

轨道角动量光信号处理研究进展

刘俊, 王健

(华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 携带轨道角动量的光束利用了光子横向空间分布, 其具有空间螺旋相位波前。近年来, 类比波分复用技术, 轨道角动量复用技术引起了国内外的广泛关注并在高速大容量光传输方面取得了显著进展。值得注意的是, 除了光传输, 光处理也是光通信系统的关键技术。一个完整的轨道角动量光通信网络系统, 既包括网络链路的轨道角动量复用传输, 也包括网络节点处的轨道角动量信号处理。回顾了基于轨道角动量的光信号处理技术的研究进展, 全面综述了不同功能的轨道角动量光信号处理技术以及不同应用场景中的轨道角动量光信号处理技术, 同时对其未来发展趋势进行了分析和前景展望。轨道角动量光信号处理技术完善了基于轨道角动量的空分复用光通信系统, 有望为实现高效灵活的轨道角动量信息管理和应对光通信新容量危机提供解决方案。

关键词: 光通信; 光子空间维度; 轨道角动量; 光信号处理

中图分类号: TN915

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021148

Research progress of optical signal processing with orbital angular momentum

LIU Jun, WANG Jian

Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: Light beams carrying OAM (orbital angular momentum) exploit the transverse spatial distribution of photons and have helical phase front. In recent years, similar to the WDM (wavelength-division multiplexing) technology, OAM multiplexing technology has attracted widespread interest and made remarkable progress in high-speed and large-capacity optical signal transmission. It is worth noting that, optical signal processing is also the key technology of optical communication systems in addition to optical signal transmission. A complete OAM-based optical communication network system includes both OAM multiplexing transmission along network links and OAM signal processing at network nodes. The research progress of optical signal processing with OAM were reviewed, and different optical signal processing functions with OAM and the various OAM-based optical signal processing technologies in different application scenarios were comprehensively summarized. Meanwhile, the future development trend of optical signal processing with OAM was analyzed and its prospect was discussed. The optical signal processing technologies with OAM improve the OAM-based space-division multiplexing optical communication systems, which is expected to provide solutions for realizing efficient and flexible information management of OAM and addressing the new capacity crunch of optical communications.

Keywords: optical communications, space dimension of photon, orbital angular momentum, optical signal processing

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-06-03

通信作者: 王健, jwang@hust.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2019YFB2203604, No.2018YFB2200204); 国家自然科学基金资助项目 (No.11774116, No.62001182); 广东省重点领域研发计划基金资助项目 (No.2018B030325002); 国家“万人计划”青年拔尖人才支持计划基金资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.2019kfyRCPY037)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2019YFB2203604, No.2018YFB2200204), The National Natural Science Foundation of China (No.11774116, No.62001182), The Key Research and Development Program of Guangdong Province (No. 2018B030325002), The National Program for Support of Top-notch Young Professionals, The Central University Basic Business Expenses Special Funding for Scientific Research Project (No.2019kfyRCPY037)

1 引言

20 世纪 60 年代, 电子计算机的诞生、计算机技术和网络技术的普及, 将人们从工业时代带入绚烂多彩的信息时代, 科技的迅猛发展和人口的飞速攀升使全球通信容量呈指数级增长^[1-3]。特别地, 电子商务、云计算、物联网、虚拟现实、大数据、5G 移动互联、人工智能、无人驾驶等技术的应用和发展极大地丰富了人类的生活方式, 同时也给全球光通信网络带来了更大的压力。因此, 为了应对快速膨胀的通信容量需求, 研究者们需要不断开发新技术来解决即将到来的“容量瓶颈”。20 世纪 70 年代, 研究者们研发出低损耗光纤^[4]和半导体激光器^[5], 并将其进行推广, 促进了光通信技术的持续发展。技术的发展推动光通信容量不断增长, 平均增速达到每 4 年增长 10 倍^[6]。追根求源, 所有的光通信技术的开发都是利用光子的不同物理维度资源。图 1 给出了光子的 5 个基本物理维度, 即时间、频率/波长、复振幅 (即幅度和相位)、偏振和空间结构 (横向空间分布)^[7-8]。通过对光子的维度资源进行调制或复用, 研究者开发了多种高级调制技术和复用技术, 可以有效提升光通信的容量^[9-12]。

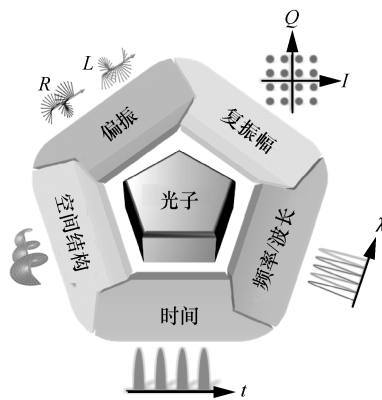


图 1 光子基本物理维度

对光子时间维度的开发利用始于 20 世纪 80 年代。利用时间维度的时分复用技术 (TDM, time-division multiplexing) 经过了 30 多年发展, 2012 年, 日本东北大学在 525 km 单模光纤 (SMF, single-mode fiber) 中实现了 160 Gbaud 奈奎斯特脉冲 TDM 信号的传输^[13]; 中兴通讯美国莫里斯顿研究中心实现了 2 800 km SMF 传输电时分复用 (ETDM, electrical time-division multiplexing) 信

号^[14]。同年, 他们将光子的时间维度、偏振维度、波长维度和复振幅维度结合, 即 ETDM、偏振复用 (PDM, polarization-division multiplexing)、波分复用 (WDM, wavelength-division multiplexing) 和高级调制格式, 实现了 1 200 km SMF 传输^[15]。20 世纪 80 到 90 年代, 随着光放大技术的出现和快速发展, 进一步充分利用光子波长维度的 WDM 技术有效推动了光通信容量的增长。日本 NTT 公司 2011 年利用 C+L 波段 10.8 THz 带宽实现了 432 个波长的密集波分复用 (DWDM, dense wavelength-division multiplexing), 每个波长信道间隔 25 GHz, 并与 PDM 和高级调制技术相结合, 实现了 210 km SMF 信号传输^[16]。理论上, C+L 波段的带宽共计 11.4 THz, 该实验几乎利用了整个 C+L 波段的所有带宽资源, 对波长维度的利用接近极致。利用波长维度的正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 技术也有效提升了通信容量^[17]。2000 年年初, 数字相干接收技术的崛起进一步有效提升了光通信的容量。该技术充分利用了光子的复振幅维度, 从传统二元调制格式信号发展为先进高级调制格式信号, 如 m 阶相移键控 (m-PSK, m-ary phase-shift keying) 和 m 阶正交幅度调制 (m-QAM, m-ary quadrature amplitude modulation) 等^[18-20]。2015 年日本东北大学产生了 2048-QAM 的信号, 频谱效率高达 15.3 bit/(s·Hz)^[21]; 2018 年美国贝尔实验室和英国康宁光通信实验室在 200 km 光纤中传输了 4096-QAM 高级调制信号, 频谱效率高达 19.77 bit/(s·Hz)^[22]。几十年来, 全球光通信容量不断增长, 上述基于光子各个维度资源的光通信复用技术和调制技术也在不断完善, 以满足光通信容量可持续发展的需求。然而, 对这些维度资源的开发存在极限, 光通信容量的提高空间也越来越有限, 随着光子传统维度资源开发殆尽, 光通信新容量危机开始显现。为了应对即将到来的容量危机, 光子的横向空间分布维度进入研究人员的视野。其作为仅剩的有待全面开发的光子维度, 可以通过空间并行传输通信信道的复用技术实现光通信系统的可持续扩容。基于光子横向空间分布维度的复用通信技术被称为空分复用技术 (SDM, space-division multiplexing)^[23-27]。SDM 的类型可大致分为两大类, 即空间位置复用和模分复用。空间位置复用利用空间不同位置实现空间不重叠的多个信道的复用通信, 这一技术的典型代表为多芯

