可作为宽带无线链路,也可用于移动无线设备基站间的链接,保证通信系统完整。丹麦技术大学在W波段实现了16 QAM信号在混合光无线链路中的传输,速率达到100 Gbit/s^[23],为当时W波段的最高速率,是THz通信速率上新的突破。2012年,日本的Song H J在300 GHz频段上实现了24 Gbit/s的实时传输^[24]。2013年,德国的KOENIG S在273.5 GHz的频段使传输速率达到100 Gbit/s和超过20 m的无线传输距离,该项成果发表在《Nature Photonics》上^[25]。2014年,英国的SHAMS Haymen结合偏振复用技术实现了多人多出(Multi Input Multi Output, MIMO)系统,在200 GHz频段实现了75 Gbit/s的双通道QPSK信号实时传输^[26]。2014年,法国里尔大学使用THz光混频器在400 GHz的载频上实现了46 Gbit/s的ASK信号无线传输^[27],发射功率低于1 μ W。2015年,英国的SHAMS Haymen使用增益可调的光频梳实现了四载波下行传输的系统,整体下行信道数据速率达到100 Gbit/s^[28],说明多载波传输可增加数据率,降低光电转换器件的带宽要求。丹麦技术大学实现了400 GHz载频的THz传输系统,能在奈奎斯特信道中实时监测和传输60 Gbit/s的波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)QPSK信号,这是当时在高于300 GHz的载频上能够实现的最高速率^[29]。德国杜伊斯堡艾森大学实现了相干光载无线(Coherent Radio over Fiber, CROF)THz通信链路,可支持离线59 Gbit/s的64 QAM正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)信号传输;该链路也可在328 GHz的载波频率上实时传输HDTV信号^[30]。传统实验室环境中超过100 Gbit/s的速率一般使用空分或频分复用技术实现,造成系统复杂度和能耗的增加。2017年,丹麦技术大学实现了单通道0.4 THz光无线结合的太赫兹链路,使用一组发射机和接收机达到了106 Gbit/s的无线传输速率,无线传输距离为50 cm^[31]。

在国内,2016年,天津大学的THz通信系统通过光频梳外差混频产生THz源,可在相位噪声极低的情况下产生多路THz波。该系统能实现400 GHz频段的5 Gbaud 4载波16 QAM信号传输,总数据速率为80 Gbit/s^[32]。浙江大学实现了300~500 GHz频段的光无线链路,能在仅使用一个THz发射机的情况下达到160 Gbit/s的传输速率,是当年300 GHz以上频段速率的新记录^[33]。2017年,中国工程物理研究院提出基于载波一致混频与载波偏置功率合成的无线通信方案,在140 GHz载波上使用OOK调制实现了16 Gbit/s的无线通信^[34]。

复旦大学课题组在太赫兹通信方面也取得了许多进展。2012年,实现了在100 GHz频段上传输速率为108 Gbit/s的偏振复用(Polarization Division Multiplexing, PDM)-QPSK信号,经过80 km的光纤传输和1 m的无线传输,这是在100 GHz链路上使用光纤和无线链路传输100 Gbit/s信号的首次实现^[35]。2016年,实现了2 $\times$ 2 MIMO的W波段RoF系统传输16 QAM信号,经过100 km的单模光纤以及40 m的W波段无线传输,净比特率为51.2 Gbit/s^[36]。同年,在400 GHz光无线通信系统中实现了双通道224 Gbit/s的PDM-16 QAM信号传输以及双通道216 Gbit/s的PDM-QPSK信号传输,该成果是毫米波频段400 GHz光无线系统的首次实现,也是THz无线传输速率的新记录^[37]。在信号源的产生方面,2017年,实现了基于平衡预编码光学四倍频技术的D波段矢量QPSK毫米波产生,这是首次在不使用光学滤波器的情况下使用一个马赫曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)产生D波段矢量毫米波^[38]。在调制格式方面,于2017年研究了在太赫兹系统中使用概率整形(Probabilistic Shaping, PS)调制的16 QAM信号传输,结果显示,与传统的等概率分布16 QAM相比,概率整形能带来较大的误比特率改善,提升系统性能^[39]。使用MIMO系统、多载波以及偏振复用等技术都能使系统速率大幅提升。于2017年实现了首个多载波2 $\times$ 2 MIMO THz链路,能传输6路20 Gbit/s的PDM-QPSK信号,在多载波MIMO太赫兹通信的领域有了新的进展^[40]。在高速通信方面,使用概率整形、奈奎斯特整形、查找表(Look Up Table, LUT)等先进数字信号处理技术,能显著提升系统性能。实现了D波段光子辅助矢量毫米波信号的无

