



# 光通信中轨道角动量技术及应用前景分析<sup>\*</sup>

赖俊森, 吴冰冰, 赵文玉, 张海懿

(工业和信息化部电信研究院通信标准研究所 北京 100191)

**摘要:** 轨道角动量是未来进一步提升光网络容量的新型技术, 近几年逐步成为超高速光通信领域的研究热点。在介绍轨道角动量技术机理及最新研究进展的基础上, 进一步分析了轨道角动量所面临的技术挑战, 同时对其未来应用前景进行了探讨及展望。

**关键词:** 轨道角动量; 光通信; 前景分析

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.05.007

## Application and Analysis of Orbital Angular Momentum Technology in Optical Communication

Lai Junsen, Wu Bingbing, Zhao Wenyu, Zhang Haiyi

(Research Institute of Telecommunications Transmission (RITT),

China Academy of Telecommunication Research of MIT, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Orbital angular momentum, which is considered as a promising solution for future improvement of optical network capacity, has become a research focus in ultra-high speed optical communication. The principle and latest research progress of orbital angular momentum technology in optical communication were reviewed; the challenges and application prospect of the technology were also analyzed.

**Key words:** orbital angular momentum, optical communication, prospect analysis

### 1 引言

云计算、物联网、移动互联网等新兴技术和业务的高速发展对光传送网络的带宽容量提出了越来越高的要求。随着 40 Gbit/s 和 100 Gbit/s 等波分复用(WDM)传输系统的逐步商用, 光信号电磁波属性中的强度、频率(波长)、相位和偏振态等维度均已用于信号表征来提升单纤传输容量, 在现有基础上无法继续采用增加光信号电磁波表征维度的方式进行扩容, 只能通过诸如光谱滤波频谱压缩、提高调制速率或者调制阶数的方法来进一步提高频谱效率,

由于受到非线性香农极限和实际传输距离等限制, 这些技术很难带来单纤传输容量的突破性提升, 未来单纤传输容量的增加面临严峻挑战。

因为光信号具有波粒二象性, 业界开始研究是否可以采用光粒子特性进行光通信传输容量扩容, 其中的轨道角动量(orbital angular momentum, OAM)为可选参数之一。本文在介绍 OAM 技术原理和最新研究进展的基础上, 进一步分析了 OAM 技术在研究及应用中所面临的技术挑战, 同时对于 OAM 技术在未来光通信领域的应用前景进行讨论及展望。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(No.61171076, No.61201260), 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2012AA011303, No.2013AA013402)

## 2 技术原理

自由电磁场空间的角动量线密度可以表示为  $j(r) = r \times p(r)$ , 其中  $p(r)$  为动量密度,  $r$  为传输距离。对于近轴光束, 角动量可分为两部分:  $J = \int j(r) dr = L + S$ , 其中,  $S$  为与光束偏振相关自旋角动量 (SAM),  $L$  为与光束空间相位相关的轨道角动量 (OAM)。光子自旋角动量的本征态为左、右旋圆偏振, 分别携带  $\pm h$  的自旋角动量, 利用光子的自旋角动量可以构建二维 Hilbert 向量空间。在相干光通信中, 通过利用单模光纤中两个正交偏振态 (分别对应左旋和右旋角动量) 进行双偏振复用, 已经实现了传输频谱效率的倍增。

Allen 等人 1992 年首次实验验证了轨道角动量的存在。轨道角动量来源于光波的螺旋相位波前, 故具有轨道角动量的光波也称为螺旋光 (optical vortices), 其光电场中每个光子携带有  $mh$  的轨道角动量,  $m$  为拓扑荷 (topological charge), 可取任意整数,  $+$  表示左旋,  $-$  表示右旋, 如图 1 所示。相比于传统的高斯光束 ( $m=0$ ) 的平面相位波前和脉冲光强分布, 携带轨道角动量的螺旋光 ( $m \neq 0$ ), 典型如拉盖尔-高斯 (Laguerre-Gauss, LG) 光束, 其光束沿轴向中心部分的光场平面中心存在光强暗点, 接收光场的强度分布为圆环型, 国外文献称甜甜圈型 (doughnut shape)。在与高斯光束进行干涉之后, 其光强分布变为螺旋条纹, 其中条纹的数量表征了  $m$  的阶数, 左旋和右旋表征  $m$  的符号。轨道角动量具有无限个本征态, 理论上可构造无限维的 Hilbert 向量空间, 如果能够充分利用光子 OAM 这个维度进行信息调制或复用, 可以显著提升单个光子携带的信息容量, 进而大幅提升单波长和单纤的传输容量。

