

OAM 光通信路由器件研究

郭忠义, 潘珍珍, 龚超凡, 王子坤, 郭凯, 周红平

(合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 随着轨道角动量 (OAM) 光通信技术的研究不断深入, OAM 路由器件在提升通信系统的灵活性和实用性方面扮演着重要的角色, 近些年, 具有特定功能的 OAM 路由器件的研究得到了飞速发展。基于此, 对近些年 OAM 路由器件的研究成果进行了概述, 对其中可实现信道切换、多播、滤波、添加/提取、跳变和模式划分 6 类 OAM 路由器件的原理、研究方法及优缺点进行了讨论与总结, 同时对 OAM 路由器件未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 轨道角动量; 自由空间光通信; OAM 路由器件; 信道复用

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020184

Research on router device of OAM optical communication

GUO Zhongyi, PAN Zhenzhen, GONG Chaofan, WANG Zikun, GUO Kai, ZHOU Hongping

School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract: With the development of orbital angular momentum (OAM) based optical communication technology, OAM router played an important role in improving the flexibility and practicability of OAM communication system. In recent years, the research on multifunctional OAM router had also been developed rapidly. Based on this, the research results on the OAM router had been summarized and reviewed, in which the principles, research methods, advantages and disadvantages of six types of OAM router, with the functions of switching, multicast, filtering, adding/extraction, and jumping and mode dividing respectively, had been discussed and summarized in details. Meanwhile, the future developing trend of the OAM router has also been prospected and discussed in the end.

Key words: orbital angular momentum, free space optical communication, OAM router device, channel multiplexing

1 引言

近年来, 随着物联网、云计算和视频电话等大流量业务的迅速增长, 人们对高速率、大容量通信的需求越来越大。可以预见, 在不久的将来, 信息的需求势必会持续扩增, 这也将给现有的通信技术带来严峻的挑战。在自由空间光通信领域, 目前常采用波分复用、偏分复用和时分复用等多维度复用技术提高系统容量。然而, 近些年这些维度资源的开发几乎达到极限, 开发更多的通信资源维度扩充

通信容量已成为亟须研究的课题^[1-7]。目前, 一个全新的研究思路是利用空间维度进行多路复用^[8-13], 其中, 基于轨道角动量 (OAM, orbital angular momentum) 的光通信技术成为如今光通信领域的研究热点之一。

角动量可分为自旋角动量 (SAM, spin angular momentum) 和 OAM 这 2 种。SAM 与波束的偏振特性有关, OAM 与波束的空间分布特性相关。这种特殊的空间分布在光学^[14-21]、电磁学^[22-27]、声学^[28-31]和力学^[32-33]等领域有着一定的应用前景, 因此吸引

收稿日期: 2020-05-26; 修回日期: 2020-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61775050); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.PA2019GDZC0098)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61775050), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.PA2019GDZC0098)

着研究者的关注。1992 年, Allen 等^[34]通过实验证实了具有螺旋形相位波前的光束携带 OAM, 由于光束中心存在相位奇点, 光场在相位奇点处相干相消, 呈现出中心光场强度为 0 的涡旋环状场强分布, 因此携带 OAM 光束也常被称为涡旋光束, 其携带着相位因子 $\exp(i l \Phi)$, 其中 l 被称为拓扑荷数或 OAM 模式值, 理论上可以为任意值; Φ 为方位角, 并且每个光子携带 \hbar 的 OAM, \hbar 为约化普朗克常数。理论上由于 OAM 模式可以取任意值; 且携带不同 OAM 模式值的 OAM 光束之间相互正交, 因此, 不同 OAM 光束可进行无干扰的复用传输和有效的解复用, 使减缓光通信领域的容量危机成为可能。

高质量 OAM 光束是 OAM 光通信系统的基础。目前, 生成 OAM 光束的主要方案分为有源和无源两类。有源方案通过对激光腔进行设计, 使激光在选定模式上震荡, 获得质量较好的 OAM 光束。例如, 利用激光增益介质的热透镜效应进行横向模式选择^[35], 或是插入特殊设计的元器件等^[36-37]。无源方案在激光腔外, 通过螺旋相位板^[38-40]、空间光调制器 (SLM, spatial light modulator)^[41-42]、数字微透镜^[43]、超材料^[44-46]等转换器件, 将高斯光转化成 OAM 光束。无源方案实验相对简单, 特别是基于空间光调制器、数字微透镜等衍射光学元件的方案更加灵活, 针对不同的通信需求, 可以通过修改加载在光学元件上的相位信息对 OAM 光束进行调控。因此在目前的 OAM 光通信系统中, 无源方案占据 OAM 光束产生方案的主流^[38-46], 并推动着 OAM 光通信相关研究不断向前发展。

随着 OAM 光束在光通信领域研究的不断深入, 目前对于 OAM 光束在自由空间光通信方面的应用机制主要包括 2 种: OAM 键控 (OAM-SK, OAM-shift keying)^[47-51] 和 OAM 信道复用 (OAM-DM, OAM-division multiplexing)^[52-62]。OAM-SK 是将 OAM 模式本身作为编码信息, 不同的 OAM 模式值代表不同的数据比特, 以实现数字信号到 OAM 模式的相互映射; OAM-DM 是将不同的 OAM 光束作为调制信号的载波以实现信道的多路复用。对于一个成熟的通信系统, 不同信道的变换和操控对提升系统的灵活性和实用性有着重要的作用, 目前这种实现系统端到端信号传输路径变换的路由技术也是 OAM 光通信的研究重点之一^[63-64], OAM 路由器件也因此得到了广泛的研究和卓有成

效的发展。凭借着 OAM 光束间的正交性, 在不同的 OAM 光束进行复用和解复用时可以对传播的 OAM 模式值、传输所占用的空间域位置和传输方向等进行有效调控, 因此在网络中的不同节点处可实现不同路径选择的路由功能。在此基础上, 如图 1 所示, 一系列可实现信道切换、多播、滤波、添加/提取、跳变和模式划分功能的 OAM 路由方案相继诞生, 大大提升了 OAM 光通信系统的灵活性和实用性, 推动着 OAM 光通信技术不断走向成熟。

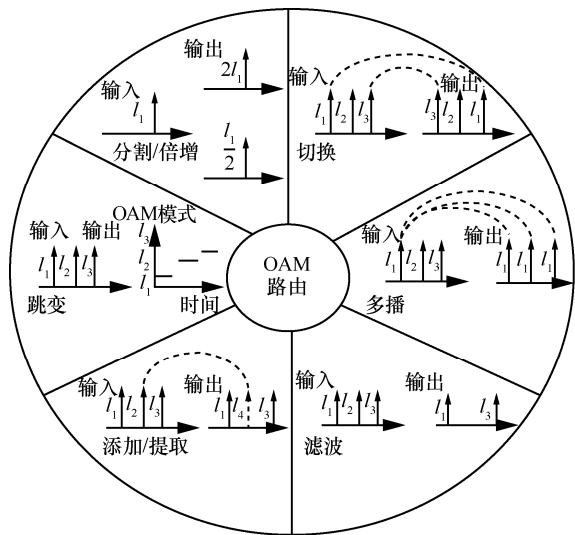


图 1 OAM 路由功能示意

本文聚焦于 OAM 路由领域, 详细阐述分析了以 OAM 路由器件为核心的可实现信道切换、多播、滤波、添加/提取、跳变和 OAM 模式分割/倍增共 6 类功能的 OAM 路由方案在近些年研究成果, 最后对 OAM 路由器件的研究历程进行了总结, 并对其未来的发展前景进行了展望。

2 可实现信道切换的 OAM 路由器件

在 OAM 光通信网络中, 通过对不同的数据通道进行有选择的操控, 可以大幅扩展 OAM 通信链路的传输效率。其中一种可实现信道切换的 OAM 路由器件可对输入光束进行 OAM 模式值的切换操作, 从而实现所搭载数据信号之间的有效切换。2012 年, Wang 等^[65]利用 SLM 对这种 OAM 信道切换方案进行了实验演示, 其方案原理如图 2(a)所示, 该方案将 2 个携带不同数据 (100 Gbit/s) 且不同 OAM 模式值 (l_1, l_2) 的光束入射到一个加载 OAM 模式值为 $l_R = -(l_1 + l_2)$ 的反射型 SLM 上, 此时 OAM