光纤。模分复用则利用正交的具有横向光场分布的模式实现空间重叠的多个信道的复用通信，如光纤中的本征模式和线偏振模式等。与上述模式类似，携带轨道角动量（OAM, orbital angular momentum）的光束具有螺旋相位波前，可以表示为螺旋相位因子 $\exp(il\varphi)$ ，其中， l 为拓扑电荷数， φ 为方位角， l 的取值范围理论上可以是任意整数。1992 年，Allen 等^[28]通过实验研究发现具有螺旋相位波前的光束携带 OAM，随后 OAM 受到全球研究人员的广泛关注。OAM 也因其独有的特点被应用于很多科学研究，如光学捕获、光学成像、光镊、非线性光学、传感、量子科学等^[29-41]。不同拓扑电荷数的 OAM 模式之间相互正交，同时拓扑电荷数理论上可以取值无限，这一特性被称为无限正交特性。前文介绍了利用光子的其他维度提高光通信容量的信息技术，包括 TDM、PDM、WDM 等，其通过将不同数据信息加载在光子的时间、偏振、频率/波长等维度上来实现信息的复用，其中关键之处在于不同信道之间是正交的，通过类比，可以发现，OAM 模式的无限正交特性同样符合这一特点，也可以利用不同拓扑电荷数的 OAM 模式构建相应的空间模式基，实现模式复用，因此，可以将 OAM 用于光通信来提高系统通信容量。

经过十几年的发展，基于 OAM 的光通信技术在全球范围内取得了长足的进步，为满足不断增长的流量需求提供了一条全新的途径^[42-80]。值得注意的是，光通信包括光传输和光处理两大关键技术。一个完整的 OAM 光通信网络系统既包括网络链路的 OAM 复用传输，也包括网络节点处的 OAM 信号处理。OAM 光通信系统中的部分 OAM 信号处理功能如图 2 所示。

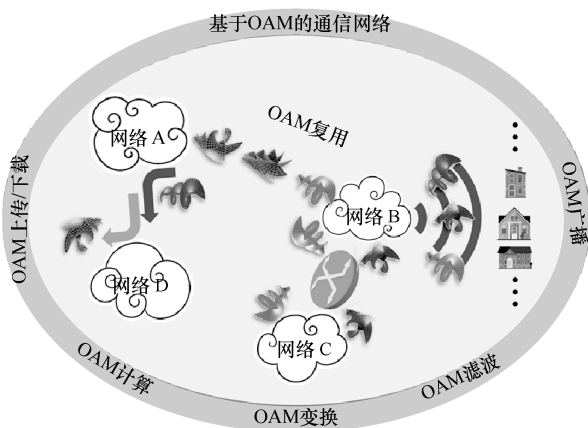


图 2 OAM 光通信系统中的部分 OAM 信号处理功能

2 基于轨道角动量的光通信

自从 OAM 模式的无限正交性在光通信中的应用得到证明之后，越来越多的研究者开始从事这一领域的深入研究。基于 OAM 模式的通信研究按照不同的方式可以有很多种分类，通过信息的复用和调制方式可以分为 OAM 复用和 OAM 编码通信^[49, 81]；通过不同的传输介质可以分为自由空间^[46]、光纤^[62]、片上集成^[72] 和 水下^[76]等通信；通过光子属性可以分为经典通信和量子通信^[82]；通过电磁波的频段可以分为射频、太赫兹、光波 OAM 通信等^[83-85]。本文首先介绍常见的光波 OAM 模式在不同传输介质中的复用通信和编码通信。

以自由空间作为传输介质的通信系统主要集中在各种无线通信应用中，如地面与深空卫星通信、手机之间的互连通信、室内通信等^[86-87]。将 OAM 模式应用于自由空间复用通信可以有效缓解数据流量需求增长带来的压力。特别地，将 OAM 模式复用与 WDM、PDM 和高级调制格式等传统光通信技术相结合，许多实验报道已经在经典光通信中充分验证了通信容量和频谱效率的显著提升。2014 年，华中科技大学研究团队利用双偏振 52 个 OAM 模式，结合 3 个波长的 WDM 和 5.8 Gbaud 奈奎斯特 32-QAM 信号的高级调制格式的多维多信道超高频谱效率通信，系统通信容量达到 8.16 Tbit/s，频谱效率达到 435 bit/(s·Hz)^[88]。

OAM 模式在自由空间光通信中的优异表现吸引了更多的研究者对基于 OAM 模式的光通信进行更深入的研究，最初研究在光纤中产生 OAM 模式，接着设计支持 OAM 模式稳定传输的光纤，目前已经实现多个 OAM 模式在环形光纤中的长距离复用传输。图 3 给出了基于长距离环形 OAM 光纤高阶 OAM 模式复用传输系统示意。发射端产生携带不同信号的多个波长信道进行 WDM，同时与 OAM 模式复用相结合，将不同波长、携带不同信号的 2 个 OAM 模式耦合进入环形光纤并传输 18 km。经过传输的 2 个 OAM 模式先通过解复用器实现 2 个模式的分离，再分别将两路解复用的 OAM 模式进行波长解复用，最后对信号进行相干探测。利用光子 OAM 和波长 2 个维度，通过 OAM 模式复用和 WDM 相结合，可以更有效地提高光通信容量。该实验中，研究者利用特殊设计的渐变折射率环形 OAM 光纤，实现了 2 个 OAM 模式结合 112 个波长信道的

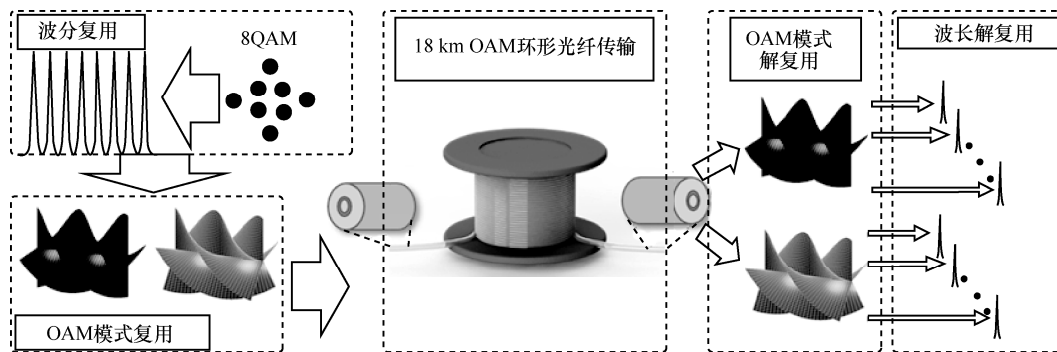


图 3 基于长距离环形 OAM 光纤高阶 OAM 模式复用传输系统示意

18 km 光纤复用传输, 传输容量达到 8.4 Tbit/s^[69]。

光学系统的小型化、集成化和低成本是目前光通信技术重要的发展趋势, 一种解决方案是利用光子集成技术^[89]。目前大部分基于 OAM 的光通信系统主要利用 SLM 来产生 OAM 模式, 然而 SLM 有着体积大和不易集成的不足, 同时目前 SLM 的价格相对昂贵, 不适合广泛推广, 这也极大制约了 OAM 光通信技术的发展。因此, 越来越多的研究人员将目光聚焦在集成 OAM 发射器的研究上, 特别是在基于 OAM 的光纤通信系统中使用集成 OAM 发射器^[90-92]。2018 年, 华中科技大学研究团队将集成 OAM 发射器产生的 7 个 OAM 模式依次耦合进入 2 km 和 3.6 km 少模光纤中传输, 通过传输性能测试评估基于 OAM 模式的芯片光纤互连通信系统的性能^[93]。

海洋在航海、渔业、气候和能源等领域占据了非常重要的地位。近年来, 研究人员在水下无线光通信 (UWOC, underwater wireless optical communication) 中倾注很多精力^[94-95], 通过选取合适的光波段, 如 400~500 nm 的蓝绿光, 光衰减可以相对较小^[96]。UWOC 相对传统的水声通信有如下特点: 高传输容量、低成本、小型化和快速响应。值得注意的是, 通过在目前的 UWOC 系统中引入 OAM 模式可以更进一步提高其传输容量。图 4(a) 给出了基于反馈控制的 OAM 跨空水界面通信系统的实验装置^[79]。跨空水界面的 OAM 通信中空水界面的位置变化会导致 OAM 光束位置的偏移, 这会对 OAM 光束的解调带来挑战。该实验通过一种自适应反馈的反射装置, 根据接收的 OAM 光束强度调节反射装置的高度, 矫正由于空水界面位置变化带来的光束位置偏移, 确保接收器能准确接收 OAM 光束, 最终实现了自适应反馈控制的水-空-