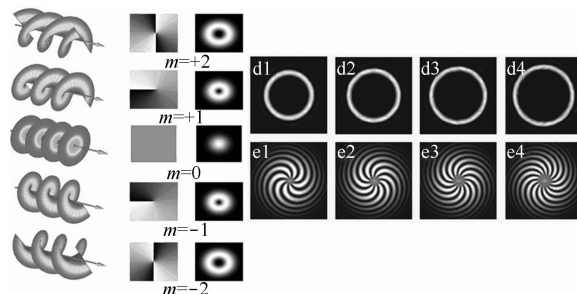


图 1 轨道角动量的螺旋光场、接收光强度分布和干涉条纹

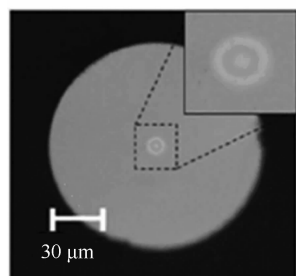
## 3 研究进展

Zeilinger 等人在 2001 年率先提出了 OAM 在量子通信中的可能应用, Padgett 等人在 2004 年提出了 OAM 在经典通信系统中的可能应用, 但并没有提出具体实验方案。近年来, 随着带宽容量不足问题的日益凸显, 理论上具有无限高阶复用维度的 OAM 光通信技术逐渐受到重视, 并成为超高速光通信领域的研究热点之一。现阶段 OAM 光通信的研究报道主要集中在以下 3 个方面:

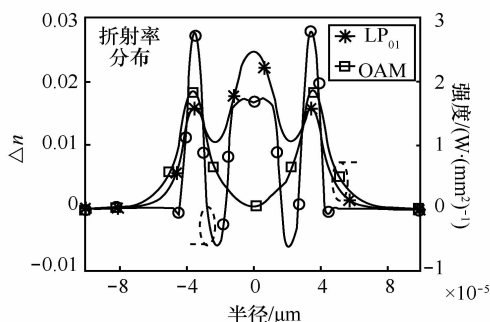
- OAM 模式的光纤传输;
- OAM 信号调制与复用;
- 大容量 OAM 空间光/光纤传输系统。

### 3.1 OAM 模式的光纤传输

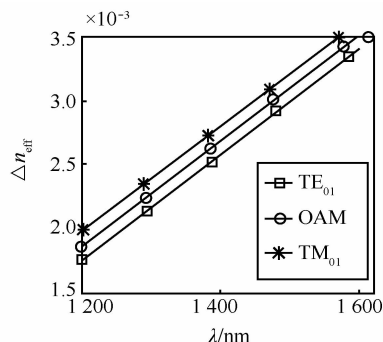
Bozinovic 等人在 2011 年首次提出了 0.9 km 螺旋光纤实现双 OAM 态光子传输<sup>[1]</sup>。OAM 光可以认为是高阶模的线性相移组合, 在标准单模光纤 (SMF) 中, 由于存在较强的模间耦合, 导致高阶模在传输过程中产生模式简并, 退化为基模, 破坏了 OAM 状态的稳定性。采用特殊折射率分布设计的螺旋光纤, 截面和折射率分布如图 2 所示, 可以对不同模式之间的传输常数进行显著的区别使其保持正交性, 减轻了模间耦合的影响, 可以实现串扰小于 20 dB 的 OAM 光纤长距离传输。



