# 文章编号: 2095-4980(2019)06-0944-06

# 太赫兹轨道角动量通信方法应用分析

王 虎,段崇棣,朱忠博,陈 刚

(中国空间技术研究院 西安分院, 陕西 西安 710100)

摘 要:轨道角动量(OAM)通信复用方法近年来被认为是一种提升通信容量的有效途径。基于 国内外相关研究,阐述了轨道 OAM 通信方法的发展;根据频率特点,分析太赫兹轨道 OAM 通信 方法的形式和应用优势,并进一步分析讨论了太赫兹轨道 OAM 通信应用存在的问题和解决方式, 特别是远距离大宽带情形下的分析,为未来技术发展和应用提供参考。

关键词:太赫兹;太赫兹通信;轨道角动量

中图分类号:TN928

文献标志码:A

doi:10.11805/TKYDA201906.0944

# Applied analysis of terahertz Orbital Angular Momentum communications

WANG Hu, DUAN Chongdi, ZHU Zhongbo, CHEN Gang (China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710100, China)

**Abstract:** The Orbital Angular Momentum(OAM) communication method is recognized as a promising method in improving the capacity of the communication systems. Based on the relevant research at home and abroad, the development of the OAM communications is introduced. According to the frequency characteristic, the structure and advantages of the terahertz OAM communication are analyzed. Some technical problems, especially those with wide bandwidth and long-range communications, are discussed for further development and applications.

Keywords: terahertz; terahertz communications; Orbital Angular Momentum

太赫兹波(THz)通常是指频率处于 0.1~10 THz 区间的电磁波,该波段位于毫米波和红外光之间。随着科技的 发展以及各国研究者的努力,近年来太赫兹波辐射的产生、检测和应用等技术得到了蓬勃发展,并逐步形成了一 个新兴交叉学科领域——太赫兹科学与技术。目前太赫兹波科学与技术的迅速发展对宽带移动通信、卫星通信、 安全检查、无损检测、医疗诊断、天文学、环境监测和材料生物等领域已产生了重大影响<sup>[1-3]</sup>,特别是在太赫兹 通信领域。

太赫兹通信技术具有频率资源丰富、可承载带宽大、保密性好等优点,能满足速率为数十 Gbit/s 及以上的无 线传输需求,在未来高速无线通信方面具有广阔的应用前景,已备受国内外研究者的关注。基于光学轨道角动量 (OAM)的模分复用方法,用于微波和激光通信,可将系统容量分别提升至几十 Gbit/s<sup>[4]</sup>和 Tbit/s<sup>[5]</sup>,显示了在提升 通信容量方面的极大应用潜力。借鉴微波和光学段的相关研究和应用成果,推动太赫兹波段 OAM 的通信应用研 究,有望进一步提升太赫兹波段的通信系统容量,扩展太赫兹通信系统的应用范围。

#### 1 太赫兹通信和 OAM 通信进展

国外:2005年,德国 R. Piesiewic 等提出短距离太赫兹无线通信的设想<sup>[6]</sup>;2006年,日本 NTT(Nippon Telegraph & Telephone)实验室的 Akihiko Hirata 等报道了基于 UTC-PD(Uni-Traveling Carrier Photodiode)光电二极管的光电 变换 THz 源和毫米波单片集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuits, MMIC)芯片接收的 0.12 THz 波段 的 THz 通信系统,首次实现 10 Gbit/s,传输距离为 200 m 的高速无线通信,成为 THz 通信技术的标志性成果<sup>[7]</sup>; 2010 年,他们实现了 THz 发射和接收端皆为 MMIC 芯片的全电子学太赫兹通信系统,通信波段和速率仍然为 0.12 THz 和 10 Gbit/s,地面环境通信距离达 5.8 km<sup>[8]</sup>; 2011 年,德国 Ingmar Kallfass 等报道了基于 InP mHEMT