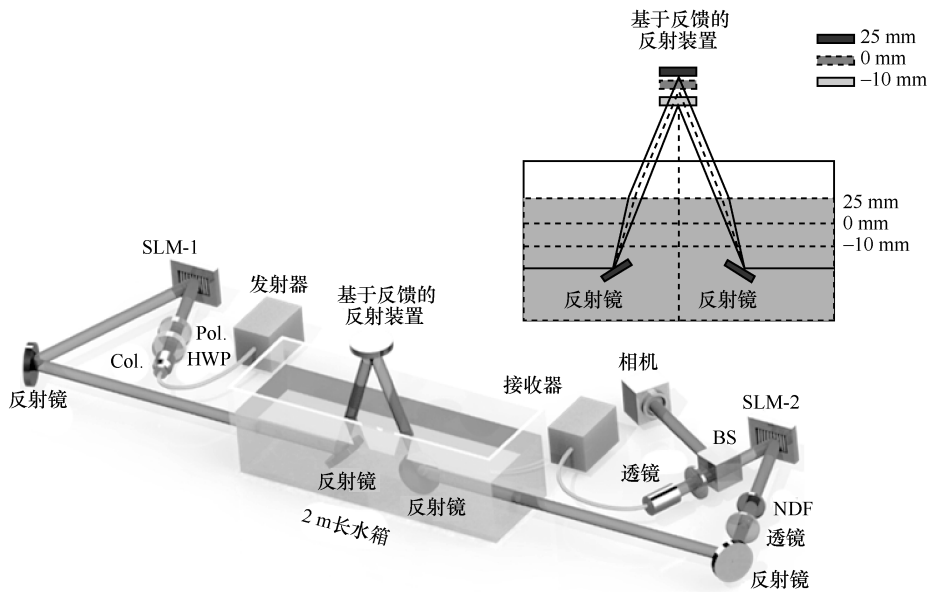
水的信息传输系统^[79]。

OAM 模式在模分复用系统中得到广泛应用。值得注意的是, 类比复振幅维度的高级调制格式信号技术, OAM 模式的无限正交特性也可以通过调制技术应用在通信系统中, 即 OAM 模式编码通信^[45, 48]。OAM 模式编码通信给 N 个不同的 OAM 模式分配 N 个不同的符号, 如 0, 1, ..., $N-1$, 其中不同符号代表不同信息, 这样通过发射或者解调一连串随时间变化的不同 OAM 模式即可实现数据的编码或解码。作为广泛应用的 OAM 模式复用通信的一种补充, OAM 模式编码通信也吸引了很多研究人员的关注。图 4(b)给出了自由空间贝塞尔光束多进制编译码通信原理示意^[81]。在发射端, 不同阶数的贝塞尔光束对应不同的数据信息, 如 0 对应 l_i , 1 对应 l_{i+1} , 2 对应 l_{i+2} , 3 对应 l_{i+3} 。实验中, 通过切换加载在 SLM 上的相位板产生不同的贝塞尔光束, 随时间变化的数据信息就可以对应随时间变化的贝塞尔光束并在自由空间中传输。在接收端, 通过在 SLM 上加载反向的螺旋相位对贝塞尔光束进行解码, 所有的贝塞尔光束在解码时都被 4 个反向螺旋相位解调, 解调后如果中心变为亮斑, 则传输的数据信息对应为 n ($n=0, 1, 2, 3$), 通过对所有传输的贝塞尔光束进行解码, 最终可以恢复传输的数据信息。

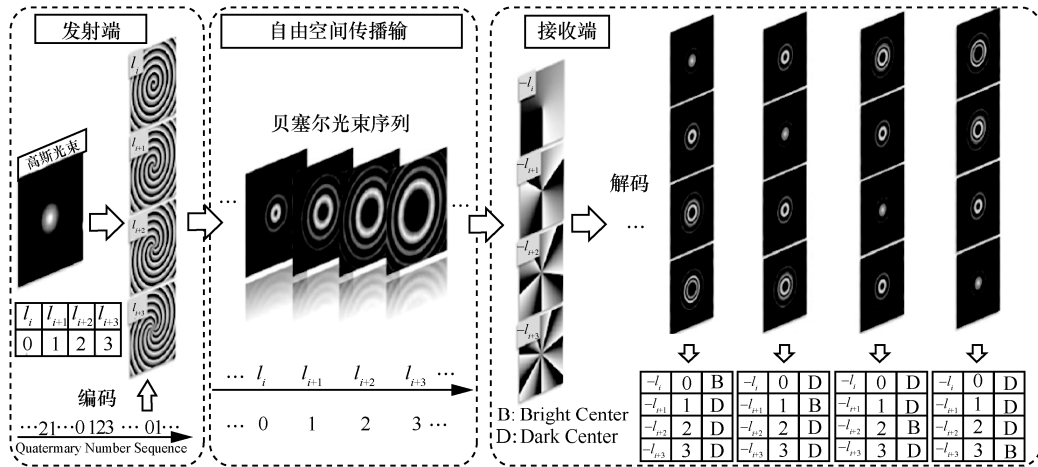
3 基于轨道角动量的光信号处理

3.1 基于轨道角动量的信息广播

在通信系统中, 如果多个不同的信道传输的信息不一样, 称之为信息复用, 典型的例子有 WDM 和 SDM。而如果所有信道传输的信息都一样, 则称之为信息广播^[97], 其是点对多点的通信, 类似于波长信道的广播, 可以对应实现 OAM 模式信道的广



(a) 基于反馈控制的OAM跨空水界面通信系统的实验装置



(b) 自由空间贝塞尔光束多进制编译码通信原理示意

图 4 跨空水界面通信系统实验装置与编译码通信原理示意

播。同时，结合光子其他维度资源，可以实现更多信道数目的信息广播。

基于波长、OAM 模式、偏振维度的多维信息广播的原理示意如图 5(a)所示^[98]。多载波多级调制的信号 (OFDM-m-QAM) 依次通过多波长广播系统、多 OAM 模式广播系统和偏振广播系统，最终使种子信息复制到多个波长、多个 OAM 模式和 2 个偏振维度上。波长广播通过相位调制器实现，经过由 25 GHz 间隔正弦信号驱动的相位调制器后，信号被复制到 25 个波长上 (从 193.1145 THz 到 193.7145 THz，间隔为 25 GHz)，同时通过波长选择开关均衡各波长广播信道功率。OAM 模式广播通过优化设计的复杂相位板，产生共轴传输的具有螺旋相位波前的多个 OAM 模式，从而将高斯信道

携带的信息复制到多个正交的 OAM 模式信道上。OAM 模式信道依靠各自不同的螺旋相位相互区分，其通道数由复杂相位板决定，复杂相位板设计成可以同时产生 22 个 OAM 模式。经过 3 个维度的信息广播后，单个种子信息最终被复制到 1 100 个信道上 (25 波长×22 个 OAM 模式×2 偏振)。随后，信号依次经过偏振、OAM 模式和波长解调装置，送入相干检测系统测试信号质量。图 5(b)给出了波长广播之后的光谱，25 个波长信道清晰可见。1 100 个广播信道中的典型信道的误比特率 (BER, bit-error rate) 随光信噪比 (OSNR, optical signal-to-noise ratio) 的变化曲线如图 5(c) (OFDM-16QAM 信号) 和图 5(d) (OFDM-32QAM 信号) 所示。当 BER 门限取 2×10^{-3} 时，对于 OFDM-16QAM 信号和