光束的模式值被转换成 $-l_2$ 、 $-l_1$, 然后经过 SLM 的反射转换, 最终以较小的功率代价实现了两路 OAM 信道所携带数据信息的切换。随后, 该团队利用实验验证了这种 OAM 交换机系统的可行性^[66], 实验中将连续激光通过差分相移键控调制器, 生成 100 Gbit/s 的信号并利用光纤时延分成两路, 分别对应 2 种不同的 OAM 模式, 最后将这两路 OAM 模式的数据进行交换。实验结果表明, 当误码率为 1×10^{-9} 时, 其功率损失低于 2.4 dB。该研究内容在 OAM 光通信业界产生了极其重要的影响, 为后续研究者在路由器件的设计上提供了新思路。但是该方案只是为实现两束光束间的数据切换的初步尝试, 并未针对多个 OAM 光束切换的情况进行实验, 因此仍有很大的提升空间。

2013 年, Ahmed 等^[67]研究了一种 2×2 构型的可重构 OAM 信道切换器, 通过利用多个 SLM 将 OAM 复用光束在空间中进行分离, 并将分离开的光束进行重新定向, 最后可以有选择地将 OAM 光束重新发送到不同的输出端。图 2(b)为 2×2 构型的 OAM 切换器的原理架构, 该切换器可以为每个输入的 OAM 光束进行重新定向或是直接通过。其中切换器的输入端和输出端各有 2 个, 首先将输入的多路复用 OAM 光束进行模式下转换, 即将 OAM 光束转换为类高斯光束, 此时其他 OAM 光束的模式值也发生相应改变。其次利用特殊设计的光束控制相位模式在空间上将高斯光束和 OAM 光束分离, 并实现高斯光束与另一条路径上 OAM 光束的同轴复合。最后再利用可编程 SLM 对复合光束进行模式上转换, 其中心和外围相位对应不同的 OAM 模式, 能够将高斯光束恢复为相应的 OAM 光束, 完成复合光束的模式上转换和双 OAM 信道的切换。该课题组将两束 OAM 模式分别为 $l=+4$, -4 和 $l=+2$, -6 的复用光束分别应用在输入端口 A 和 B, 经过系统切换后两种复用光束可完成 OAM 模式的任意切换, 信噪比低于 2.5 dB。这种能灵活操控复用光束携带的 OAM 模式的器件可大大扩展 OAM 通信链路的实用性, 为此后 OAM 路由器件的研究奠定了基础, 也使越来越多的研究人员对可实现切换功能的 OAM 路由器进行了更加深入的研究。

为了进一步提高 OAM 光通信网络的灵活性, 2013 年, Willner 等^[68]实现了如图 2(c)所示的不同 OAM 模式与不同偏振模式之间的切换。该方案针

对将偏振复用信号转换为 OAM 复用信号的问题, 只需先使用偏振分束器对光束分离, 一束利用 SLM 进行向下转换为高斯光束, 另一束利用半波片进行偏振旋转 90° 使两束光的偏振态保持一致, 再使用 SLM 将两束光束转换为携带目标 OAM 模式的光束。当输入信号为具有相同偏振态的 OAM 复用信号时, 需先将其中一束 OAM 光转换为高斯光束, 另一束保持环形, 随后将这两束光发射到加载了特殊设计全息图的 SLM 上, 使两束光被衍射到不同的方向并携带相同的 OAM 模式, 最后再利用偏振分束器实现两束 OAM 光束的偏振复用。对于 100 Gbit/s 的正交相移键控 (QPSK, quadrature phase shift keying) 数据通道, 该方法带来的功率损耗小于 1 dB, 而且还可以通过增大 OAM 模式值间隔进一步减小误码率。值得一提的是, 该方案不仅能实现 OAM 模式复用和偏振复用数据信道的重新配置, 还能同时改变光束的 OAM 模式和偏振模式, 在提升灵活性上为 OAM 光通信网络的设计提供了一种新方案。

除了在不同偏振模式上的切换, 研究人员后续又把目光放到了空间位置的切换上。2016 年, Liu 等^[69]提出了一种可重构的 OAM 模式和空间切换的方案, 如图 2(d)所示, 该方案通过利用多个 SLM, 可实现对输入 OAM 光束模式值进行调控的同时, 对光束空间上输出位置的任意调控, 从而同步完成 OAM 模式切换、空间切换、联合 OAM 模式和空间切换的任务。该方案进一步扩展了光网络的利用范围, 提升了网络的操控灵活性, 但是由于过程中使用了多个 SLM, 增加了不同 SLM 上加载相位设计的难度, 并且增加了一定的系统复杂度和器件成本, 这对于对实时性和经济性要求较高的高速光通信链路系统有一定的制约因素。

上述工作主要利用 SLM 来实现 OAM 路由的功能, 尽管利用 SLM 生成 OAM 光束在转换效率、降低能耗方面具有优势, 但切换速度受到器件自身材料属性限制。现有空间光调制器的制作材料大多为液晶, 其刷新速率一般很难达到 1 kHz。此外, 液晶各向异性的结构特征, 使其对不同偏振态的入射光具有不同的响应, 即基于液晶材料的 SLM 对光束的调控具有偏振依赖的特点。数字微镜是一种新的衍射光学元件, 通过旋转反射镜实现光开关功能。数字微镜用于生成 OAM 光时, 切换速度能达到 15 kHz, 且成本更低。但是数字微镜的衍射效率

受微镜间隔和边长之比的限制，受制作工艺影响，其衍射率往往低于 SLM。大体上来说，当对转换效率要求较高时，应优先考虑 SLM；当对转换速率要求较高时，则优先考虑数字微镜。

2017 年，Lei 等^[70]提出了一种使用数字微镜代替 SLM 的 OAM 路由器。他们将该器件应用于一个如图 2(e)所示的基于 OAM 选择的数据互联的光通信链路系统，该光路由器使用了一个通过数字微镜驱动的二元光栅，打破了传统的 OAM 模式和衍射阶的对应关系，不仅可以实现输入 OAM 模式的相互切换，还可以进一步实现多播的功能。总体而言，该方案较好地实现了 OAM 信道切换的路由功能，同时还利用数字微镜的优势，大幅提升了切换速度。目前，人们对高速通信的需求日益迫切，这种高速率的 OAM 切换器恰恰符合人们的期望。

目前，可实现信道切换功能的 OAM 路由器件大多是通过控制 OAM 光束模式值的改变来切换不同信道传输的数据信息。随着 OAM 复用技术的不断发展，OAM 切换器也从以往只能进行 2 个 OAM 光束间的数据切换，发展成可以进行多个复合光束

之间的数据切换。并且，随着硬件技术的不断发展，OAM 器件的切换速度也得到了大幅提升，为其在网络中的应用增添了优势，使 OAM 切换器成了如今复杂光通信网络中的重要器件之一，并拥有广阔的发展前景。

3 可实现信道多播的 OAM 路由器件

多播技术可以将单一信道分散为多个信道，进而可将单信道上的数据多播发送到多个目的地，从而更好地适应多用户环境。目前，多播技术在传统光通信和 OAM 光通信领域得到了比较广泛的应用^[71-75]。对于 OAM 光通信系统而言，其中可实现多播功能的 OAM 路由器件扮演了重要的角色。2013 年，Yan 等^[76]通过利用经特殊设计的切片相位模式实现了 OAM 多播功能。如图 3(a)所示，当 OAM 光束入射到具有 n 次旋转对称的角振幅孔径上，所生成的新光束中会包括多种 OAM 光束成分，并且表征这些成分的 OAM 谱会呈现出类似 sinc 函数的分布模式。因此利用此特性，通过使用多种不同切片相位模式的叠加所构成的互补切片相位模式，可一次性产生功率