(metamorphic High-Electron Mobility Transistor)工艺制造的太赫兹单片集成电路(Terahertz Monolithic Integrated Circuits, TMIC)芯片收发前端的 0.22 THz 波段太赫兹通信系统,通信速率为 25 Gbit/s,传输距离为 0.5 m; 2012 年,他们将该系统传输速率提升至 30 Gbit/s,距离提升至 10 m 以上<sup>[9-10]</sup>;美国贝尔实验室则在 2011 年搭建了 625 GHz 的太赫兹通信系统,通信速率达 2.5 Gbit/s<sup>[11]</sup>; 2013 年,S. Koenig 等则报道了光电变换的发射机(光学 梳状谱+UTC-PD)和 mHEMT TMIC 接收机芯片,基于正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK), 8QAM(Quadrature Amplitude Modulation,正交振幅调制), 16QAM 多元调制体制,在 0.24 THz 实现了 100 Gbps 速率、20 m 距离的无线传输和离线软件解调,创造了新的世界纪录<sup>[12]</sup>; 2016 年,J.Y. Suen 论证了 Tbps 量级的 太赫兹卫星通信,进一步拓展了太赫兹通信应用范围<sup>[13-14]</sup>;2017 年,M.F. Hermelo 等实现了 325 GHz 频段 59 Gbps 的相干光纤无线电通信<sup>[15]</sup>。

国内: 2011 年,中国工程物理研究院基于太赫兹电子学半导体器件,采用"16QAM 高速矢量调制+谐波混频+放大"的高速信息传输技术,研制了国内首个 0.14 THz/10 Gbps 高速通信传输系统实验样机,完成了 500 m 距离无线实时传输和软件化事后解调实验<sup>[16]</sup>;2012 年中国工程物理研究院进一步实现了 0.34 THz 16QAM 3 Gbps 的实时解调通信系统,完成了 50 m 无线传输实验,当传输速率为 3 Gbps 时,误码率优于 1×10<sup>-6[17-18]</sup>;2015 年,完成 0.14 THz 频段的太赫兹通信极化复用验证,实现了 2×40 Gbps 的无线通信,极大地提升了系统的通信容量<sup>[19]</sup>;2017 年完成了 21 km,5 Gbps,0.14 THz 无线通信系统设计与试验<sup>[20]</sup>,并开展了太赫兹通信中高速数字信号的并行 化处理研究<sup>[21]</sup>,进一步提升了高速太赫兹通信的实用化水平;中科院上海微系统所信息功能材料国家重点实验 室曹俊诚研究团队通过直接调制量子阱激光器,在 4.1 THz 实现了 2 m 太赫兹数字信号传输<sup>[22]</sup>。

从发展历程来看,太赫兹通信技术主要从通信频段、通信速率和传输距离寻求突破,远距离和高速率通信是研究者们不断追求的目标。经过不到十年的发展,太赫兹通信系统的载波频率不断提高,传输速率大幅提升,通 信距离不断拉长,收发系统逐渐集成化,已然展现了太赫兹通信系统频率资源丰富、大宽带和轻小型化等优点, 为太赫兹通信技术的广泛应用奠定了坚实的基础。但是,单一通过加载大宽带信号来提高通信速率的方法,对太 赫兹器件和通信信号处理都带来了极大的挑战。其实,S. Koenig 等报道的高达 100 Gbit/s 的太赫兹通信系统就已 采用了频分复用的方法<sup>[12]</sup>;林长星等在 0.14 THz 的极化复用方法的应用<sup>[20]</sup>,则显示了复用方法对通信容量提升 的重要作用。未来,对太赫兹通信信道复用方法的研究显得愈加重要。

除了传统的频分复用和极化复用等方式,近几年,基于 OAM 的模分复用方法则获得了国内外研究者的极大 关注。将其用于微波和激光通信,可将系统容量分别提升至几十 Gbit/s<sup>[4]</sup>和 Tbit/s<sup>[5]</sup>。太赫兹波处于微波和光学波 段中间,借鉴微波和光学段的相关研究和应用成果,推动太赫兹波段 OAM 的通信应用研究,有望进一步提升太 赫兹波段的通信系统容量。OAM 光束具有螺旋状的截面相位结构 exp(-i/q),其中 q 为方位角,l 为量子化的拓 扑荷,可用来表征 OAM 的本征态。不同 l 的 OAM 光束是互相独立的,可以沿着同一条轴线传播,并能够以很 低的信道串扰进行分离。因此,相同频率的 N 个 OAM 光束可以同轴传输 N 路信号,从而使通信容量和频率使用 效率提升 N 倍。由于 l 互相正交,并可取任意整数,理论上,OAM 光束可以无限复用<sup>[23-25]</sup>。从 OAM 被发现到 现在,人们已经对 OAM 的特性以及各个频段的 OAM 产生、合并、传输、分离和应用技术进行了广泛的研究<sup>[26-31]</sup>。 而在通信应用领域,王健等则在 2012 年报道了自由空间中 1.55 µm 波段的高达 Tbit/s 的 OAM 模分复用实验<sup>[32]</sup>; 2013 年, N. Bozinovic 等报道了光纤中的 Tbit/s 的 OAM 模分复用实验结果<sup>[33]</sup>; 2016 年,Y. Ren 等将光学频段 OAM 通信距离提升至 120 m<sup>[34]</sup>; 2014 年, Yan Yan 等将 OAM 模分复用拓展到微波频段,实现了 28 GHz 波段的 高达 24 Gbit/s 通信实验验证,传输距离为 2 m<sup>[4]</sup>。