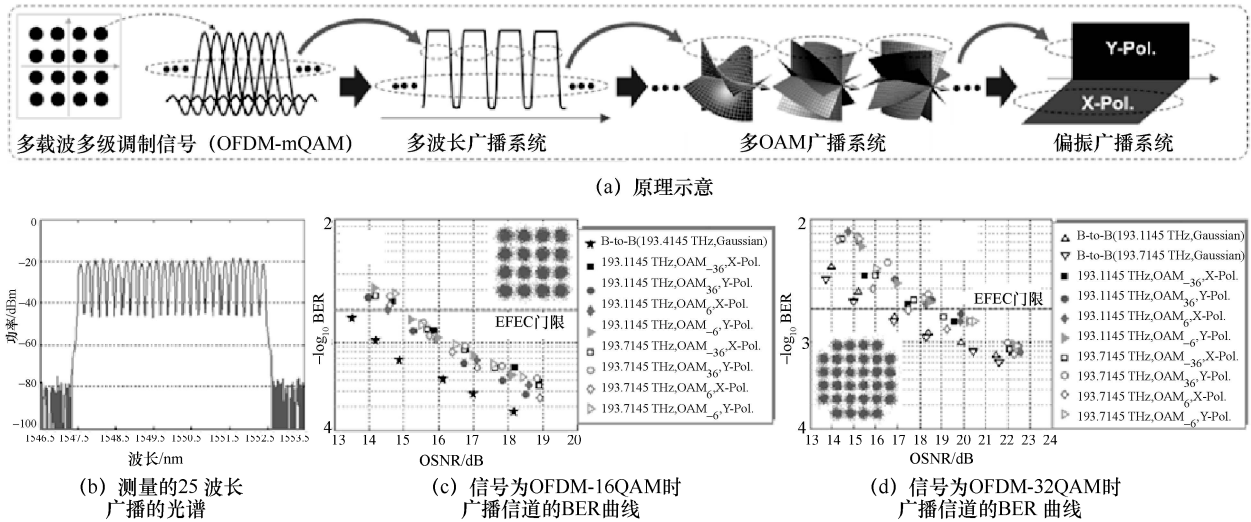


图 5 基于波长、OAM 模式、偏振维度的多维信息广播原理

OFDM-32QAM 信号，所有广播信道观测到的 OSNR 代价分别小于 3.7 dB 和 6.9 dB。

基于 OAM 模式的信息广播除了在自由空间应用之外，在 UWOC 系统中也有应用价值，例如向多个潜艇发送相同的广播信号。2017 年，华中科技大学研究团队实现了基于 OAM 模式的水下广播光互连链路的实验装置^[76]。在发射端，通过任意波形发生器 (AWG, arbitrary waveform generator) 产生 1.5 Gbaud 的 8-QAM-OFDM 信号，通过微波放大器将电信号放大并加载到激光二极管 (LD, laser diode) 上产生 520 nm 的光信号。信息调制的光信号入射到 SLM 上，产生共轴传输的多路 OAM 模式，即实现了 OAM 模式的广播。携带相同信号的多路 OAM 模式进入 2 m 长，注满了自来水的水箱中传输。经过 2 m 的水下传输之后，共轴多路信息广播的 OAM 模式入射到加载有反向螺旋相位板的 SLM 上，对不同广播信道的 OAM 模式进行解调。对应信道解调后的光场通过光电探测器进行接收，探测器输出的电信号通过微波放大器放大后输出到示波器，将采集到的信号进行处理并计算传输的 BER，评估基于 OAM 模式的水下广播通信系统的性能。

该实验中，首先对于四路 OAM 模式信息广播的 OAM 谱进行测量 ($l = -6, -3, +3, +6$)。图 6(a) 给出了理论仿真和实验测量的 OAM 谱分布，即不同阶数解调之后的光场强度分布。图 6(a) 中给出了实验测得广播信道和非广播信道的解调光场强度分布。从图 6(a) 中可以得出，广播信道

($l = -6, -3, +3, +6$) 解调后的光场中心为亮斑，而非广播的信道的光场中心则为暗斑 (如 $l = -9, 0, +8$)；广播信道和非广播信道之间的串扰最大约为 -13 dB，这里串扰指广播信道接收到的最小功率与非广播信道接收到的最大功率的比值。多路广播的 OAM 模式经过 2 m 水下传播之后，由于水下湍流和散射的影响，测得的串扰值最大约为 -6 dB。最后，实验对基于 OAM 模式的水下广播通信系统的 BER 性能进行测试，结果如图 6(b) 所示。将广播信道的 BER 与单个高斯模式信道经过 2 m 水下传输之后的 BER 对比来评估基于 OAM 模式的水下广播通信系统性能。从图 6(b) 中可以看出，广播 OAM 信道的 BER 曲线基本一致 ($l = -6, -3, +3, +6$)，这表明水下湍流和散射对不同信道的影响几乎一样。通过与高斯模式对比发现，在前向纠错编码 (FEC, forward error correction) 门限 ($BER = 1 \times 10^{-3}$) 处，4 个广播信道的功率代价约为 2 dB。图 6(b) 还给出了几个典型 BER 值下的星座图。

3.2 基于轨道角动量的滤波器

WDM 系统中经常使用可调滤波器来选择某个波长信道或去除带外噪声。类似地，可调模式滤波器在 OAM 多路复用系统中也很重要，例如，提取某个特定模式携带的信息。同时，OAM 模式在传输过程中可能失真，传输的单个模式会将功率耦合到其他 OAM 模式中。在这种情况下，OAM 模式滤波器可以过滤这些传输过程中不需要的模式。

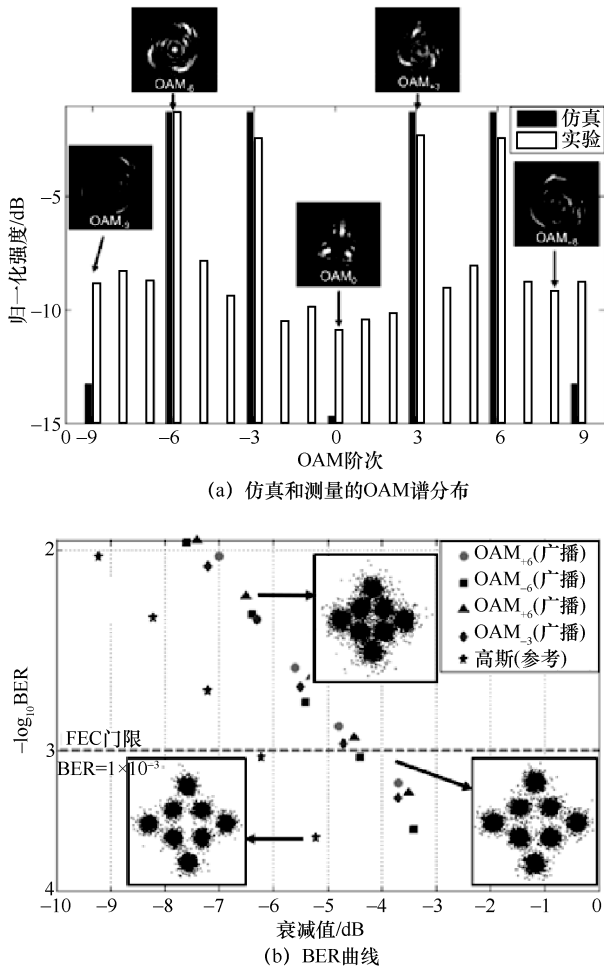


图 6 基于 OAM 模式的水下广播通信系统性能

图 7 给出了 OAM 模式滤波器的原理示意^[99]。OAM 模式滤波器原理主要是基于模式筛选器。图 7(a)和图 7(b)给出了模式筛选器的原理和映射示意，通过坐标变换将 OAM 模式的圆形光场分布变换为线形光场分布，不同的 OAM 在变换为线形光场分布后其相位梯度变化不同，这样再借助一个傅里叶变换透镜就可以将不同 OAM 在空间进行有效分离。之后，在焦平面放置一个垂直于传播方向的反射镜，将分离的光束反射，使之沿着相反的方向再次经过 OAM 模式筛选器，如图 7(c)所示。由于反射镜位于焦平面上，因此线形的反射光束被透镜准直，并转换为具有不同倾斜度的矩形平面波，再经过前述坐标变换的逆变换，将倾斜平面波转换回环形分布的 OAM 光束。同时，如果将透镜焦平面处的反射镜替换为可编程反射镜阵列，可以有选择地控制每个 OAM 模式通过或者不通过，以此实现可调谐的 OAM 模式滤波功能。滤波器中的模式变换器由 2 个反射光学元件组合而成，每个光学元件