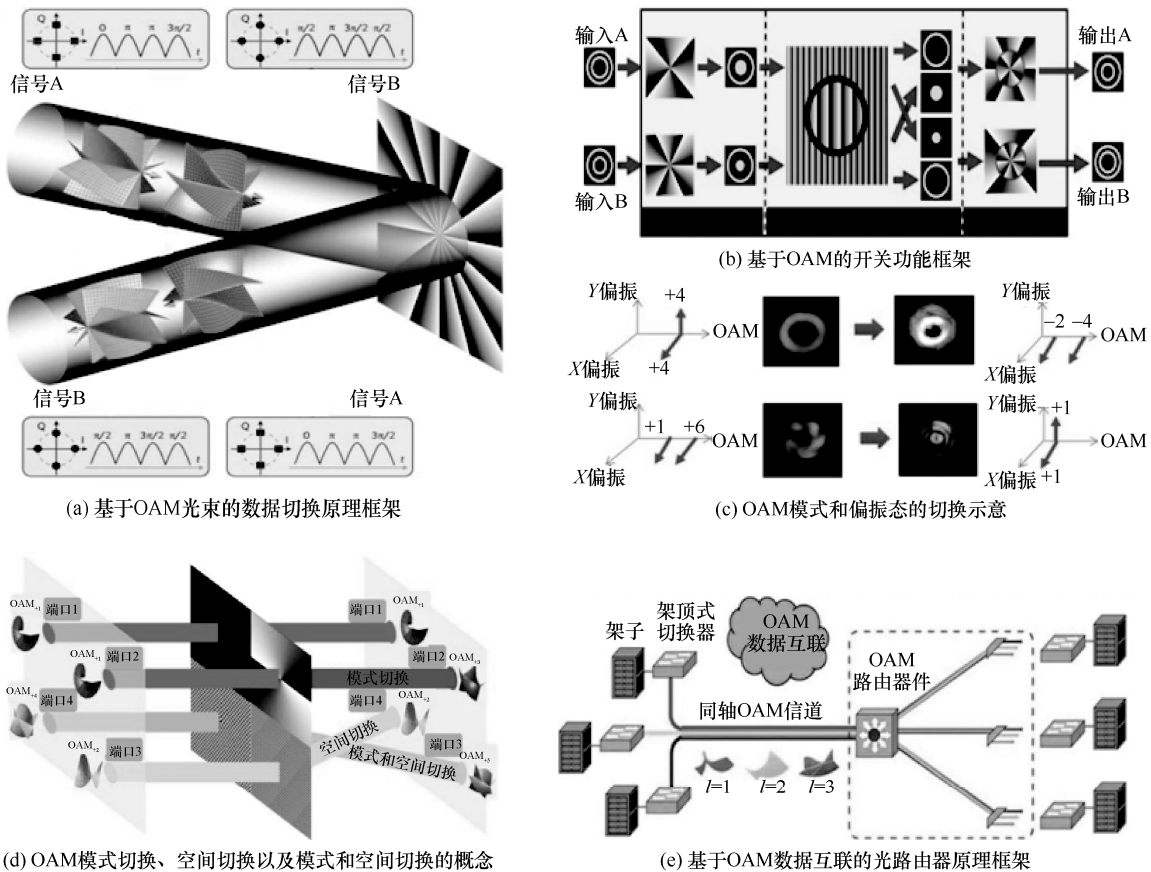
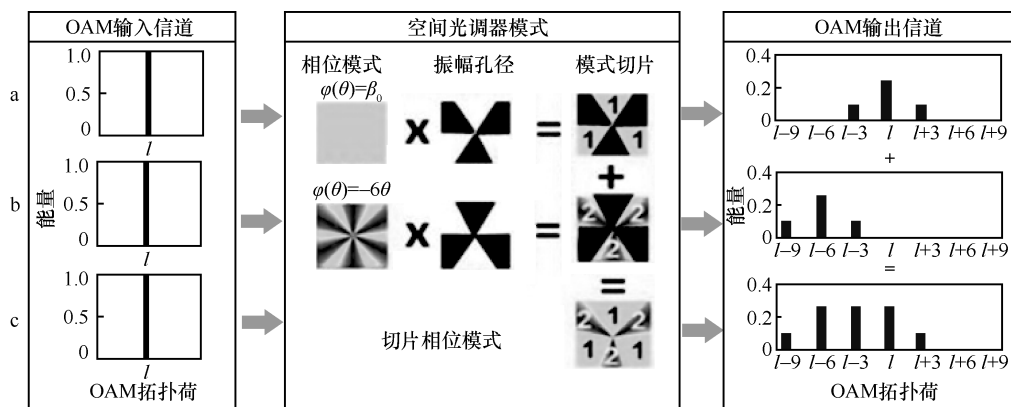


图 2 基于信道切换的 OAM 路由器件原理

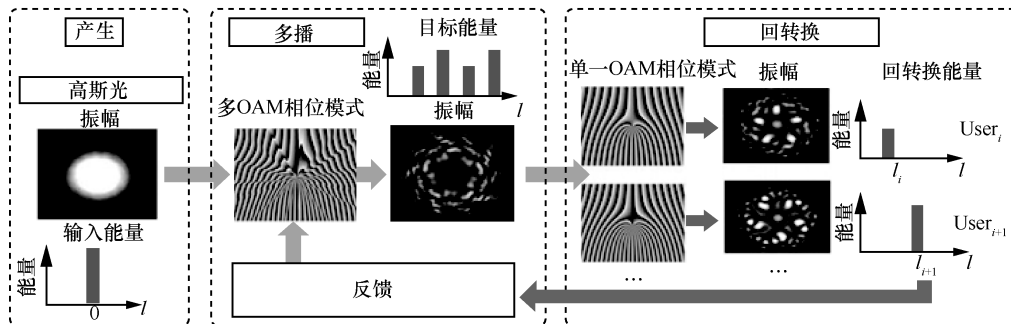
均衡分布的不同 OAM 光束成分,进而完成从单 OAM 光束向多个模间距相同的 OAM 光束的多播转换。该方案的显著优势在于可以在保持较低的功率损耗下生成所需的不同 OAM 模式,但是在实验过程中需要用到多个光学器件,设备集成性相对较低。

为提高系统的传输效率和设备集成性,增加路由器件在实际中的应用,针对真实应用场景中不同的用户可能会对所需的光束功率的要求不尽相同等情况,提升多播功能的灵活性迫在眉睫。2015 年, Li 等^[77]在他们先前的工作基础上提出了如图 3(b)所示的一种功率可调的多播方案,该方案可通过使用特殊设计的复杂相位图来生成功率可调的多

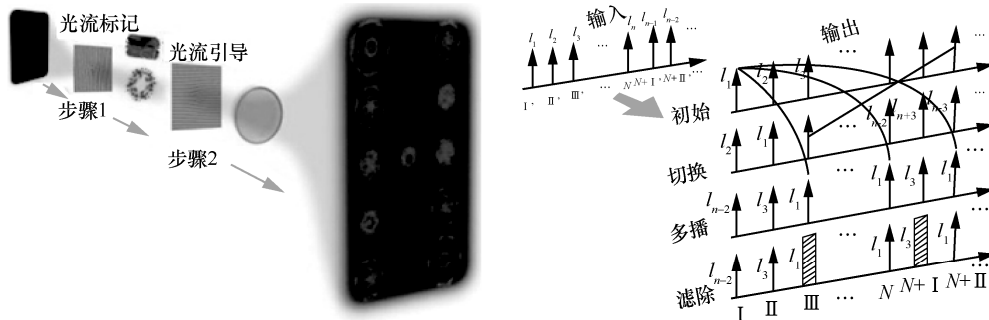
OAM 模式叠加的复合光束。但是在实际的接收系统中,由于不同 OAM 模式反转换光斑大小不同,接收效率也存在差异,因此每个多播信道的反转换功率可能与目标功率存在偏差。为解决上述问题,该课题组通过在发射端的调制器件和接收端的解调器件之间加入一个自适应校正反馈器,接收端可根据不同的功率需要将所需功率信息以反馈系数的形式反馈给发送端,从而来优化发送端 SLM 上所加载的复杂相位全息图,并由此调控多播信道中不同信道的功率,从而为提升多播的灵活性做出了贡献。该工作的实验结果与理论结果基本一致,并且测量结果与目标值的最大偏差仅为 0.5 dB,可以