虽然 OAM 模分复用方法可以大大提升通信系统的容量,但应用过程中所暴露的问题也不容忽视<sup>[35]</sup>:在微波 通信中,微波波长一般在毫米量级以上,对产生组件的精确度要求较低,传输介质干扰较小。但高速通信中相对 带宽较宽,会产生较强的模间串扰,而微波光束发散角较大,一定距离传输以后探测区域较大,不便于远距离情 况下信道的分离和探测<sup>[36]</sup>。在光通信中,远距离传输将面临 OAM 产生组件的面型精确度不够和大气湍流的干扰 等造成的模间串扰<sup>[37-38]</sup>。

#### 2 太赫兹 OAM 通信应用优势分析和系统架构

太赫兹波处于微波和光学波段中间,OAM 模分复用方法在该波段的使用具有明显的优势。和微波相比,太 赫兹波可承载带宽大,但频率高,相对带宽较小,宽带信号造成的信道串扰较小;远距离传输后太赫兹光斑较小, 有利于 OAM 光束的分离和探测。和光波相比,大气湍流影响较小,可进行远距离低干扰传输。可以预见,OAM 模分复用方法在太赫兹通信技术的应用将给自由空间无线通信领域带来巨大的飞跃。 由于太赫兹频段高频的特点,太赫兹 OAM 通信宜沿用文献[4-5]中的系统架构,如图 1 所示。在发射端,多路太赫兹频段发射机加载高速通信信号,分别经过不同 OAM 产生器件,如螺旋相位波板(Spiral Phase Plate, SPP),形成不同拓扑荷的太赫兹 OAM 通信信道,这些通信信道波束经过合束器(一般为半透半反器件组合)合束并复用,最终通过抛物面等发射天线发射到自由空间。在接收端,接收天线完成全部 OAM 波束的接收、压缩,然后经过分束器(一般为半透半反器件组合)分成多路信号,各路信号经过与发射端相反拓扑荷的 OAM 产生器件,将带有OAM 的波束转换为拓扑荷为 0 的波束,从而实现 OAM 信道的分离,最终通过太赫兹频段接收机接收并进行信号处理。



Fig.1 Architecture of the terahertz OAM communication system 图 1 太赫兹轨道 OAM 通信方法系统架构

限于技术发展的进程,目前还没出现在太赫兹波段的 OAM 模分复用高速通信实验验证报道。但出现一些太 赫兹频段 OAM 产生和转换方法的研究。王健在武汉光电国家实验室带领团队采用 3D 打印技术制备了太赫兹波 段的 SPP,并用耿氏振荡管产生的 0.1 THz 和 0.3 THz 连续太赫兹波初步研究了几十厘米传输距离内 OAM 光束 的产生、分离和转换过程<sup>[39-40]</sup>。3D 打印技术可以方便快速地形成太赫兹波段的 SPP,但太赫兹波波长在 1 mm 左右,而 3D 打印技术的精确度为 0.05 mm 左右,实验表明,这种方式产生的 OAM 光束间的串扰高达 12 dB, 可见 OAM 光束产生和分离组件的面型精确度对模间串扰噪声影响很大。除了采用 SPP 形式,2017 年,A. Stefani 等提出采用扭中空光纤实现了太赫兹 OAM 波束的产生和转换<sup>[41]</sup>,而太赫兹频段的超表面器件也获得了初步的研 究,不同材料和结构的超表面在理论和实验上被证实可以用来进行太赫兹 OAM 光束的产生和分离<sup>[42-45]</sup>。可以预 见,基于超表面或超材料的器件将是太赫兹 OAM 光速产生、转换和分离的主要器件。