的直径为 8 mm，其中焦距为 1 m 的透镜放置在模式变换器后用于汇聚光束。焦平面上有一个 SLM，其表面划分成多个不同部分，每一部分对应一个特定的 OAM 模式。对 SLM 划分的每个部分对应区域进行单独编程，可以将这部分对应的光束反射回透镜或衍射远离其他光束，从而有效地将其隔断。经过 SLM 反射的光束再次通过透镜和模式变换器，转换回所需的多个 OAM 光束，最后使用分束器将反向传播光束与输入光束分开。特别地，光束两次经过模式筛选器后，对应光束的拓扑电荷数是相反的，由于 BS 增加了一次反射，输出光束与输入 OAM 光束具有相同的拓扑电荷数。

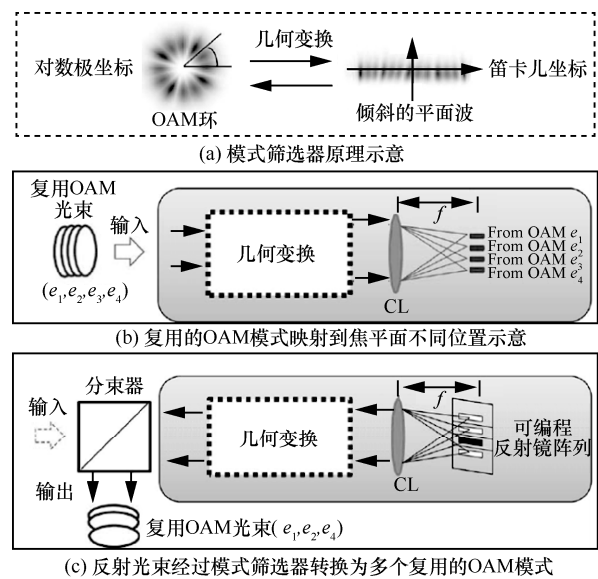


图 7 OAM 模式滤波器的原理示意

3.3 基于轨道角动量的信息交换

科技的进步使信息交互的方式和种类越来越多元化，互联网时刻都在发生信息交换。光通信网络作为全球互联网至关重要的部分遍布全球，因此，实现光网络中的信息交换就显得非常重要。传统光网络主要利用其他光子维度实现，其对应的光子信息交换技术已经比较成熟，如波长选择开关等已经在商用网络中广泛应用。对于光子的横向空间维度，在基于 OAM 模式的 SDM 光通信系统中实现基于 OAM 的信息交换同样也很重要。

图 8 给出了利用 OAM 模式“反号镜像”这一特性来实现信息交换的原理示意^[49]。“反号镜像”是指如果沿着 OAM 光束传播方向进行追踪观察，螺旋形相位波前的旋转方向在反射前后发生了反转，也就是说，经过反射后 OAM 的阶数由 l 变为

-1。在输入端 2 个 OAM 光束 ($l_1 = +8$ 、 $l_2 = +6$) 分别携带不同信息 A 和 B，两者共同入射到一个反射式 SLM 上，该 SLM 上加载螺旋相位因子 $\exp(il_R\varphi)$ ($l_R = -(l_1 + l_2) = -14$)。经过反射后，两 OAM 光束叠加该螺旋相位因子同时经历“反号镜像”，因而输出 OAM 阶数分别变为 $l'_1 = l_2 = +6$ 和 $l'_2 = l_1 = +8$ ，即两 OAM 光束的拓扑电荷数实现了交换而各自保持原来携带的数据信息，也可以说实现了 OAM 模式间的信息交换，数据信息采用差分正交相移键控 (DQPSK, differential quadrature phase-shift keying) 调制格式。

上述方式利用 SLM 非常巧妙地在自由空间实现了 OAM 模式的信息交换，在光纤 SDM 通信网络中，基于 OAM 模式的全光纤信息交换技术也具有很高的研究价值。图 9 给出了基于 OAM 模式的 SDM 系统中实现全光纤信息交换的实验装置^[70]。首先，可调激光器输出的激光通过强度调制器加载 5 Gbit/s 4 级脉冲幅度调制 (PAM-4, 4-ary pulse amplitude modulation) 信号。第一个掺铒光纤放大器 (EDFA, erbium-doped fiber amplifier) 将携带信号的激光放大并通过光纤分束器分为两路，分别入射到 2 个 SLM 上产生 2 个携带信号的 OAM 模式 $l = -1, 1$ ，其中一路通过半波片 (HWP, half-wave plate) 转换为正交的偏振，之后通过偏振合束器将正交偏振态的 2 个 OAM 模式合束，在此之前，一个携带信号的 OAM 模式通过传输一定长度的光纤与

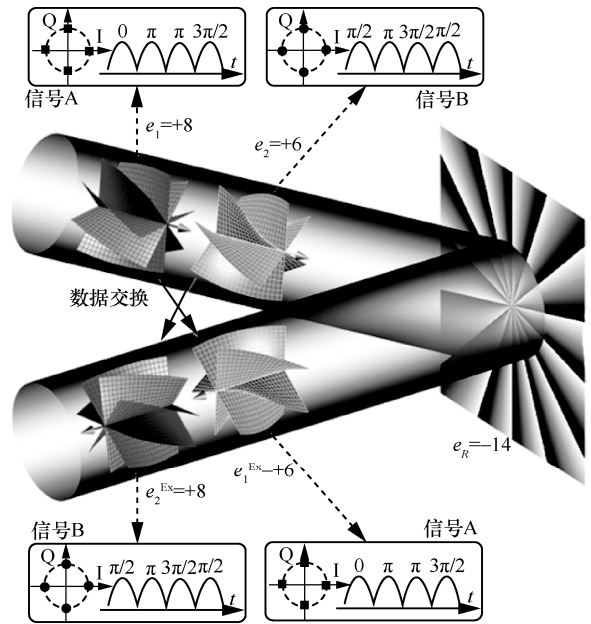


图 8 利用 OAM 模式“反号镜像”特性实现信息交换原理示意

另一个携带信号的 OAM 模式实现解相干，以此来模拟两路不同信号，最终实现携带不同信号的 2 个 OAM 模式共轴复用传输。然后，复用的 2 个 OAM 模式经过 1/4 波片将 2 个正交的线偏态转换为正交的右旋和左旋圆偏振态，分别对应 $l = 1$ 和 $l = -1$ 的 OAM 模式。将共轴传输的 2 个 OAM 模式耦合进 1.1 km OAM 光纤传输。全光纤信息交换单元通过自制的光纤线上偏振控制器 (PC-OAMF) 来实现，实验中，光纤的前端和后端放置信息控制单元，分别连接上一个和下一个 SDM 系统，实现更加完备