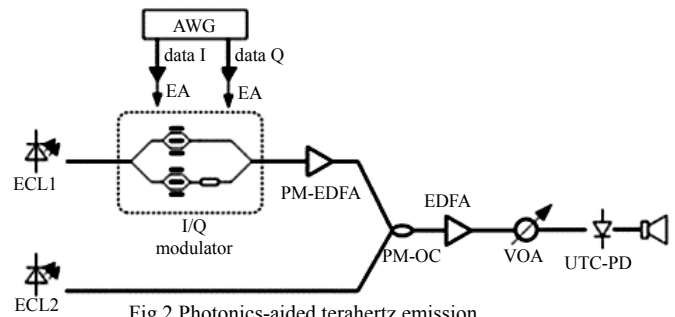


Fig.2 Photonics-aided terahertz emission
图2 基于光子辅助的太赫兹发射端

线传输,能够在 3.1 m 的无线距离上同时传输两路 PS-64QAM 调制的毫米波信号,净速率达到 1.056 Tbit/s,该成果是目前世界上 THz 通信系统的最高速率^[41]。

光学外差法是目前国内外太赫兹发射系统的主流形式,使用该方法已经能够实现传输速率为 1.056 Tbit/s 的 THz 无线通信实验^[41],未来还有更广泛的研究价值和发展空间。采用光子辅助的方法利用激光的超高频率,使用光学外差法可以方便地产生多种频率的 THz 信号。早期研究多采用结构简单的 ASK 调制,后期大部分研究均用高阶 QAM 调制提高频谱效率,采用 WDM 和 PDM 技术提升系统容量,采用 PS 技术提高信号传输质量,并结合先进数字信号处理技术提高系统的传输质量,从而进一步完善现有的太赫兹通信系统。

1.3 半导体激光器(如量子级联激光器)

利用纯电子器件方式、光子辅助方式产生的 THz 信号通常在几百 GHz。在更高的频段(如 1 THz 以上)一般只能采用激光器方法,如量子级联激光器(Quantum Cascade Lasers, QCL)、气体激光器以及自由电子激光器等产生 THz 信号。使用半导体技术实现的 QCL 便于集成,引起了广泛的研究兴趣。太赫兹量子级联激光器(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,产生方案如图 3 所示。

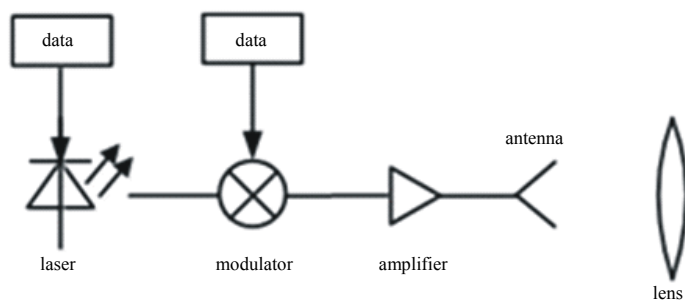


Fig.3 Terahertz emission end based on direct modulation of laser

图 3 基于激光器的太赫兹发射端

2007 年,法国的 Barbieri 等人通过直接调制 2.8 THz QCL 双金属波导的偏置电压来调节产生的 THz 波频谱边带的宽度,最高可以调节产生 13 GHz 的频谱边带^[42],这是 THz-QCL 的一项早期尝试。2017 年,韩国电子和电信研究所对宽带可调双模激光器的波束源以及 THz 发射机进行了研究,提出了一个新的无损估计系统^[43]。