(a) 截面



(b) 折射率与光强分布



(c) 折射率

图 2 螺旋光纤的端面光强分布和等效折射率曲线



Golowich 等人在 2012 年提出了支持 OAM 光束传输的新型空气芯环型光纤结构<sup>[2]</sup>。通过采用环型空气芯光纤结构可以增强线偏振模向量的分离度,增大折射率对比度,从而保证 OAM 光的稳定传输。实验采用大半径(大于 $12\text{ }\mu\text{m}$ )环型结构光纤,可以支持超过 9 个 OAM 状态的稳定传输。

Yan 等人在 2012 年提出了具有方型纤芯和环型折射率分布的光纤结构<sup>[3]</sup>。高斯光束作为基模在方型芯区传输,通过两种不同结构波导之间的模式耦合在光纤的环型折射率区域内产生 OAM 光束并进行传输,控制输入信号光的相位和幅度,可以调制和复用多阶 OAM 光束。

由于 OAM 模式在普通单模光纤传输中将退化为基模,所以研发支持 OAM 长距离传输的新型光纤是制约 OAM 光通信技术发展的关键瓶颈。目前公开报道中基于环型波导芯区结构的多种新型螺旋光纤能够实现若干 OAM 模式的千米量级传输,但是其所能支持的 OAM 模式数量远少于空间光传输,并且在光纤材料、结构设计和特性分析等方面尚处于起步阶段,需要业界进一步深入研究。

### 3.2 OAM 信号调制与复用

Fontaine 等人在 2012 年提出了硅基光子集成电路(PIC)的 OAM 复用器<sup>[4]</sup>,圆环型孔阵列光栅耦合器级联星型耦合器,采用 SMF 尾纤输出,如图 3 所示。OAM 光垂直入射圆环光栅波导产生耦合,将方位角相位和幅度变化转换为空间相位分布,在星型波导耦合器中聚焦于不同的 SMF 端口输出,最高可以支持 32 阶的 OAM 光束的复用和解复用。

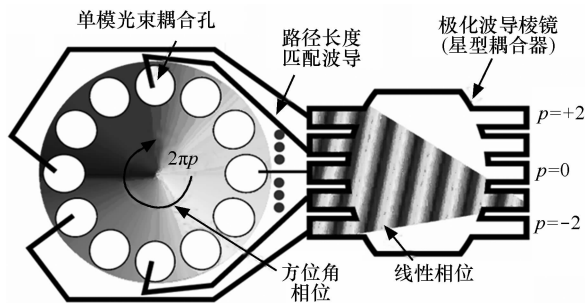


图 3 基于 PIC 的 OAM 复用器结构

Huang 等人在 2013 年提出了用于 OAM 空间光的光分插复用器<sup>[5]</sup>。以相位模板实现特定阶数的 OAM 光束和高斯光束间的转换,使用不同折射率分布的圆形光栅对 OAM 光束和高斯光束进行不同方向的反射实现上下路。对 100 Gbit/s 的 QPSK 调制的 OAM 空间光进行上下路时,引入的光信噪比(optical signal to noise ratio, OSNR)小于 2 dB。该课题组还提出了 OAM 空间光可调滤波器<sup>[6]</sup>。OAM 空间

光通过对数极化传输分类器解复用,在汇聚透镜的焦平面的不同位置处映射为长条形的光斑,位于焦平面的空间光调制器(spatial light modulator, SLM)中包含可编程的反射镜阵列,对应于各个 OAM 模式的空间位置,通过改变 SLM 的光栅图案,可以反射不同的 OAM 光束,使其二次通过分类器合束输出,从而实现 OAM 光束的带通或带阻滤波。

现有 OAM 调制与复用解复用技术已经能够实现不同 OAM 模式之间的分插复用和动态模式转换等基本网络功能,但是复用解复用器件在 OAM 模式到空间模式分布映射的过程中还存在光学器件结构复杂、尺寸过大集成度低以及多通道间隔度较差等一系列问题。

### 3.3 大容量 OAM 空间光纤传输系统

Wang 等人在 2012 年提出了利用 4 种不同角动量( $m=+4, +8, -8, +16$ ), 双偏振复用的 42.8×4 Gbit/s 的 16QAM 编码光信号调制与传输, 实现  $25.6\text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})^{-1}$  频谱效率的 1.37 Tbit/s 容量空间光传输<sup>[7]</sup>, 原理如图 4 所示。16QAM 调制的光信号, 在可编程叉形衍射光栅构成的螺旋相位模板和 SLM 组成的发射机中进行级联调制, 将强度高斯分布的连续光光束转换为具有不同 OAM 的螺旋光, 不同阶数的 OAM 光在空间分布上呈现为多组不同半径的同心圆环, 可以进行空分复用传输, 从而实现频谱效率和信道容量的提升。