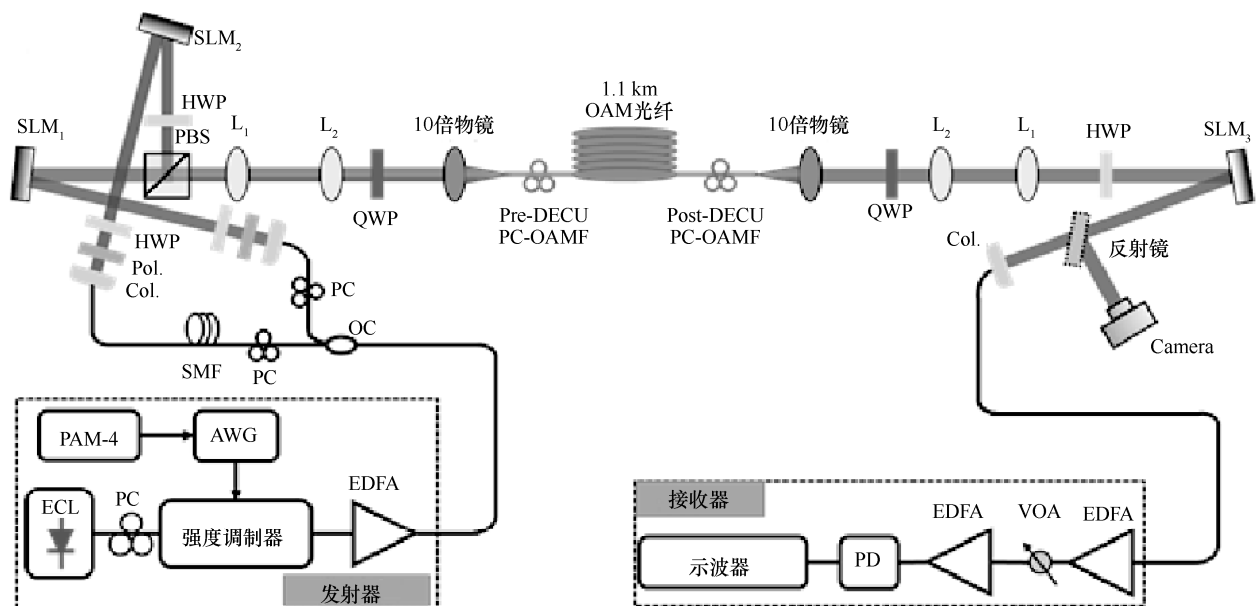


图 9 基于 OAM 模式的 SDM 系统中实现全光纤信息交换实验装置

的信息交换功能。通过 PC-OAMF 实现信息交换的原理为：圆偏振态的 OAM 模式 $l = -1, 1$ 由光纤本征模式 HE_{21}^{odd} 和 HE_{21}^{even} 叠加而成，合成方式为 $OAM_{+1}^R = HE_{21}^{even} + iHE_{21}^{odd}$ 和 $OAM_{-1}^L = HE_{21}^{even} - iHE_{21}^{odd}$ 。其中，R 和 L 分别代表右旋和左旋圆偏振态。调节 PC-OAMF 可以改变本征模式 HE_{21}^{odd} 和 HE_{21}^{even} 之间的相位差，当这 2 个模式之间的相位差为 π 时，上面 2 个合成 OAM 模式的计算式相互交换，这样就实现了全光纤 OAM 模式的信息交换。光纤输出的 2 个复用 OAM 模式通过 10 倍物镜准直，入射到另一个 SLM 上实现解调，最后耦合进入单模光纤进行相干探测。

实验分析基于 OAM 模式的 SDM 系统中经过前向、后向信息交换的系统 BER 性能。实验前先对 2 个 OAM 模式传输的串扰进行评估，测得的 $l = -1$ 和 $l = 1$ 的串扰约为 -17 dB。BER 性能测试通过与系统背靠背对比，在增强前向纠错 (EFEC, enhanced forward error correction) 门限处，2 个 OAM 模式复用传输且进行前向或后向信息交换操作时系统的功率代价小于 3.2 dB。2 个 OAM 模式复用传输但不进行信息交换操作时，在 EFEC 门限处系统的功率代价与前述基本一致，表明信息交换操作对系统性能影响很小。单个模式传输进行信息交换操作时，在 EFEC 门限处系统的功率代价小于 2 dB。

3.4 基于轨道角动量的分插复用器

在 WDM 通信网络中，可重构光分插复用器 (ROADM, reconfigurable optical add/drop multiplexer) 可以在通信网络节点将某一个或者多个波长信道的信息下载或者上传。ROADM 在多信道通信网络中非常有用，通过 ROADM，处于中间点的用户可以访问选定的某一个信道而不会干扰其他信道。因此，类似 WDM 通信网络，在基于 OAM 的 SDM 通信网络中，研究可以选择性操控 OAM 信道的可重构功能，如分插复用，有助于提高 OAM 模式在多用户通信网络中的实用性。

图 10 给出了基于 OAM 模式分插复用器及转换原理示意^[100]。OAM 分插复用器的实现包含 3 个部分：下转换、上传/下载、上转换。假定传输的 3 个信道的 OAM 的拓扑电荷数分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 ，复用的 3 个 OAM 模式强度呈同心圆环分布。通过加载 $-l_2$ 的螺旋相位板，选取拓扑电荷数为 l_2 的 OAM 模式下转换为类高斯模式，其他的信道仍然为 OAM 模式，拓扑电荷数变为 $l_1 - l_2$ 和 $l_3 - l_2$ 。由于 OAM

模式强度为环形分布，中心光强为 0，因此只要 OAM 模式之间的间隔足够大，那么下转换的类高斯模式就能与相邻阶的 OAM 模式分开。为了完成上传/下载，下转换的光束经过一个特殊设计的相位板，这个相位板在中心和外环区域具有不同的光栅，这样就能将中心的类高斯光束 (信道 2) 与其他 OAM 模式 (信道 1 和信道 3) 反射到不同方向，从而完成信道 2 下载。同时，将携带新的数据信息的高斯模式通过该光栅加入反射的 OAM 模式中。之后，通过加载与下转换相反的相位板 $+l_2$ 实现上转换过程，将所有 OAM 模式的拓扑电荷数还原，即 $l_1 - l_2 + l_2 = l_1$ 、 $0 + l_2 = l_2$ 和 $l_3 - l_2 + l_2 = l_3$ 。

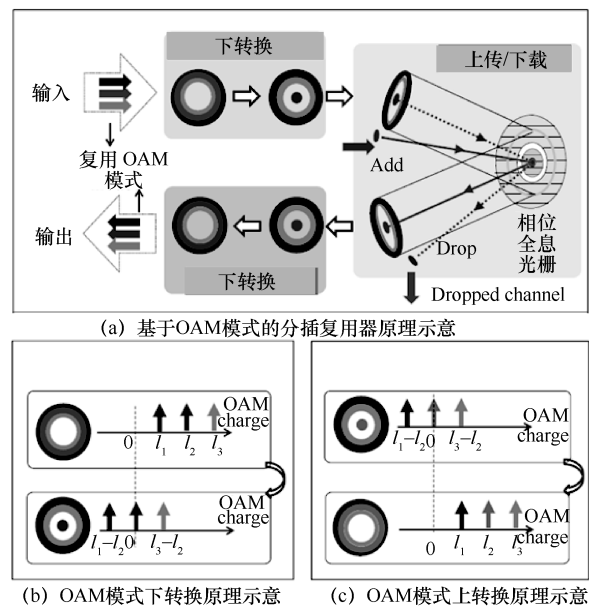


图 10 基于 OAM 模式分插复用器及转换原理示意

图 11 给出了基于 OAM 模式的分插复用器的部分测量结果^[100]。图 11(a1)~图 11(a4)给出了 -5 阶 OAM 模式上传/下载中各步骤的光场强度分布，图 11(a5)为对应的 BER 结果。图 11(b1)~图 11(b4)给出了 $+8$ 阶 OAM 模式的上传/下载中各个步骤的光场强度分布，图 11(b5)为对应的 BER 结果。

3.5 基于轨道角动量的光计算

OAM 的模式产生、操控和探测是基于 OAM 的光通信系统 3 个主要部分。一般对 OAM 模式进行操控主要是对 OAM 的拓扑电荷数进行加减法操作，包括螺旋相位板、SLM、 q -plate、集成发射器和超表面等^[101-105]。除了对 OAM 的拓扑电荷数进行位移操作外，对 OAM 模式的乘法和除法操作也同样有研究价值。通过非线性二次谐波的产生能实

现 OAM 模式的乘法以及频率上转换^[106-107]，但是这种方法的效率太低，对于实际应用有很大的缺陷。通过光学坐标变换也能实现 OAM 模式的乘法和除法操作，原理如图 12 所示^[108]。这个方法用了两次变换，其中相位板 1 和相位板 3 用来实现坐标变换，相位板 2 和相位板 4 用来实现变换之后光束的相位校正。将 OAM 的拓扑电荷数除以 n 的步骤如下。1) 通过极坐标系到笛卡儿坐标系的光学变换将螺旋环形相位的转换为具有线性矩形相位，然后进行相位校正；2) 选择 $1/n$ 的线性相位并将其合并为环形相位，通过笛卡儿坐标系到极坐标系的转换以及随后的相位校正来执行。上述过程中只选取了一部分光进行操作，因此会有 $(n-1)/n$ 的功率损耗，一个减小损耗的方法是将线形相位分为 n 份，将每一份的光都转换为环形相位，然后合束为一个 OAM 模式。将 OAM 模式的拓扑电荷数乘 n 的步骤如下。1) 将环形相位展开为线形相位并复制 n 份；2) 将每份线形相位都合成为 $2\pi/n$ 的弧形，并将所有的弧形组成一个环形。上述 2 个步骤都需要相位校正。