尽管太赫兹通信技术和 OAM 模分复用方法在实验上和理论上都得到了很多研究,但二者结合过程的研究还 相当不够深入和全面,并不能满足实际要求,如远距离大带宽太赫兹通信。另外,OAM 模分复用方法在微波波 段应用的众多局限很容易让人认为它在太赫兹波段也具有相似的局限。太赫兹波频率比微波高 10 倍到 100 倍, 具有很多光学波段的性质,很多微波和光学波段的局限在太赫兹波段可能已影响很小,但会涌现出新的局限,所 以很有必要对太赫兹波段可能面临的众多局限进行系统的理论研究和一定的实验研究,以弄清 OAM 模分复用方 法在太赫兹通信中的应用潜力,为太赫兹通信容量的提升提供一条好的途径。

# 3 太赫兹 OAM 通信方法应用研究分析

根据香农公式,传输信道的容量和该信道的信噪比与带宽相关。在接收端灵敏度和收发天线增益一定的情况下,要提升通信距离,需要保证接收信号的功率。因此,要实现远距离大容量太赫兹波段 OAM 模分复用,降低 通信链路的模间串扰噪声和功率损耗是研究重点。根据对太赫兹轨道 OAM 通信应用系统架构的分析,存在多个 因素导致模间串扰噪声和信道功率损耗,在理论和实验研究上还有很多问题亟待完善和解决:

1) OAM 光束产生和分离组件参数的影响: OAM 光束产生和分离组件参数主要包括组件的面型分布参数、 面型精确度和尺寸, 面型分布设计不合理、面型精确度太低、尺寸不能覆盖太赫兹 OAM 光束等都会导致 OAM 光束量子态不纯(形成信道串扰)和严重的功率损耗。这方面的影响随通信系统载波频率而不同,太赫兹频段的 OAM 通信要求有多高需要进一步研究。

2) 光束失准的影响:OAM 光束的分离对信道中不同拓扑荷光束的同轴传输要求较高,所以在信号发射端,不同拓扑荷的OAM 光束之间微小的夹角和离轴将导致严重的模间串扰和信道功率损耗;在信号接收端,OAM 光束分离组件的倾斜和离轴也会带来严重的模间串扰和功率损耗,这两方面因素统称为光束失准。光束失准的影响随着通信距离拉长而越来越严重。太赫兹波长为1 mm 左右,太赫兹光束通过馈源天线、OAM 产生和分离组件后的传输和演化过程有别于微波和光学波段光束,亟需寻求直观、精确和计算省时省资源的理论模型来同时研究短至几十厘米和远达上千米的通信链路中光束失准的影响。

3) 长距离传输光斑变大的影响:随着系统通信距离拉长,不仅上述因素导致的模间串扰和功率损耗越来越 严重,太赫兹光束特性的演变(从辐射近场到辐射远场)以及光斑的变大,也给 OAM 光束的分离带来挑战,需要 建立远场太赫兹传播演化模型,并研究有效的远场大光斑太赫兹波段 OAM 光束的分离方法。

要系统地研究这些因素,不仅要借鉴微波和光学波段的研究成果<sup>[4-5,23-38]</sup>,还要根据太赫兹波段的特点,建 立相应的理论模型,进行理论分析和仿真模拟(可参考文献[31]的研究方法和结论)。然后对通过太赫兹馈源天线 和 SPP 的太赫兹波辐射近场和远场分布进行三维建模,并建立太赫兹光束分布和 OAM 量子态分布以及模间串扰 和功率损耗之间的联系,同时在实验上开展初步的验证工作。因为太赫兹光束三维分布包含太赫兹场的所有信息, 这样的分析有助于获取 SPP 参数、光束失准和通信距离对太赫兹 OAM 量子态分布的影响,理清 OAM 模分复用 过程主要的模间串扰和功率损耗来源,并寻求解决方案,为远距离大宽带的太赫兹波段 OAM 模分复用方法奠定 基础。