在国内,采用 THz-QCL 的研究机构主要为中科院。2008 年,中科院上海微系统所在 4.1 THz 频率实现了基于 THz-QCL 和 THz 量子阱探测器(Quantum Well Photodetectors, QWPs)的无线通信实验,传输了图片和声音信号,并于 2012 年进一步传输了视频信号^[44]。THz-QWP 的优势在于其内在载流子寿命较短,探测器具有非常短的瞬时响应时间。2013 年,中科院微系统与信息技术研究所在 4.1 THz 频段基于 QCL 和 QWP 先后开展了音频、文件和视频通信实验,系统采用 OOK 数字调制格式,传输距离为 2.2 m^[45]。

采用半导体激光器的方式能产生超高频率的 THz 信号,然而对 THz 发射源的性能要求非常苛刻,采用的源(如 THz-QCL)往往需要在超低温下工作,限制了这种方式的可用性。

1.4 其他方向的研究进展

其他方向的研究进展包括调制器、信号源、编解码方案以及系统优化等,包括石墨烯 THz 调制器能探测高达 GHz 的快变微弱光信号^[46]、Turbo 编解码方案提高灵敏度^[47]、多用户室内 THz 通信系统^[48]、矩形内芯椭圆包芯光纤多通道和保偏 THz 通信^[49]以及有机晶体光学整流产生 THz 信号源^[50]。

2 太赫兹通信的应用展望

太赫兹通信具有广阔的应用前景,是一片尚未被完全开发的领域。应用领域主要有如下几个方面:

2.1 光载无线通信

光载无线通信(Radio over Fiber)实现了 THz 信号和光信号之间的转换,使用光纤传输 THz 信号。采用光子辅助的方法很容易实现 RoF 链路,系统如图 4 所示。其中,较为常用的光生毫米波方法为光学外差法。首先生成两路相干的激光,其中一路光波携带信号,这两路光波通过光纤传输,在基站拍频形成携带信号的毫米波信号。

RoF 技术充分利用了光纤传输的高带宽、低损耗的特性,又具有无线通信移动接入的灵活性。目前能够做到的最高无线通信速率 1.056 Tbit/s 就是使用 RoF 技术实现的,随着无线通信由 3G 时代逐渐步入 4G 甚至 5G 时代, RoF 将成为无线通信的支撑技术,是未来应用场景之一。

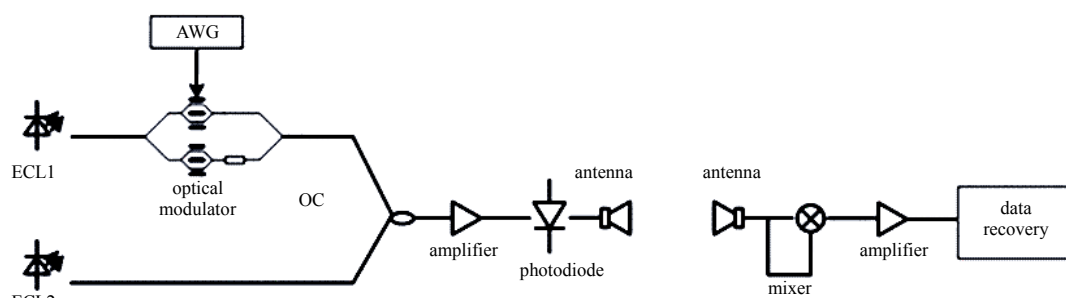


Fig.4 Diagram of RoF communication system

图4 RoF 通信系统框图

2.2 空间应用

太赫兹通信在空间技术方面也有重要应用潜力。

在空间通信方面,虽然 THz 波在大气中的传输易受水蒸气吸收的影响,但在外层空间中可做到无损传输,通过极低的频率就可实现超远距离传输。大气层可以屏蔽大部分 THz 辐射,使空间通信避免地球辐射噪声的影响,提高传输质量,同时使地面无法监听到空间通信信号。因此 THz 通信在空间通信中具有广阔的应用前景,未来有望在太空基地雷达、星际通信等应用上发挥重要作用,并用于与重返大气层的飞行器(如导弹、飞船等)进行通信^[51]。