此外，还有一些其他的改进和拓展方法^[109]。一种是圆扇形映射，将输入 OAM 的方位角缩放为 $(\theta \rightarrow \theta/n)$ ，然后映射到角度为 $2\pi/n$ 的环形扇区，在相同的相位板上进行 n 次相同变换，产生 n 个互补扇区，并将其合并成一个完整的具有相位 $\exp(inl\varphi)$ 的圆环，以此来倍增输入的 OAM 模式拓扑电荷数。反之，通过组合多个逆变换，也可以将输入 OAM 模式的不同互补扇区映射为相等数量的圆形相位梯度，从而实现初始 OAM 的除法操作。实现变换的光学元件通过高分辨率电子束光刻制造纯相位衍射光学器件，这种基于 OAM 模式的乘

法和除法操作结构紧凑，显著减少了光学操作的次数和光学元件的总数，提高了光学效率。但是由于复杂的幅度调制或多变换相位板导致的高阶衍射带来了较大的损耗。

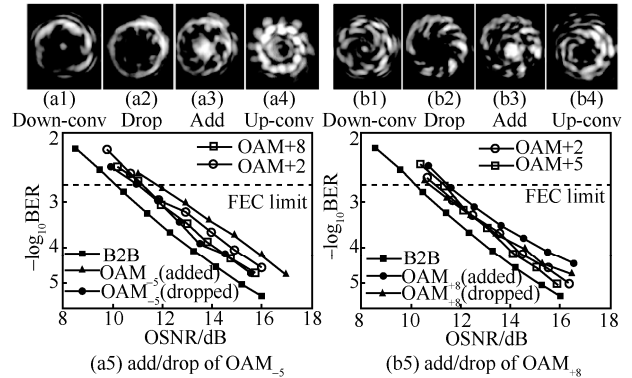


图 11 基于 OAM 模式的分插复用器的部分测量结果

3.6 基于轨道角动量的全息技术

全息技术提供了一种重建强度和相位信息的方法，并且已经通过 X 射线、电子束、中子束和光子束等^[110-112]实现。在光学领域，光的不同物理维度（包括偏振、波长、时间等）已经有报道用作大容量全息系统的独立信息通道^[113-115]。但是，OAM 模式尚未作为信息载体被应用到数字全息技术中。传统的数字全息术是通过目标图像的傅里叶变换与离散采样阵列进行卷积来创建数字全息图。其中，采样阵列不依赖入射光，而是根据目标图像的空间频谱以一定周期变化。如果利用 OAM 光束进行照明，根据布拉格衍射公式，所有的 OAM 模式都将以相同的方式进行衍射。因此，传统的数字全息图不能揭示 OAM 模式的多样性，并且无法利用 OAM 模式实现信息容量的增长，这就限制了 OAM 模式在传统数字全息技术中的应用。

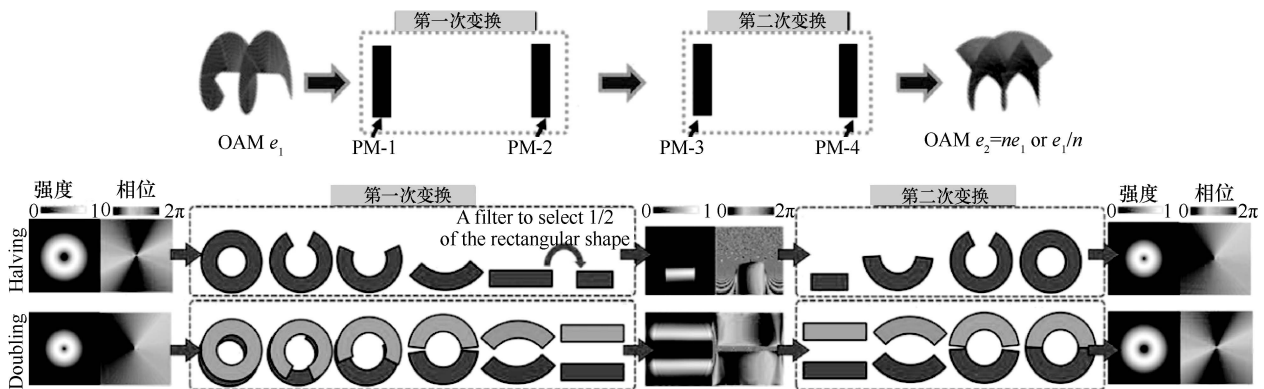


图 12 OAM 模式的乘法和除法操作原理示意

为了将 OAM 作为信息载体应用到全息技术中，必须在重建全息图像时利用 OAM 模式的正交特性。空间频域分析基于傅里叶变换，并且能够在空间域完整地表征系统的物理特性，这个方法为图像重建在内的一些基础研究提供了很大帮助。同时，空间域也为一些新型光学仪器中操控复杂光束提供了强有力的物理手段。具有不同拓扑电荷数的 OAM 模式傅里叶域变换为不同的空间频率，可以利用这一特性对全息技术的离散采样阵列进行编码，将采样阵列的周期与入射 OAM 模式的空间频率等价，具有较大拓扑电荷数的 OAM 模式对应的采样点的间隔较大。不同的 OAM 模式具有不同的采样阵列周期，使全息技术可以利用 OAM 模式的正交性和多样性。

2020 年，上海理工大学研究团队实现了基于 OAM 的全息技术^[116]。利用空间频域的 OAM 全息技术能够重建大量携带 OAM 的全息图像，并且与 OAM 模式数目一样，全息图像数目理论上可以有无穷多个。首先，设计了一个具有离散空间频率分布的全息图，以保持重建全息图像的每个像素中入射 OAM 光束的 OAM 特性，这是在全息技术中使用 OAM 作为独立信息载体的物理基础，称为 OAM 保留全息图。特别地，OAM 保留全息图使用采样频率 k_g 的空间频率，这样对入射的 OAM 模式的空间频率 k_{in} 添加了一个线性空间频率偏移，经过全息图之后的光束的空间频率 k_{out} 也拥有了从 OAM 模式继承来的螺旋相位波前。由于通过空间频率采样来设计保留 OAM 的全息图，在重建全息图的过程中，OAM 为守恒量，从而在重建的全息图像的每个像素中都保留了入射 OAM 模式的特性。相对地，入射的 OAM 偶数所携带的螺旋相位波前被传统的数字全息图完全破坏，OAM 保留数字全息图由于波前干涉而具有准连续的空间频率分布。将相位分布为 $l\varphi$ 的螺旋相位板与 OAM 保留全息图叠加，就可以得到 OAM 选择全息图，这样 OAM 选择全息图的空间采样频率分量就会携带螺旋波前。由于 OAM 守恒，只有特定的具有相反拓扑电荷数 ($-l$) 的入射 OAM 模式才可以将全息图像中的每个像素转换为具有更高强度分布的高斯模式，以此重建利用 OAM 信息载体进行编码的全息图像。更进一步地，可以设计利用不同 OAM 模式进行编码的 OAM 多路复用全息图，以进行高安全性的光学加密全息技术。

3.7 基于轨道角动量的量子信息处理

量子信息科学是一门将量子力学与计算机科学、信息科学相结合的新型交叉学科。经过三十多年的发展，这门学科形成了以量子计算和量子通信为主体，同时包括量子算法、量子纠错、量子密集编码、量子隐形传态等众多分支的完整结构体系。目前，大部分量子信息技术都在二维量子系统实现，即 qubit。高维量子通信具有如下优势^[117]。1) 具有更大的信息容量；2) 对噪声有更高的容忍度；3) 增强了对量子克隆的稳健性；4) 更显著地违反了定域理论和贝尔不等式。因此，近年来高维量子通信吸引了越来越多研究者的关注。具有不同 l 的 OAM 模式间相互正交，且 l 理论上可以取值为任意整数，这就意味着 OAM 模式可以构成一个无限维数的完备希尔伯特空间，因此有望实现高维量子通信。