(a) OAM 复用系统的多播功能概念



(b) 反馈辅助的自适应功率-可控 OAM 多播概念



(c) 基于 OAM 光流路由多播链路原理框架

图 3 基于信道多播的 OAM 路由器件原理

很好地完成功率可调的多播功能, 不过由于其使用的复合相位全息图中 OAM 模式和衍射阶是相互对应的关系, 在实际应用中会对 OAM 模式的选择造成一些限制。

为了进一步优化 OAM 多播器件, 改变传统计算全息图中衍射阶与 OAM 模式的固定关系, 2016 年, Gao 等^[78]提出了一种基于 OAM 标记的全新路由方案。其实验设置如图 3(c)所示, 首先将若干高斯光束按特定入射角入射到达曼涡旋光栅, 以保证出射端生成的不同 OAM 光束的同轴复用传输。接收端将 OAM 光束入射到一个专门设计的计算全息图, 通过将相对均方根误差作为计算全息图的评价因子, 利用迭代法来优化纯相位透射率函数, 最终实现动态调控该全息图的相位分布。该方案将入射单一或复合 OAM 光束多播显示在接收平面的不同位置处, 其实验结果保持了低于 1.7 dB 的功率波动, 并且还可进一步实现对所需 OAM 信道成分的多播、切换和滤除功能, 也更好地增加了该路由器件的实用性。

通过设计不同种路由器件和相关技术, 从最开始在理想环境中的一对多的多播链路到之后考虑各种实际情况下多播链路, 可实现对多用户发送数据进行多播的 OAM 信道多播技术正逐渐走向成熟, 这为未来多用户通信场合下 OAM 光通信的发展奠定了基础。

4 可实现滤波的 OAM 路由器件

针对不同的应用场合, 用户对不同 OAM 光束所在信道的需求不尽一致, 而当用户对复用 OAM 通信链路中的特定信道有所需求时, 这就使对依据所需滤除无用信道而只对特定信道进行提取的滤波技术的研究日益迫切。2014 年, Huang 等^[79]基于光学几何变换原理设计了一种可实现 OAM 滤波的路由器件。其原理框架如图 4(a)所示, 首先将 OAM 复用光束发送到 OAM 模式滤波器中, 该滤波器包括 2 个负责进行相位转换的反射型元件构成的模式变换器和一个负责调控光斑的 SLM。基于光学几何变换的原理, 复用 OAM 光束经过模式变换器后, 原环状分布的光强分布会转换成一系列分布与 OAM 模式值一一对应的条状光斑。然后利用一个凸透镜将光斑聚焦到焦平面上, 在焦点处可编程的 SLM 表面被划分成不同的区域, 每个区域对应不同的 OAM 模式, 该 SLM 可对处于不同位置处的光斑

进行选择性调控, 使目标所需滤除 OAM 光束的光斑在通过的同时其余光点被阻塞反射。最后基于光学几何逆变换的原理, 对这些被反射的光斑进行从光斑到正常环状 OAM 光束的恢复, 利用分束器分离, 至此即完成了复合 OAM 光束中对所需 OAM 光束成分的滤波操作, 实验结果证明, 该方案的传播模式与阻塞模式的输出功率抑制比超过 14.5 dB。但需要指出的是, 由于光学几何变换存在的固有限制, 当输入复合 OAM 光束的模式值间隔为 1 时, 经几何变换后的光斑会出现相互重叠的现象, 这就直接增大了后续滤除工作的难度, 影响最终的滤波效果。

2015 年, Chen 等结合了干涉仪^[80-81]的优势, 首次提出了一种基于干涉仪的 OAM 滤波实验方案^[82], 通过合理设置干涉仪中两道威棱镜放置位置的相对角度, 使上下支路的光路产生 π 的相位差, 从而在接收端利用干涉相长和干涉相消的性质将复用 OAM 光束按 OAM 模式值的奇偶进行分离。在此基础上, 通过级联多个干涉仪并通过控制道威棱镜的相对角和第四个半波片的角度, 便可实现滤除其他 OAM 模式, 并输出特定的 OAM 模式的功能。其实验装置如图 4(b)所示, 在理论情况下, 该方案能为操控 OAM 模式提供一种有用的工具, 但是当 2 个 OAM 模式的差值和道威棱镜的相对角的乘积与 π 呈倍数关系时, 在滤波过程中将无法区分这 2 个 OAM 模式, 滤波功能也随之失效。

为解决上述工作中存在的不足, 实现 OAM 模式的高保真输出, 2019 年, Li 等^[83]提出了另一种利用干涉仪的新型 OAM 滤波器, 在该方案中, 通过控制不同 OAM 光束的相对相位差来实现多光束的干涉滤波。其原理如图 4(c)所示, 首先利用偏振光分束器将输入的 n 个 OAM 复用光束分成 n 等份, 再利用道威棱镜控制不同 OAM 光束的相对相位差, 同时在此过程中需利用半波板补偿各支路界面反射引起的半波损失, 并插入一组相位时延来补偿不同光路分支之间的相位差。由于 OAM 模式和相位差的关系满足 $\theta = \frac{2\pi}{l}$, 因此只有一个特定的 OAM 模式值可以实现百分百地通过, 而其他 OAM 模式会被抑制, 以此实现 OAM 滤波功能。该滤波器减轻了相邻 OAM 模式的重叠效应, 并提高了滤波效果, 可以在单光子识别和光交换等领域得到很好的应用。

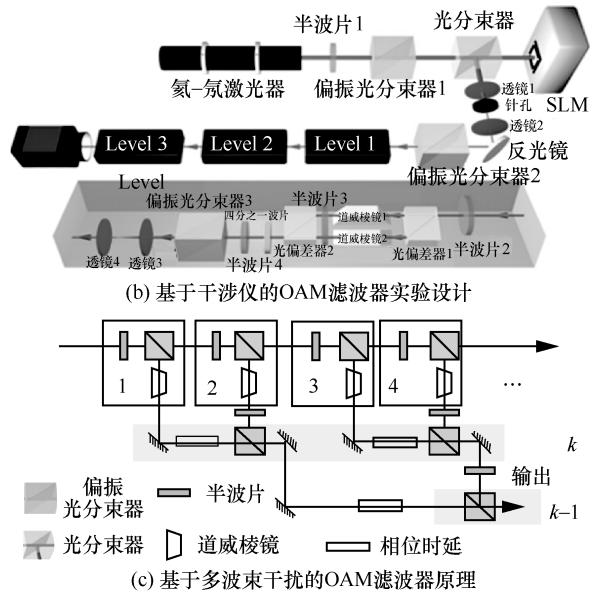
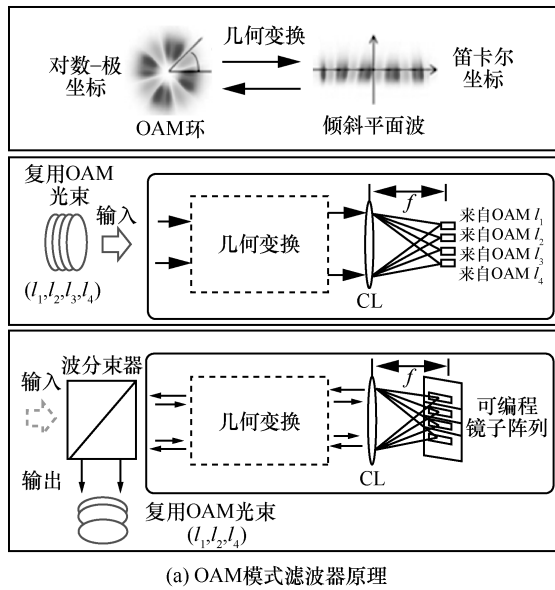