Huang 等人在 2013 年提出了 24 阶 OAM 光束结合 42 波长 WDM 系统, 每波长支持 100 Gbit/s 的 QPSK 信号, 总信道容量达 100.8 Tbit/s 的空间光传输系统<sup>[8]</sup>, 系统结构和复用原理如图 5 所示。QPSK 调制的高斯光束在 SLM 中产生不同阶数的 OAM 光并实现空分复用, 对波长间隔为 100 GHz 的 WDM 系统使用 OAM 调制, 最终得到 42 波长的 24 组 OAM 光束(两个偏振态的 OAM $\pm 4, \pm 7, \pm 10, \pm 13, \pm 16, \pm 19$ )。空间光传输接收解调之后的纠错前  $BER < 3.8 \times 10^{-3}$ , OAM 复用串扰引入的 OSNR $< 1.8\text{ dB}$ 。

Bozinovic 等人在 2013 年提出了在长度为 1.1 km 的螺旋光纤中, 实现总容量达 1.6 Tbit/s 的 OAM 模分复用和 WDM 传输<sup>[9]</sup>。其中单波长速率为 80 Gbit/s (20G baud 的 16QAM 调制), 双偏振态 2 阶 OAM 复用, 10 波长 WDM 传输, 如图 6 所示。螺旋光纤纤芯具有圆对称的双折射率分布, 将基模和 OAM 模的等效折射率有效区分, 能够支持 OAM 模光信号的长距离传输, 光纤模式耦合引入的串扰小于 -10 dB。经过光纤传输之后, 在  $BER=3.8 \times 10^{-3}$  时引入的最大光功率代价为 2.5 dB, 主要来源于模间串扰和多径干扰。