2.3 军事应用

在战场环境中,网内电台等设备繁多,电磁环境复杂,易出现通信干扰。THz 通信容量大,速率高,可用来组成战地通信网络内的无线通信链路。THz 波频率成分丰富,带宽非常宽,并且大气衰减大,信号无法传播到敌方的监听机构处,提高了监听难度,所以可实现近距离的隐蔽通信。

3 结论

THz 通信具有速率高、频带宽、方向性好、保密性佳等许多优点,具有很大的发展潜能。文章总结了 THz 通信的特点及适用领域,对近几年国内外 THz 通信研究进展进行综述,并给出未来 THz 通信系统的应用方向。THz 通信系统未来可能的应用方向主要包括 RoF 系统、空间应用及军事应用。

参考文献:

- [1] CHERRY S. Edholm's law of bandwidth[J]. IEEE Spectrum, 2004,41(7):58-60.
- [2] 周健. 中国移动 TDD-LTE/FDD-LTE 网络融合策略探讨[J]. 移动通信, 2016,40(11):84-88. (ZHOU Jian. Discussion on China Mobile's TDD-LTE/FDD-LTE Network Convergence Strategy[J]. Mobile Communication, 2016,40(11):84-88.)
- [3] 姚建铨,迟楠,杨鹏飞,等. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. 中国激光, 2009,36(9):2213-2233. (YAO Jianquan,CHI Nan, YANG Pengfei,et al. Terahertz communication technology research and its prospect[J]. China Laser, 2009,36(9):2213-2233.)
- [4] 顾立,谭智勇,曹俊诚. 太赫兹通信技术研究进展[J]. 物理, 2013,42(10):695-707. (GU Li,TAN Zhiyong,CAO Juncheng. Terahertz communication technology review[J]. Physics, 2013,42(10):695-707.)
- [5] 李纪舟,蒋文涛. 太赫兹波通信技术研究现状及展望[J]. 通信技术, 2014(4):348-353. (LI Jizhou,JIANG Wentao. The current situation and prospects of THz wave communication technology[J]. Communication Technology, 2014(4):348-353.)
- [6] CISCO and/or its affiliates. 2015 Cisco visual networking index:global mobile data traffic forecast update,2014-2019 Cisco white paper[EB/OL]. (2017-03-28) [2018-03-21]. http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html.
- [7] DHILLON S S,VITIELLO M S,LINFIELD E H,et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2017,50(4):043001.
- [8] FEDERICI J,MOELLER L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. Journal of Applied Physics, 2010,107(11):6-323.
- [9] SEEDS A J,SHAMS H,FICE M J,et al. Terahertz photonics for wireless communications[J]. Lightwave Technology Journal of, 2015,33(3):579-587.