图 4 基于滤波的 OAM 路由器件原理

OAM 滤波器件通过对复用 OAM 光束的选择性滤波，能将不需要的 OAM 光束进行滤除，满足了光网络中特定节点信道过滤的需求。OAM 滤波器件发展至今，从开始的只能对模间距较大的 OAM 光束滤波，到现在已经可以对任意 OAM 光束进行高保真滤波，在未来光通信网络中具有广阔的应用前景。

5 可实现信道添加/提取的 OAM 路由器件

实现对通信信道的有选择性添加或提取也是光通信链路的重要一环。2013 年，Huang 等^[84]提出了一种 OAM 分插复用器，它可以实现对单个 OAM 光束的有效添加和提取。其原理如图 5(a)所示，首先将目标 OAM 光束进行下转换成高斯光束，其他 OAM 光束的模式值保持不变。然后利用加载了 2 个不同区域光栅相位的 SLM 将复合光束分离，其中内光栅可改变高斯光的衍射方向以实现同轴复合光束中心高斯光束的滤除，而外光栅不改变 OAM 光束的衍射方向，使对应位置处的 OAM 光束按正常反射路径传输，从而实现了目标 OAM 光束信道的提取。对于增添信道的操作，只需先在 OAM 光束中添加高斯光束，再利用 SLM 的内光栅相位将高斯光束转换成为目标 OAM 光束并调控其出射角度使之与其余光束相同，即可完成信道的添加。对于 100 Gbit/s 的 QPSK 数据通道，该方案的功率损耗小于 2 dB，信道误比特率仅为 2.0×10^{-3} 。但需要指出的是，该 OAM 路由器件虽然可以灵活地操

纵单个 OAM 信道，但在控制多个 OAM 信道提取或添加的问题上由于通道之间的串扰会增加功率损耗，因此对 SLM 分辨率的需求较高，在实际应用中仍然存在着些许挑战。

为了在此基础上实现多个 OAM 信道的增添和提取，2019 年，冯志康^[85]研究了一种基于几何变换的 OAM 分插复用器，成功实现了对多个 OAM 信道的提取和添加。使用该器件对信道提取的原理如图 5(b)所示，首先基于光学几何变换的原理，利用加载了特殊相位的 2 个 SLM 和傅里叶透镜将入射 OAM 复用光束转换为固定位置处一系列的狭长光斑，并且光斑的位置与 OAM 模式值相对应。之后通过设置 SLM 上的反射相位让所要提取的目标 OAM 光束透射，其他 OAM 光束维持反射，最后反射光路再经过之前的光学元件完成光学几何逆变换使之恢复成原来的 OAM 光束，至此便实现了对复合光束中多个 OAM 光束的提取。当需要对多个 OAM 光束进行添加时，如图 5(c)所示，先将所需添加的 OAM 光束经过光学几何变换后转换成焦平面位置处的狭长光斑，再通过调控 SLM 使添加的目标 OAM 光束透射的同时将其他的 OAM 光束反射，经相同光路的逆向传输后，最后利用分光器和光学几何逆变换在输出端将添加的光束与原光束恢复成新的复用 OAM 光束，从而完成 OAM 光束的添加操作。该方案不仅能同时实现 OAM 光束的增添和提取，并且可在不影响复合 OAM 光束中其他 OAM 模式的情况下，通过引用复制技术进一步

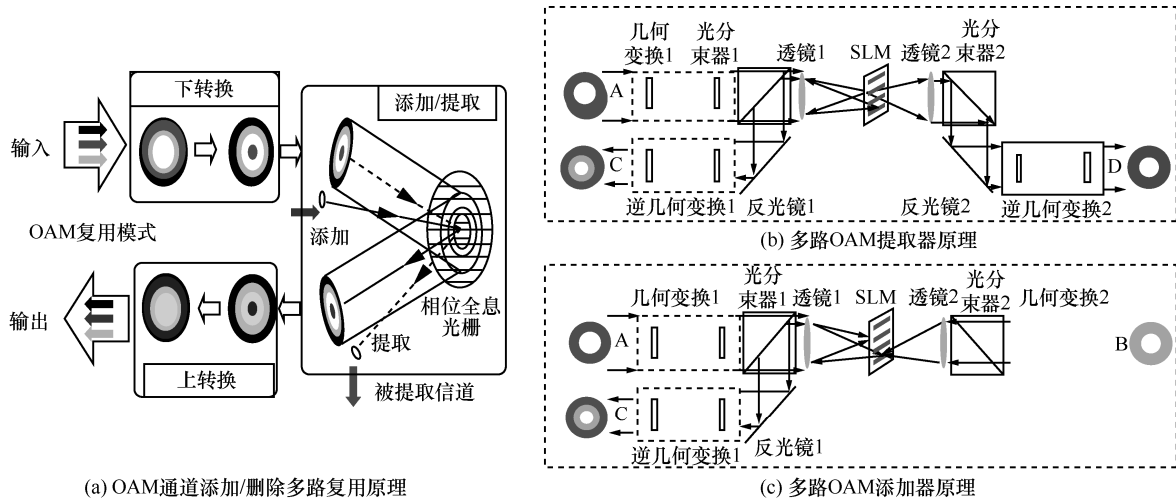


图 5 基于信道添加/提取的 OAM 路由器件原理

减小光斑宽度，使 OAM 光束的能量纯度维持在较高水平。

总体而言，对于可实现信道添加/提取的路由器件的研究目前仍处于起步阶段，相关的研究还有待进一步不断深入。这些研究从单个 OAM 光束的提取和添加发展到了可对多个 OAM 光束进行提取和添加，一步步地提升了 OAM 信道的扩展能力，但是在实验过程中，由于对于模间距较小的多 OAM 光束进行提取或添加时所产生的信道间串扰会对实验结果造成影响，因此如何对这种可实现信道添加和提取的 OAM 路由器件进行后续的完善仍是未来研究的重中之重。

6 可实现信道跳变的 OAM 路由器件

OAM 路由器件的种类多样，除了上述的众多类别外，一种可进行信道跳变的器件逐渐进入人们的视野^[86]，其可用于可重构的多址网络中来实现不同时间窗口输出不同的 OAM 模式。这种可实现信道跳变的 OAM 路由器件由 Willner 等^[87]于 2015 年提出，如图 6 所示，其原理可类比于传统通信中的跳频技术，通过控制跳模控制器可以使目标 OAM 模式在一个特定的时间段从一个特定的输出端口输出，实现基于 OAM 的信道跳变。该方案中通过利用数字微镜取代 SLM，有效提升了信道跳变速度，可有效应用在多址光网络中根据信道占据的空间模式任意路由数据流。实验证明，携带 4 种 OAM 模式的信号以 100 Gbit/s 的速率进行 QPSK 数据通道的可重构跳变（该跳变具有 2 ns 的交换保护时间）时，通