### 4 总结

OAM 通信复用方法在提升通信系统容量方面具有很大的潜力。利用太赫兹频段已有的通信系统的优势,进行太赫兹 OAM 通信方法研究,可望进一步提升太赫兹通信系统的通信容量,扩展太赫兹通信系统的应用范围。 通过对太赫兹频段通信系统和 OAM 通信复用方法的研究梳理和分析,理清了太赫兹 OAM 通信复用方法中存在 的通信串扰和通信距离问题。未来需要对光束失准、远距离 OAM 波束压缩和分离方法等进行研究,促进太赫兹 OAM 通信系统的应用。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG X C, XU J. Introduction to THz wave photonics[M]. New York: Springer, 2010.
- [2] 姚建铨,钟凯,徐德刚.太赫兹空间应用研究与展望[J]. 空间电子技术, 2013,10(2):1-16. (YAO Jianquan,ZHONG Kai, XU Degang. Study and outlook of terahertz space applications[J]. Space Electronic Technology, 2013,10(2):1-16.)
- [3] LEWIS R A. Terahertz physics[M]. Cambridge:Cambridge University Press, 2013.
- [4] YAN Y,XIE G,LAVERY M P J,et al. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Communications, 2014(5):4876.
- [5] HUANG H,XIE G,YAN Y,et al. 100 Tbit/s free-space data link using orbital angular momentum mode division multiplexing combined with wavelength division multiplexing[C]// 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference(OFC/NFOEC). Anaheim,CA,USA:IEEE, 2013:1-3.
- [6] PIESIEWICZ R,ISLAM M N,KOCH M,et al. Towards short-range terahertz communication systems:basic communications[C]// 2005 18th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications. Dubrovnik,Croatia:IEEE, 2005: 1-5.
- [7] 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.
- [8] HIRATA A,KOSUGI T,TAKAHASHI H,et al. 5.8-km 10-Gbps data transmission over a 120-GHz-band wireless link[C]// 2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems(ICWITS). Honolulu,HI,USA:IEEE, 2010:1-4.
- [9] KALLFASS I,ANTES J,SCHNEIDER T,et al. All active MMIC-based wireless communication at 220 GHz[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(2):477-487.
- [10] ANTES J,KONIG S,LEUTHER A,et al. 220 GHz wireless data transmission experiments up to 30 Gbit/s[C]// 2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Montreal,QC,Canada:IEEE, 2012:1-3.

- communication applications[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Anaheim,CA,USA:IEEE, 2010:1328-1331.
  [12] 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.
- [13] SUEN J Y,FANG M T,DENNY S P,et al. Modeling of terabit geostationary terahertz satellite links from globally dry locations[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015,5(2):299-313.
- [14] SUEN J Y. Terabit-per-second satellite links: a path toward ubiquitous terahertz communication[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2016,37(7):615-639.
- [15] HERMELO M F,SHIH P T B,STEEG M,et al. Spectral efficient 64-QAM-OFDM terahertz communication link[J]. Optics Express, 2017,25(16):19360-19370.
- [16] 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.)
- [17] 王成,陆彬,缪丽,等. 0.34 THz 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 front-end for wireless communication[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(6): 1530-1534.)
- [18] 张健,邓贤进,王成,等. 太赫兹高速无线通信:体制、技术与验证系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,12(1):1-13. (ZHANG Jian, DENG Xianjin, WANG Cheng, et al. Terahertz high speed wireless communications: systems, techniques and demonstrations[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(1):1-13.)
- [19] LIN C X,LU B,WANG C,et al. A 2×40 Gbps wireless communication system using 0.14 THz band ortho-mode transducer[C]//
  2015 40th International Conference on Infrared,Millimeter,and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Hong Kong,China:IEEE, 2015:1-2.
- [20] 吴秋宇,林长星,陆彬,等. 21 km,5 Gbps,0.14 THz 无线通信系统设计与试验[J]. 强激光与粒子束, 2017,29(6):1-4.
  (WU Qiuyu,LING Changxing,LU Bin,et al. Design and tests of 21 km,5 Gbps,0.14 THz wireless communication system[J].
  High Power Laser and Particle Beams, 2017,29(6):1-4.)
- [21] 郝鑫,汪朝晖,赵磊,等. 太赫兹通信中高速数字信号处理并行化算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(6): 881-884. (HAO Xin,WANG Chaohui,ZHAO Lei, et al. Parallel high speed digital signal processing algorithm in THz communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(6):881-884.)
- [22] 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.
- [23] ALLEN L,BEIJERSBERGEN M W,SPREEUW R J C,et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Physics Review A, 1992,45(11):8185-8189.
- [24] GIBSON G,COURTIAL J,PADGETT M J. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. Optics Express, 2004,12(22):5448-5456.
- [25] SHAPIRO J H,GUHA S,ERKMEN B I. Ultimate channel capacity of free-space optical communications[J]. Journal of Optical Networking, 2005,4(8):501-516.
- [26] THIDE B,THEN H,SJOHOLM J,et al. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain[J]. Physics Review Letters, 2007,99(8):087701.
- [27] MAHMOULI F E, WALKER S D. 4-Gbps uncompressed video transmission over a 60-GHz orbital angular momentum wireless channel[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2013,2(2):223-226.
- [28] GUO C S,LIU X,HE J L,et a1. Optimal annulus structures of optical vortices[J]. Optics Express, 2004,12(19):4625-4634.
- [29] 李志焕,吴福全,陈君,等. 涡旋光束旁瓣抑制的研究进展[J]. 激光杂志, 2013,34(2):1-4. (LI Zhihuan,WU Fuquan, CHEN Jun, et al. Research process of vortex beam sidelobe suppression[J]. Laser Journal, 2013,34(2):1-4.)
- [30] TENNANT A,ALLEN B. Generation of OAM radio waves using circular time-switched array antenna[J]. Electronics Letters, 2012,48(21):1365-1366.
- [31] XIE G,LI L,REN Y,et al. Performance metrics and design considerations for a free-space optical orbital-angularmomentum-multiplexed communication link[J]. Optica, 2015,2(4):357-365.
- [32] WANG J,YANG J Y,FAZAL I M,et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Photonics, 2012,6(7):488-496.