- [10] JASTROW C, MUNTER K, PIESIEWICZ R, et al. 300 GHz channel measurement and transmission system[C]// International Conference on Infrared. Pasadena, CA, USA: IEEE, 2008: 1–2.
- [11] KALLFASS I, ANTES J, SCHNEIDER T, et al. All active mmic-based wireless communication at 220 GHz[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2011, 1(2): 477–487.
- [12] CHUNG T J, LEE W H. A 1.485 Gbit/s video signal transmission system at carrier frequencies of 240 GHz and 300 GHz[J]. ETRI Journal, 2011, 33(6): 965–968.
- [13] MOELLER L, FEDERICI J, SU K. 2.5 Gbit/s duobinary signalling with narrow bandwidth 0.625 THz source[J]. Electronics Letters, 2011, 47(15): 856–858.
- [14] MOELLER L, FEDERICI J, SU K. THz wireless communications: 2.5 Gb/s error-free transmission at 625 GHz using a narrow-bandwidth 1 mW THz source[C]// General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul, Turkey: IEEE, 2011: 1–4.
- [15] KALLFASS I, ANTES J, LOPEZ-DIAZ D, et al. Broadband active integrated circuits for terahertz communication[C]// Wireless Conference. Poznan: VDE, 2012: 1–5.
- [16] SONG H J, KIM J Y, AJITO K, et al. 50 Gb/s direct conversion qpsk modulator and demodulator mmics for Terahertz communications at 300 GHz[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2014, 62(3): 600–609.
- [17] 王成, 刘杰, 吴尚昀, 等. 0.14 THz 10 Gbps 无线通信系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011, 9(3): 265–269. (WANG Cheng, LIU Jie, WU Shangyun, et al. 0.14 THz 10 Gbps wireless communication system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011, 9(3): 265–269.)
- [18] WANG C, LU B, LIN C, et al. 0.34 THz wireless link based on high-order modulation for future wireless local area network applications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2014, 4(1): 75–85.
- [19] 科技年部报. 中国工程物理研究院科技年报[M]// 邓贤进. 太赫兹高速通信技术研究. 成都: 四川科学技术出版社, 2014. (Annual report of science and technology. China Academy of Engineering Physics Technology Report[M]// DENG Xianjin. Research on high speed Terahertz communication technology. Chengdu, China: Sichuan Science and Technology Press, 2014.)
- [20] KUKUTSU N, HIRATA A, KOSUGI T, et al. 10 Gbit/s wireless transmission systems using 120 GHz band photodiode and MMIC technologies[C]// Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Greensboro, NC, USA: IEEE, 2009. DOI: 10.1109/csics.2009.5315702.
- [21] HIRATA A, KOSUGI T, TAKAHASHI H, et al. 120 GHz band millimeter wave photonic wireless link for 10 Gb/s data transmission[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(5): 1937–1944.
- [22] 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): 56–63.
- [23] PANG X, CABALLERO A, DOGADAEV A, 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.
- [24] SONG H J, AJITO K, MURAMOTO Y, et al. 24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications[J]. Electronics Letters, 2012, 48(15): 953–954.
- [25] KOENIG S, LOPEZDIAZ D, ANTES J, et al. Wireless sub THz communication system with high data rate[J]. Nature Photonics, 2013, 7(12): 977–981.
- [26] SEEDS A J, RENAUD C C, DIJK F V, et al. Photonic generation for multichannel THz wireless communication[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 23465–23472.
- [27] 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 & Technology, 2014, 4(3): 328–337. DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2309006.
- [28] 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. DOI: 10.1109/JPHOT.2015.2438437.
- [29] YU X, 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. DOI: 10.1109/PS.2015.7328934.
- [30] STÖHR A, HERMELO M F, STEEG M, et al. Coherent radio over fiber THz communication link for high data rate 59 Gbit/s 64 QAM OFDM and real time HDTV transmission[C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2017: Tu3B.2. DOI: 10.1364/OFC.2017.Tu3B.2.
- [31] JIA S, PANG X, OZOLINS O, et al. 0.4 THz photonic wireless link with 106 Gbit/s single channel bit rate[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 610–616. DOI: 10.1109/JLT.2017.2776320.
- [32] JIA S, YU X, HU H, et al. 80 Gbit/s 16 QAM multicarrier THz wireless communication link in the 400 GHz band[C]// ECOC