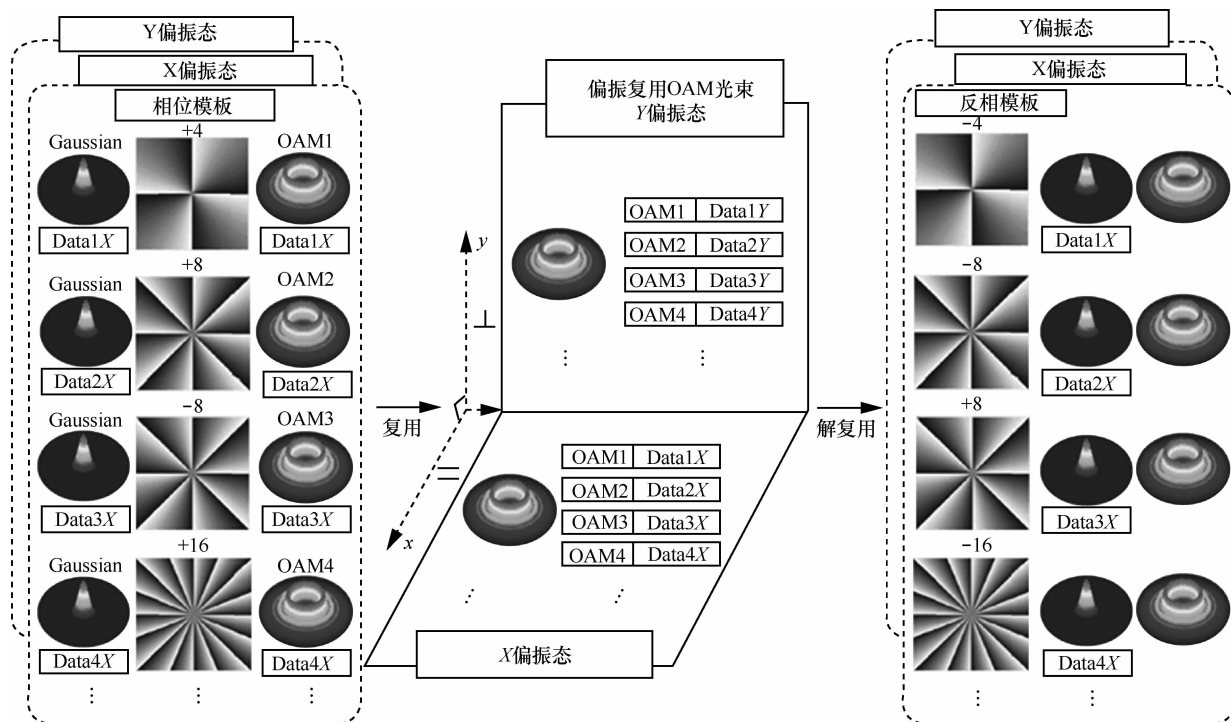


图 4 空间光 OAM 调制复用与解复用原理

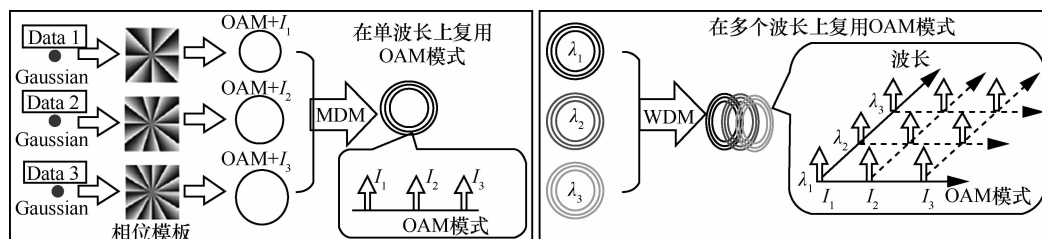


图 5 OAM 与 WDM 复用空间光传输系统

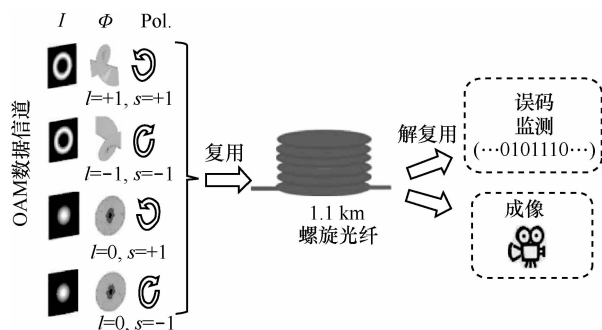


图 6 OAM 复用光纤传输实验系统

OAM 作为全新的信号调制复用维度,在提升光通信系统容量方面已显示出了巨大潜力,但现有的系统实验多集中于空间光传输,其中的接收机探测器数值孔径与 OAM 模式复用数量成正比,光学结构复杂且校准困难,而基于螺旋光纤的系统实验研究中 OAM 模式复用数量和传

输距离也都十分有限,这些限制都需要业界进一步深入研究解决。

#### 4 技术挑战与应用前景

虽然基于 OAM 调制的光传输系统实验研究已经取得了一定的进展,但是 OAM 技术在光通信系统中的研究和应用仍然存在很多挑战。首先,现网中使用的单模光纤,由于模间耦合和随机双折射导致的模式简并,将使 OAM 模式退化为基模,无法支持 OAM 光束的有效传输。尽管有研究报道基于特殊设计的螺旋光纤、多模多芯光纤或者环型折射率光纤能够支持 OAM 光束的传输,但其传输距离仅为千米量级,并且能够支持的 OAM 模式数量和空间光传输相比还很少,各种光纤在材料选择、结构设计、制备方法等方面还处在初步探索阶段,针对螺旋光纤的传输损伤和