过改变其跳变速率和 OAM 模式间隔，功率损耗均小于 5.3 dB。

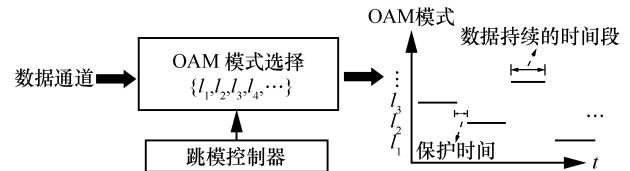


图 6 基于 OAM 模式的空间域信道跳变原理

7 可实现 OAM 模式分割/倍增的路由器件

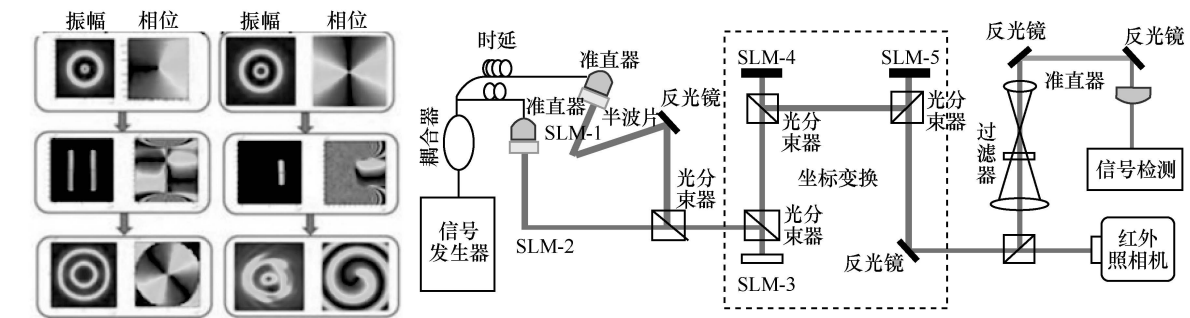
在基于 OAM 的新型光通信链路中，通过操纵 OAM 光束的模式值能够提高信号在信道中传输的可靠性，例如对 OAM 模式进行倍增可以减少信道的串扰、减少 OAM 光束的模间距可以提高系统效率。基于此，2015 年，Zhao 等^[88]提出了一种基于两步线性光学坐标变换的 OAM 倍增/减半器。其原理和实验装置如图 7(a)所示，对于 OAM 倍增器，首先通过光学几何坐标变换将 OAM 光束转化成处于 2 个不同位置的矩形平面波，再通过几何逆变换将这 2 个携带相位相同的矩形平面波合成一个 OAM 光束，从而实现 OAM 光束的相位倍增；对于 OAM 减半器，开始同样进行几何坐标变换将 OAM 光束转换成矩形平面波，再横向截取矩形平面波一半的相位变化，最后通过几何逆变换将截取的矩形平面波恢复成 OAM 光束，实现了 OAM 模式减半的功能。该方案对特定范围内的 OAM 模式有很好的倍增和减半效果，但只能将 OAM 模式减小一半，对 OAM 模式划分的灵活性仍需进一步去完善。

针对上述工作存在的困境,2017年,Zhou等^[89]提出了一种基于光学几何变换的OAM分频器,该装置可以实现对OAM模式的任意划分。其原理如图7(b)所示,该器件由直角坐标转换器和反转换器构成。首先利用直角坐标转换器进行几何坐标转换,将OAM光束转换成具有横向相位梯度的矩形平面波,再利用反转换器进行坐标反变换,将矩形平面波转换成多个级次的衍射光束,其中心部分转换成环形光束并在零阶输出,其余衍射阶舍弃。由于零阶衍射光输出的OAM光束是输入OAM光束和缩放参数乘积后的结果,因此可以通过控制零阶OAM光束输出的模式值大小实现OAM光束模式值的任意分配。该工作中还进一步扩展了研究结果,将第一步得到的矩形平面波进行 n 等分,再分别对 n 等分后的光斑进行坐标逆变换,使输出端在不同位置可以分别得到不同的OAM光束,进而实现对OAM光束的 n 等分。该工作的实验结果和理论结果保持了良好的一致性,但是由于坐标变换需要进行多次的光学操作,仍然存在着所需光学器件不容易集成化的问题。

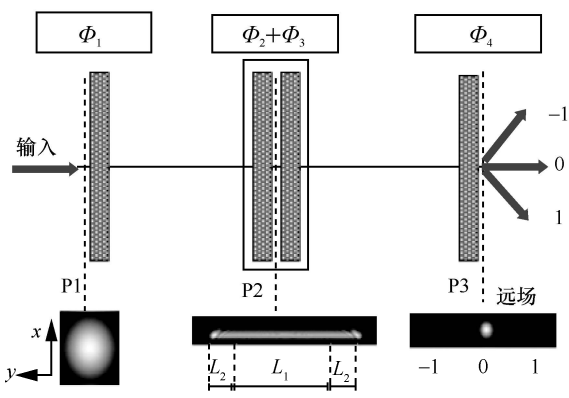
2019年,Ruffato等^[90]提出了一种可实现OAM

模式分割和倍增的全新路方案。其原理如图7(c)所示,首先基于光学几何变换,将输入OAM光束的相位梯度映射到 n 个互补的扇形区域,每个扇形区域为 $\frac{1}{n}$ 个圆,再将 n 个互补的扇形区域变换结合,形成一个新的圆形相位梯度,最后经过相位校正器校正相位,实现OAM光束的 n 倍增长;当需要对OAM模式进行 n 等分时,只需先将输入OAM光束的相位梯度利用分频器分割到 n 个互补的扇形区域里,然后将 n 个扇形区域映射到 n 个不同位置的圆形区域,实现对OAM光束的划分。在该方案中,只需要级联2个共焦点的光学元件,极大程度地减少了光学操作的次数,并且可以对传播的OAM光束提供相位校正,显著提高了光学效率。该方案中,以高分辨率电子束刻蚀技术制作光学元件,成功演示了对多种OAM模式分隔和倍增的功能。在此基础上,该课题组还提出了一种紧凑的光学结构,将光学变换和相位校正2种功能集成在同一基板上,进一步优化了器件的对准性和小型化。

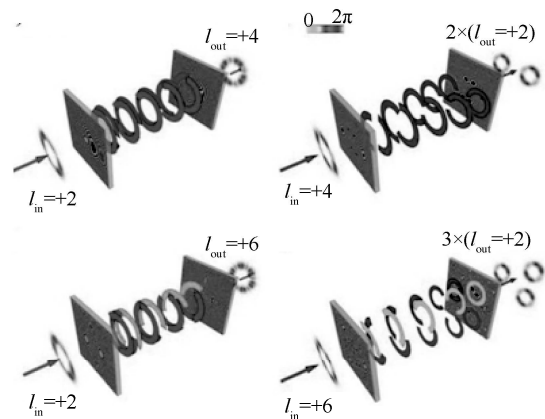
OAM倍增/分割器件发展至今,正朝着微型化和集成化方面发展,与当今光通信中对器件的



(a) 坐标变换的原理图及OAM倍增/减半器的实验设计



(b) OAM分频器划分的原理



(c) OAM模式倍增和划分的概念

图 7 基于模式分割/倍增的 OAM 路由器件原理

要求不谋而合。并且由于光学器件数量的减少,在进行 OAM 光束划分和倍增时的效率也得到了显著提升。

8 结束语

随着 5G 时代的到来,人们对通信数据的需求量与日俱增,而 OAM 光束凭借其正交特性可进行高效的复用和解复用,这为提升通信容量提供了一个新的维度,因此吸引了国内外许多研究人员的关注。随着 OAM 光通信技术的深入发展,OAM 的路由器件在提升光通信系统的灵活性和实用性等方面发挥了重要作用。本文对 OAM 路由器件进行了综述,根据路由器件对 OAM 光通信网络中的不同路由功能进行了划分,包括可进行信道切换、多播、滤波、添加/提取、跳变和 OAM 模式分割/倍增 6 类 OAM 路由器件,并对不同路由器件的原理及发展历程进行了详细阐述。

当下,在实现 OAM 路由功能时,往往需要对信道中的多种 OAM 模式值进行改变,同时也需要考虑实际情况下大气湍流引起的信道串扰。因此为提高 OAM 光束在光链路中应用的灵活性,往往需要 OAM 路由与新型 OAM 技术相结合。随着研究的不断深入,OAM 路由器件的发展取得了一系列重要的突破成果,但由于目前使用的许多光学元器件体积较大,而且在许多 OAM 路由器件中,往往需要进行多次光学操作,这不利于 OAM 路由器件的小型化。因此,为了提升光通信系统的性能,OAM 路由器件应该朝着集成化和微型化的方向发展。同时,高转换效率也是当代 OAM 光通信领域的重要需求之一,当前一些基于衍射的路由器件,由于整体能量利用效率不高限制了进一步推广,并且基于可编程调控的 SLM 和数字微镜等装置的路由器件,在调制响应速率方面也还有较大的进步空间,因此在以后的高集成度的 OAM 路由器件中,人们需要关注更高的能量转换效率和调制响应速度。

总之,实现光通信网络中路由功能的 OAM 路由器件已经获得了众多研究者的关注和研究,尽管目前依然有些许问题需要进一步去完善解决,但随着国内外研究者的不断投入,相信未来会有更多功能、更加完善的 OAM 路由器件问世,并逐步推动着 OAM 光通信这一领域不断地向前发展。

参考文献:

- [1] MOKHTAR A, AZIZOGLU M. Adaptive wavelength routing in all-optical networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1998, 6(2): 197-206.
- [2] RICHTER T, PALUSHANI E, SCHMIDT-LANGHORST C, et al. Transmission of single-channel 16-QAM data signals at terabaud symbol rates[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 504-511.
- [3] ZHOU X, YU J, HUANG M F, et al. 64-Tb/s, 8 b/s/Hz, PDM-36QAM transmission over 320 km using both pre and post-transmission digital signal processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(4): 571-577.
- [4] ZHOU X, YU J. Multi-level multi-dimensional coding for high-speed and high-spectral-efficiency optical transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(16): 3641-3653.
- [5] GNAUCK A H, WINZER P J, CHANDRASEKHAR S, et al. Spectrally efficient long-haul WDM transmission using 224-Gb/s polarization-multiplexed 16-QAM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(4): 373-377.
- [6] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [7] WILLNER A E, LI L, XIE G D, et al. Orbital-angular-momentum-based reconfigurable optical switching and routing[J]. *Photonics Research*, 2016(5): 10-13.
- [8] WINZER P J. Making spatial multiplexing a reality[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 345-348.
- [9] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [10] XIA C, CHAND N, VELAZQUEZBENITEZ A M, et al. Time-division-multiplexed few-mode passive optical network[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1151-1158.
- [11] CHEN X, LI A, YE J, et al. Demonstration of few-mode compatible optical add/drop multiplexer for mode-division multiplexed super-channel[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 14302-14307.
- [12] VAN NEE R, VAN ZELST A, AWATER G A, et al. Maximum likelihood decoding in a space division multiplexing system[C]/*IEEE Vehicular Technology Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2000: 6-10.
- [13] WILLNER A E, HUANG H, YAN Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- [14] GUO Z, QU S, SUN Z, et al. Superposition of orbit angular momentum of photons by combined computer-generated hologram fabricated in silica glass with femtosecond laser pulses[J]. *Chinese Physics B*, 2008, 17(11): 4199-4205.
- [15] GUO Z, WANG Z, DEDO M I, et al. The orbital angular momentum encoding system with radial indices of laguerre-Gaussian beam[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(5): 1-11.
- [16] GUO Z, ZHU L, GUO K, et al. High-order dielectric metasurfaces for high-efficiency polarization beam splitters and optical vortex generators[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12(1): 1-8.
- [17] LIU J, ZHU L, WANG A, et al. All-fiber pre- and post-data exchange

- in km-scale fiber-based twisted lights multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(16): 3896-3899.
- [18] KAI C, FENG Z, DEDO M I, et al. The performances of different OAM encoding systems[J]. *Optics Communications*, 2019, 430: 151-157.
- [19] DEDO M I, WANG Z, GUO K, et al. Retrieving performances of vortex beams with GS algorithm after transmitting in different types of turbulences[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(11): 2269.
- [20] WANG Z, DEDO M I, GUO K, et al. Efficient recognition of the propagated orbital angular momentum modes in turbulences with the convolutional neural network[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(3): 1-14.
- [21] WANG Z, GUO Z. Adaptive demodulation technique for efficiently detecting orbital angular momentum (OAM) modes based on the improved convolutional neural network[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 163633-163643.
- [22] WANG L, CHEN H, GUO K, et al. An inner and outer-fed dual-arm archimedean spiral antenna for generating multiple orbital angular momentum modes[J]. *Electronics*, 2019, 8(2): 251.
- [23] YIN Z, ZHENG Q, GUO K, et al. Tunable beam steering, focusing and generating of orbital angular momentum vortex beams using high-order patch array[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(15): 2949.
- [24] YANG Y, WANG Z, WANG S, et al. Designing a water-immersed rectangular horn antenna for generating underwater OAM waves[J]. *Electronics*, 2019, 8(11): 1224.
- [25] 郭忠义, 汪彦哲, 郑群, 等. 涡旋电磁波天线技术研究进展[J]. *雷达学报*, 2019, 8(5): 631-655.
- GUO Z Y, WANG Y Z, ZHENG Q, et al. Research progress of vortex electromagnetic wave antenna technology[J]. *Journal of Radar*, 2019, 8(5): 631-655.
- [26] SHEN F, MU J, GUO K, et al. Generating circularly polarized vortex electromagnetic waves by the conical conformal patch antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(9): 5763-5771.
- [27] YANG Y, GUO K, SHEN F, et al. Generating multiple oam based on a nested dual-arm spiral antenna[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 138541-138547.
- [28] ZHOU H, LI J, GUO K, et al. Generation of acoustic vortex beams with designed Fermat's spiral diffraction grating (FSDG)[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 146(6): 4237-4243.
- [29] GUO Z, LIU H, ZHOU H, et al. High-order acoustic vortex field generation based on the metasurface[J]. *Physical Review E*, 2019, 100(5): 053315.
- [30] GONG C, LI J, GUO K, et al. Measuring the orbital angular momentum of acoustic vortices based on the Fraunhofer's diffraction[J]. *Chinese Physics B*, 2020, doi: 10.1088/1674-1056/ab9c11.
- [31] ZHOU H, LI J, GONG C, et al. Measuring the orbital angular momentum of acoustic vortices by apertures[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, doi: 10.1121/10.0001521.
- [32] RAN L, GUO Z, QU S. Rotation of optically trapped microscopic particles by vortex femtosecond laser[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21: 104206.
- [33] LI Y, GUO Z, QU S. Living cell manipulation in microfluidic device by femtosecond optical tweezers [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 55: 150-154.
- [34] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, et al. Orbital angular momentum of light and transformation of Laguerre Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [35] OKIDA M, OMATSU T, ITOH M, et al. Direct generation of high power Laguerre-Gaussian output from a diode-pumped Nd:YVO(4) 1.3- μm bounce laser[J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7616-7622.
- [36] MIAO P, ZHANG Z F, SUN J B, et al. Orbital angular momentum microlaser[J]. *Science*, 2016, 353(6298): 464-467.
- [37] LEE A J, ZHANG C Y, OMATSU T, et al. An intracavity, frequency-doubled self-Raman vortex laser[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5400-5409.
- [38] TURNBULL G A, ROBERTSON D A, SMITH G M, et al. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimetre-wave frequencies by use of a spiral phaseplate[J]. *Optics Communications*, 1996, 127(4-6): 183-188.
- [39] SUEDA K, MIYAJI G, MIYANAGA N, et al. Laguerre-Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high intensity laser pulses[J]. *Optics Express*, 2004, 12(15): 3548-3553.
- [40] RAFIGHDOOST J, SABATYAN A. Spirally phase-shifted zone plate for generating and manipulating multiple spiral beams[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): 608-612.
- [41] WEI S B, WANG D P, LIN J, et al. Demonstration of orbital angular momentum channel healing using a Fabry-Pérot cavity[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, 1(5): 180006.
- [42] 刘永军, 宣丽, 胡立发, 等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(12): 100-104.
- LIU Y J, XUAN L, HU L F, et al. Research on high precision pure phase liquid crystal spatial Light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(12): 100-104.
- [43] MIRHOSSEINI M, MAGAÑA-LOAIZA O S, CHEN C C, et al. Rapid generation of light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30196-30203.
- [44] KARIMI E, SCHULZ S A, DE LEON I, et al. Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(5): e167.
- [45] MA Z J, LI Y, LI Y, et al. All-dielectric planar chiral metasurface with gradient geometric phase[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 6067-6078.
- [46] DU J, WANG J. Design of on-chip N-fold orbital angular momentum multicasting using V-shaped antenna array[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9662.
- [47] KAI C, HUANG P, SHEN F, et al. Orbital angular momentum shift keying based optical communication system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1-10.
- [48] KRENN M, FICKLER R, FINK M, et al. Communication with spatially modulated light through turbulent air across vienna[J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16(11): 113028.
- [49] DU J, WANG J. High-dimensional structured light coding/decoding for free-space optical communications free of obstructions[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4827-4830.