[11]

- [33] BOZINOVIC N,YUE Y,REN Y,et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. Science, 2013,340(6140):1545-1548.
- [34] REN Y,WANG Z,LIAO P,et al. Experimental characterization of a 400 Gbit/s orbital angular momentum multiplexed free-space optical link over 120 m[J]. Optics Letters, 2016,41(3):622-625.
- [35] WILLNER A E,REN Y,XIE G,et al. Recent advances in high-capacity free-space optical and radio-frequency communications using orbital angular momentum multiplexing[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2017,375(2087):20150439.
- [36] ZHANG Y,FENG W,GE N. On the restriction of utilizing orbital angular momentum in radio communications[C]// 8th International Conference on Communications and Networking. Guilin,China:IEEE, 2013:271-275.
- [37] CUI Q,LI M,YU Z. Influence of topological charges on random wandering of optical vortex propagating through turbulent atmosphere[J]. Optics Communications, 2014(329):10-14.
- [38] LI S,CHEN S,GAO C,et al. Atmospheric turbulence compensation in orbital angular momentum communications:advances and perspectives[J]. Optics Communications, 2018,408:68-81.
- [39] WEI X,ZHU L,ZHANG Z,et al. Orbit angular momentum multiplexing in 0.1-THz free-space communication via 3D printed spiral phase plates[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics(CLEO). San Jose,CA,USA:IEEE, 2014.
- [40] ZHU L,WEI X,WANG J,et al. Experimental demonstration of basic functionalities for 0.1-THz Orbital Angular Momentum (OAM) communications[C]// Optical Fiber Communication Conference. San Francisco,CA,USA:IEEE, 2014.
- [41] STEFANI A,FLEMING S C,KUHLMEY B T. Terahertz orbital angular momentum modes with flexible twisted hollow core antiresonant fiber[J]. APL Photonics, 2018,3(5):051708.
- [42] ZHOU H,DONG J,YAN S,et al. Generation of terahertz vortices using metasurface with circular slits[J]. IEEE Photonics Journal, 2014,6(6):1-7.
- [43] JIN J,LUO J,ZHANG X,et al. Generation and detection of orbital angular momentum via metasurface[J]. Scientific Reports, 2016(6):24286.
- [44] ZHAO H,QUAN B,WANG X,et al. Demonstration of orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing based on a metasurface in the terahertz band[J]. ACS Photonics, 2017,5(5):1726-1732.
- [45] SHI Y,ZHANG Y. Generation of wideband tunable orbital angular momentum vortex waves using graphene metamaterial reflectarray[J]. IEEE Access, 2018(6):5341-5347.

作者简介:

第6期



**王** 虎(1986-),男,江苏省连云港市人,博士,工程师,主要从事空间太赫兹应用技术研究.email:nwuwh@126.com.

段崇棣(1972-),男,西安市人,硕士,研究员,主要从事空间微波遥感技术研究.

朱忠博(1980-),男,山东省德州市人,硕士, 高级工程师,主要从事太赫兹通信技术应用基础 研究.

**陈** 刚(1980-),男,江苏省宿迁市人,博士, 工程师,主要从事微波目标特性研究.