非线性效应等方面的特性尚待深入研究。其次,目前 OAM 光束的调制产生和复用解复用主要依赖于分立的空间光学器件,如相位模板、衍射光栅和空间光调制器等,其结构复杂、插损大、调节困难,虽然基于光子集成技术的 OAM 器件研究取得了一定进展,但在结构设计和加工工艺等多方面还需要长期的积累,才能达到高效集成化的实用程度。最后,现有的 OAM 光通信系统研究均为近场空间光传输或者短距离点到点光纤传输,OAM 光传输与光传送网核心器件,如合分波器、掺铒光纤放大器(EDFA)和可重构光分叉复用器(ROADM)之间的适用性和可集成性还缺乏研究分析和实验验证。

基于 OAM 的光通信技术充分挖掘了光子信号的粒子特性,在轨道角动量这一全新维度实现光信号的调制复用,能够在现有基础上显著提升光通信系统的传输容量,从而满足未来网络流量带宽增长的需求,具有良好的技术前景和发展潜力<sup>[10]</sup>。目前的 OAM 光通信研究尚处于起步阶段,实验室研究还需要突破传输介质、调制解调器件、系统集成等多个关键技术瓶颈,产业化应用以现有的技术情况来看尚无明确的路线图和时间表。如果螺旋光纤制备和器件光子集成等关键技术取得突破性进展,基于光纤和 PIC 调制复用的 OAM 光传输将有可能转入实用化部署,并且对光传送网络未来传输容量的进一步提升带来与 WDM 技术类似的重大变革。

## 5 结束语

光网络带宽容量需求的持续增长促使人们寻找新的传输容量扩容手段,OAM 技术利用螺旋相位波前构造正交向量空间,理论上可以提供无穷高阶的信息调制维度,近年来受到业界越来越多重视。本文在介绍 OAM 机理的基础上,从传输介质、关键器件和系统集成 3 个方面对 OAM 技术在光通信中的研究及应用进展进行了总结,同时对于 OAM 应用挑战及发展前景进行了分析。OAM 技术为高速光传输提供了新的信号表征维度和调制复用方法,具有广阔的应用前景,并且现阶段的实验室研究也取得了一些重要进展,但是该技术目前仍处于探索阶段,有待于业界进一步的深入研究。

## 参考文献

- 1 Bozinovic N, Kristensen P, Ramachandran S. Long-range fiber-transmission of photons with orbital angular momentum.

Proceedings of 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Baltimore, Maryland, 2011

- 2 Golowich S, Kristensen P, Bozinovic N, *et al.* Fibers supporting orbital angular momentum states for information capacity scaling. Proceedings of Frontiers in Optics Conference, New York, USA, 2012
- 3 Yan Y, Yue Y, Huang H, *et al.* Efficient generation and multiplexing of optical orbital angular momentum modes in a ring fiber by using multiple coherent inputs. Optics Letters, 2012, 37(17): 3645~3647
- 4 Fontaine N K, Doerr C R, Buhl L L. Efficient multiplexing and demultiplexing of free-space orbital angular momentum using photonic integrated circuits. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition/ the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), Los Angeles, USA, 2012
- 5 Huang H, Yang Y, Yan Y, *et al.* Orbital-angular-momentum-based reconfigurable and lossless optical add/drop multiplexing of multiple 100-Gbit/s channels. Proceedings of OFC, Anaheim, California, 2013
- 6 Huang H, Ren Y X, Xie G D, *et al.* Tunable filter for orbital-angular-momentum multiplexed optical channels. Proceedings of CLEO, San Jose, California, 2013
- 7 Wang J, Yang J Y, Fazal I M, *et al.* Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. Nature Photonics, 2012, 6(7): 488~496
- 8 Huang H, Xie G D, Yan Y, *et al.* 100 Tbit/s free-space data link using orbital angular momentum mode division multiplexing combined with wavelength division multiplexing. Proceedings of OFC, Anaheim, California, USA, 2013
- 9 Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, *et al.* Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers. Science, 2013, 340(6140): 1545~1548
- 10 Willner A E, Wang J, Huang H. A different angle on light communications. Science, 2012, 337(6095): 655~656

## [作者简介]



赖俊森,男,博士,工业和信息化部电信研究院通信标准研究所工程师,主要研究方向为高速光传输与光网络技术。

吴冰冰,女,博士,工业和信息化部电信研究院通信标准研究所工程师,主要研究方向为高速光传输与光网络技术。

(下转第 54 页)