- [50] LIU Y D, GAO C Q, GAO M W, et al. Superposition and detection of two helical beams for optical orbital angular momentum communication[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(14): 3636-3639.
- [51] LI X K, LI Y, ZENG X N, et al. Perfect optical vortex array for optical communication based on orbital angular momentum shift keying[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(12): 125604.
- [52] 郭忠义, 龚超凡, 刘洪郡, 等. OAM 光通信技术研究进展[J]. *光电工程*, 2020, 47(3): 95-128.
- GUO Z Y, GONG C F, LIU H J, et al. Research progress of OAM optical communication technology[J]. *Optoelectronic Engineering*, 2020, 47(3): 95-128.
- [53] HUANG H, XIE G, YAN Y, et al. 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 197-200.
- [54] LI S, WANG J. A compact trench-assisted multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for ultrahigh-density space-division multiplexing (19 rings \times 22 modes) [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4:3853.
- [55] WANG J, LIU J, LYU X, et al. Ultra-high 435-bit/s/Hz spectral efficiency using N-dimensional multiplexing and modulation link with pol-muxed 52 orbital angular momentum (OAM) modes carrying Nyquist 32-QAM signals[C]//European Conference on Optical Communication. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-3.
- [56] LEI T, ZHANG M, LI Y, et al. Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by dammann gratings[J]. *Light-Science & Applications*, 2015, 4(3): 1-7.
- [57] WANG W, WANG P, CAO T, et al. Performance investigation of underwater wireless optical communication system using M-ary OAM-SK modulation over oceanic turbulence[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, PP(99):1-15.
- [58] WANG A, ZHU L, ZHAO Y, et al. Adaptive water-air-water data information transfer using orbital angular momentum[J]. *Optics express*, 2018, 26(7): 8669-8678.
- [59] REN Y X. Orbital angular momentum-based space division multiplexing for high-capacity optical and millimeter-wave communications[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33306.
- [60] WANG J, LI S, LUO M, et al. N-dimensional multiplexing link with 1.036-Pbit/s transmission capacity and 112.6-bit/s/Hz spectral efficiency using OFDM-8QAM signals over 368 WDM pol-muxed 26 OAM modes[C]//European Conference on Optical Communication. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-3.
- [61] AWAJI Y, WADA N, TODA Y. Demonstration of spatial mode division multiplexing using Laguerre-Gaussian mode beam in telecom-wavelength[C]//2010 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society. Piscataway: IEEE Press, 2010:551-552.
- [62] WANG J, LI S, LI C, et al. Ultra-high 230-bit/s/Hz spectral efficiency using OFDM/OQAM 64-QAM signals over pol-muxed 22 orbital angular momentum (OAM) modes[C]//Optical Fiber Communication Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-3.
- [63] TOMKOS I, AZODOLMOLKY S, SOLE-PARETA J, et al. A tutorial on the flexible optical networking paradigm: state of the art, trends, and research challenges[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(9):1317-1337.
- [64] MAMADOU D, SHEN F, DEDO M I, et al. High-efficiency sorting and measurement of orbital angular momentum modes based on the March-Zehnder interferometer and complex phase gratings[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(7):075201.
- [65] 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.
- [66] WANG J, YANG J, FAZAL I, et al. Experimental demonstration of 100-Gbit/s DQPSK data exchange between orbital-angular-momentum modes[C]//Optical Fiber Communication Conference. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-3.
- [67] AHMED N, HUANG H, REN Y, et al. Reconfigurable 2×2 orbital angular momentum based optical switching of 50-Gbaud QPSK channels[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 756-761.
- [68] WILLNER M, HUANG H, AHMED N, et al. Reconfigurable orbital angular momentum and polarization manipulation of 100 Gbit/s QPSK data channels[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5240-5243.
- [69] LIU J, WANG J. Demonstration of reconfigurable joint orbital angular momentum mode and space switching[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 60-68.
- [70] LEI T, GAO S, LI Z, et al. Fast-switchable OAM-based high capacity density optical router[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 1-9.
- [71] GARCIA-MOLINA H, SPAUSTER A M. Ordered and reliable multicast communication[J]. *ACM Transactions on Computer Systems*, 1991, 9(3): 242-271.
- [72] MOYER M J, RAO J R. A survey of security issues in multicast communications[J]. *IEEE Network*, 1999, 13(6): 12-23.
- [73] KIM J, JOUNG J, LEE J W. Resource allocation for multiple device-to-device cluster multicast communications underlay cellular networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(2): 412-415.
- [74] XIONG J, MA D, ZHAO H, et al. Secure multicast communications in cognitive satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(4): 632-635.
- [75] WANG Z, HU J, LIU G, et al. Optimal power allocations for relay-assisted NOMA-based 5G V2X broadcast/multicast communications[C]//IEEE/CIC International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2018: 688-693.
- [76] YAN Y, YUE Y, HUANG H, et al. Multicasting in a spatial division multiplexing system based on optical orbital angular momentum[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3930-3933.
- [77] LI S, WANG J. Adaptive power-controllable orbital angular momentum (OAM) multicasting[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9677.
- [78] GAO S, LEI T, LI Y, et al. OAM-labeled free-space optical flow routing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21642-21651.
- [79] HUANG H, REN Y, XIE G, et al. Tunable orbital angular momentum mode filter based on optical geometric transformation[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1689-1692.
- [80] FENG Z, WANG X, DEDO M I, et al. High-density orbital angular momentum mode analyzer based on the mode converters combining with the modified Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2019, 435: 441-448.

- [81] LEACH J, PADGETT M J, BARNETT S M, et al. Measuring the orbital angular momentum of a single photon[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(25): 257901.
- [82] CHEN D X, ZHANG P, LIU R F, et al. Orbital angular momentum filter of photon based on spin-orbital angular momentum coupling[J]. *Physics Letters A*, 2015, 379(39): 2530-2534.
- [83] LI W, ZHAO S. Orbital angular momentum filter based on multiple-beam interference[J]. *Optics Communications*, 2019, 430: 98-103.
- [84] HUANG H, YUE Y, YAN Y, et al. Liquid-crystal-on-silicon-based optical add/drop multiplexer for orbital-angular-momentum-multiplexed optical links[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 5142-5145.
- [85] 冯志康. 基于几何光学变换的 OAM 光束高效测量及其应用技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- FENG Z K. Research on high-efficiency measurement of OAM beam based on geometric optical transformation and its application technology[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [86] LIANG L, CHENG W, ZHANG H, et al. Orbital-angular-momentum based mode-hopping: a novel anti-jamming technique[C]//2017 IEEE/CIC International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [87] WILLNER A J, REN Y, XIE G, et al. Experimental demonstration of 20 Gbit/s data encoding and 2 ns channel hopping using orbital angular momentum modes[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(24): 5810-5813.
- [88] ZHAO Z, REN Y, XIE G, et al. Dividing and multiplying the mode order for orbital-angular-momentum beams[C]//European Conference on Optical Communication. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-3.
- [89] ZHOU H, DONG J, WANG J, et al. Orbital angular momentum divider of light [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 1-8.
- [90] RUFFATO G, MASSARI M, ROMANATO F, et al. Multiplication and division of the orbital angular momentum of light with diffractive transformation optics[J]. *Light-Science & Applications*, 2019, 8(1): 1-13.

[作者简介]



郭忠义 (1981-), 男, 安徽阜南人, 博士, 合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为先进光通信技术、偏振智能信息处理、涡旋雷达系统、纳米光子学、智能传感系统等。



潘珍珍 (1997-), 女, 安徽芜湖人, 合肥工业大学硕士生, 主要研究方向为 OAM 光通信技术。



龚超凡 (1998-), 男, 安徽六安人, 合肥工业大学硕士生, 主要研究方向为 OAM 光通信技术。



王子坤 (1995-), 男, 安徽合肥人, 合肥工业大学硕士生, 主要研究方向为先进光通信技术。



郭凯 (1987-), 男, 安徽界首人, 博士, 合肥工业大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为先进光通信技术、纳米光子学等。



周红平 (1975-), 女, 江苏海门人, 博士, 合肥工业大学副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为先进光通信技术、雷达信号处理、干扰识别等。