- 2016, European Conference on Optical Communication. Dusseldorf, Germany: VDE, 2016.
- [33] YU X, JIA S, HU H, et al. THz photonics-wireless transmission of 160 Gbit/s bit rate[C]// Optoelectronics and Communications Conference. Niigata, Japan: IEEE, 2016.
- [34] 林长星, 陆彬, 吴秋宇, 等. 基于混频偏置合成的高速太赫兹无线通信系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(1):1-6. (LIN Changxing, LU Bin, WU Qiuyu, et al. High speed wireless communication system based on mixed frequency offset in the synthesis of terahertz[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(1):1-6.)
- [35] LI X, DONG Z, YU J, et al. Fiber wireless transmission system of 108 Gb/s data over 80 km fiber and 2×2 MIMO wireless links at 100 GHz W band frequency[J]. Optical Letter, 2012, 37(24):5106-5108. DOI:10.1364/OL.37.005106.
- [36] WANG K, YU J. Transmission of 51.2 Gb/s 16 QAM single carrier signal in a MIMO radio over fiber system at W band[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2017, 59(11):2870-2874. DOI:10.1002/mop.30835.
- [37] LI F, YU J, ZHANG J, et al. A 400 G optical wireless integration delivery system[J]. Optics Express, 2013, 21(16):18812-18819. DOI:10.1364/OE.21.018812.
- [38] ZHOU W, LI X, YU J. Pre-coding assisted generation of a frequency quadrupled optical vector D-band millimeter wave with one mach zehnder modulator[J]. Optics Express, 2017, 25(22):26483-26491. DOI:10.1364/OE.25.026483.
- [39] WANG K, LI X, KONG M, et al. Probabilistically shaped 16 QAM signal transmission in a photonics aided wireless Terahertz wave system[C]// Optical Fiber Communication Conf.(OFC'18). San Diego, California, USA:[s.n.], 2018, M4J.7. DOI:10.1364/OFC.2018. M4J.7.
- [40] LI X, YU J, WANG K, et al. 120 Gb/s wireless terahertz wave signal delivery by 375-500 GHz multi carrier in a 2×2 MIMO system [C]// Optical Fiber Communication Conf.(OFC'18). San Diego, California, USA:[s.n.], 2018, M4J.4. DOI:10.1364/OFC.2018. M4J.4.
- [41] LI X, YU J, ZHAO L, et al. 1 Tb/s photonics aided vector millimeter wave signal wireless delivery at D-band[C]// Optical Fiber Communication Conf.(OFC'18). San Diego, California, USA:[s.n.], 2018, Tu4D.1. DOI:10.1364/OFC.2018. Th4D.1.
- [42] BARBIERIS, MAINEULT W, DHILLON S S, et al. 13 GHz direct modulation of terahertz quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(14):1069. DOI:10.1063/1.2790827.
- [43] PARK K H, LEE E S, LEE L M, et al. Semiconductor-based terahertz photonics for industrial applications[C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2017: W4B.4. DOI:10.1364/OFC.2017. W4B.4.
- [44] 谭智勇, 陈镇, 韩英军, 等. 基于太赫兹量子级联激光器的无线信号传输的实现[J]. 物理学报, 2012, 61(9):98701-1-98701-5. (TAN Zhiyong, CHEN Zhen, HAN Yingjun, et al. The realization of wireless signal transmission based on terahertz quantum cascaded lasers[J]. Journal of Physics, 2012, 61(9):98701-1-98701-5.)
- [45] TAN Z, CHEN Z, CAO J, et al. Wireless terahertz light transmission based on digitally-modulated terahertz quantum-cascaded laser[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(3):38-40.
- [46] 刘海涛, 文岐业, 杨青慧, 等. 石墨烯太赫兹调制器及 330 GHz 无线通信系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(4):481-486. (LIU Haitao, WEN Qiye, YANG Qinghui, et al. Graphene terahertz modulator and 330 GHz wireless communication system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(4):481-486.)
- [47] LOPACINSKI L, NOLTE J, BUECHNER S, et al. Improved turbo product coding dedicated for 100 Gbps wireless terahertz communication[C]// IEEE, International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. [S.l.]: IEEE, 2016: 1-6.
- [48] LIN C, LI G Y L. Terahertz communications: an array of subarrays solution[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(12):124-131. DOI:10.1109/PIMRC.2016.7794685.
- [49] ISLAM M S, SULTANAJ, DINOVISER A, et al. Zeonex-based asymmetrical terahertz photonic crystal fiber for multichannel communication and polarization maintaining applications[J]. Applied Optics, 2018, 57(4):666. DOI:10.1364/AO.57.000666.
- [50] ROVERE A, JEONG Y G, PICCOLI R, et al. Generation of high-field terahertz pulses in an HMQ-TMS organic crystal pumped by an ytterbium laser at 1 030 nm[J]. Optics Express, 2018(26):2509-2516. DOI:10.1364/oe.26.002509.
- [51] 李欣, 徐辉, 禹旭敏, 等. 太赫兹通信技术研究进展及空间应用展望[J]. 空间电子技术, 2013(4):56-60. (LI Xin, XU Hui, YU Xumin, et al. Terahertz communication space technology research progress and application prospect[J]. Space Electronic Technology, 2013(4):56-60.)

作者简介:



赵明明(1995-), 女, 湖北省襄阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹通信系统中的调制格式 .email:17210720092@fudan.edu.cn.

余建军(1968-), 男, 湖南省益阳市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高速光纤通信技术、光子辅助毫米波通信及光纤无线融合技术.