2020 年，中国科技大学研究团队在 1 km 少模光纤中实现了基于 OAM 模式的高维量子纠缠分发^[118]。实验中纠缠光子对通过简并的 II 型自发参量下转换 (SPDC, spontaneous parametric down-conversion) 过程产生，泵浦激光波长为 775 nm，产生的闲频光和信号光经过偏振分束器 (PBS, polarization beam splitter) 分开，闲频光直接入射 SLM 进行分析，即 Alice。信号光光子在进入 1 km 光纤传输之前先经过一个预补偿模块，这部分在实验中至关重要，由于不同 OAM 模式之间的模式色散不可避免地导致退相干。因此，高维纠缠经过几厘米光纤传输就可能被破坏。预补偿模块包含 2 个干涉仪和一个锁定系统。经过预补偿之后，信号光光子耦合进入光纤传输，之后入射 SLM 进行分析，即 Bob。该工作首先实现了在 1 km 少模光纤中三维 OAM 的量子纠缠分发，相对于三维最大量子纠缠态，三维 OAM 纠缠态分发仍然达到了 71% 的保真度。

虽然利用 OAM 模式实现高维量子通信有诸多优势，但是该研究目前尚处在起步阶段，还有许多问题需要解决。一方面，OAM 模式在光纤中很不稳定，不容易操控；另一方面，需要设计特殊的光纤结构用于支撑高维量子通信系统中空间模式传输。此外，OAM 模式在光纤中的模式耦合问题也亟待解决。图 13 给出了通过探索偏振和 OAM 模式的混合纠缠态实现传统单模光纤中的多维量子纠缠传输的原理示意^[119]。

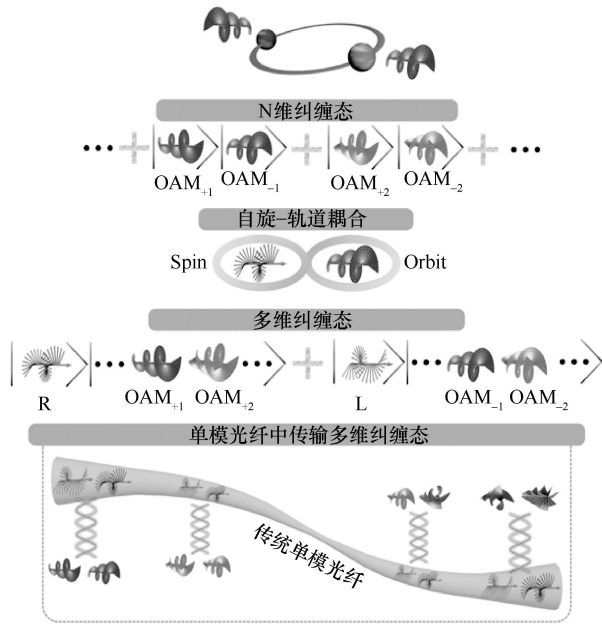


图 13 传统单模光纤中传输多维量子纠缠传输的原理示意

多维量子纠缠是指基于自旋轨道耦合实现二维偏振空间和高维 OAM 空间的结合，两者形成的混合纠缠态是无限的二维空间集。将偏振态光子在传统单模光纤网络中进行传输，利用成熟的偏振控制技术实现更长距离的单模光纤传输。同时，在自由空间，通过利用高维 OAM 空间获得高维量子通信的优势。实验中，通过 q -plate 实现自旋轨道耦合，其规律如下

$$\begin{aligned} |R\rangle|\ell\rangle &\xrightarrow{q\text{-plate}} |L\rangle|\ell - 2q\rangle \\ |L\rangle|\ell\rangle &\xrightarrow{q\text{-plate}} |R\rangle|\ell + 2q\rangle \end{aligned} \quad (1)$$

其中， q 为 q -plate 的阶数， $|R\rangle$ 和 $|L\rangle$ 代表二维偏振空间的右旋圆偏振态和左旋圆偏振态。从式(1)可以看出，根据入射光子的不同圆偏振态，出射的光子偏振态反转，并且会对光子的 OAM 阶数引入 $\pm 2q$ 的改变。Type-I SPDC 过程产生的纠缠光子对可以表示为

$$|\psi\rangle_{AB} = \sum_{\ell} c_{\ell} |H\rangle_A |H\rangle_B |\ell\rangle_A |-\ell\rangle_B \quad (2)$$

其中， $|H\rangle$ 表示水平偏振态，A 和 B 代表一组纠缠光子对。当高维 OAM 纠缠光子对中的某一个光子（如光子 A）经过自旋轨道耦合器件 q -plate，且 $\ell \pm 2q = 0$ 时，通过单模光纤后向选择能够得到如下偏振和 OAM 的混合纠缠态

$$|\psi^{\ell}\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|R\rangle_A + |L\rangle_A |-\ell\rangle_B) \quad (3)$$

其中，光子 A 属于二维偏振空间，是偏振的叠加态；OAM 阶数为 0（高斯光），表示为 $|\psi\rangle_A \propto (|L\rangle + |R\rangle)|0\rangle$ ；光子 B 属于高维 OAM 空间，是 OAM 模式的叠加态，偏振为单一偏振，表示为 $|\psi\rangle_B \propto |H\rangle(|\ell\rangle + |-\ell\rangle)$ 。光子 A 可以在单模光纤中传输，理论上通过适当的自旋轨道耦合器件或者切换 N 个不同的 q -plate，光子 B 可以在 N 维的 OAM 空间任意切换，因此，可以利用单模光纤传输 $2 \times N$ 的维度，实现多个二维空间纠缠即多维量子纠缠在单模光纤中的传输。

本文对基于 OAM 的光通信系统中几种典型的 OAM 光信号处理技术进行简要回顾，包括基于 OAM 的信息广播、滤波器、信息交换、分插复用器、光计算、全息技术和量子信息技术等 7 个方面的内容。相比被广泛研究的 OAM 光通信技术，基于 OAM 光信号处理技术的研究相对较少，目前大部分研究工作主要集中在自由空间的应用，少部分研究工作在光纤通信和 underwater 通信系统中应用，同时主要利用 SLM 和自由空间器件来实现信息处理功能，结构复杂，系统庞大，且处理的模式数目有限，不利于实际应用。因此，基于 OAM 的信息处理技术的研究可以拓展更多在光纤通信系统和集成片上通信中应用，实现全光纤或者片上集成小型化的 OAM 信号处理器件，提高信息交换技术的通信端口数量以及器件的兼容性和可扩展性。

4 结束语

本文简要回顾了近年来基于 OAM 光信号处理领域的研究进展，从中可以看出随着信息通信容量的持续增长，基于 OAM 的 SDM 通信系统将迎来飞速发展，类比其他成熟的光通信系统，如 WDM 系统，基于 OAM 的光信号处理技术将成为完善 OAM 通信网络中非常重要的一环。OAM 复用传输技术利用 OAM 作为信息载体，构建起不同的通信子网络；OAM 光信号处理技术通过对 OAM 模式的操控，实现通信网络节点处的各种 OAM 处理功能；将不同的通信子网络组合成一个完整的 OAM 通信网络，二者相辅相成，对于 OAM 在未来光通信系统中的实际应用不可或缺。特别地，OAM 光信号处理技术种类繁多，每一种类型的 OAM 通信网络（如自由空间、光纤、水下、深空等不同应用场景）都会对应有相应的 OAM 光信号处理技术，因此，

OAM 光信号处理技术值得更加广泛和充分的研究。

目前已经报道的研究工作只给出了 OAM 光信号处理技术的一小部分, 并且性能还有待改进。因此, OAM 光信号处理技术未来的发展首先应该从 OAM 光子维度出发, 类比其他维度的光信号处理技术, 进一步补充和完善基于 OAM 的光信号处理技术, 同时对其性能进行优化。在此基础上, 未来 OAM 通信网络必然会与光子的其他维度相结合, 实现多维光通信网络, 因此基于 OAM 的光信号处理技术也需要与其他光子维度融合, 实现含 OAM 的多维度融合光信号处理技术。对光子各个维度的光信号处理技术进行了完善和多维度融合之后, 即可将特定应用场景中的光信号处理技术向不同的应用场景推广, 如自由空间、光纤、水下、片上集成等。进一步地, 不同的应用场景之间的互连也需要实现对应的光信号处理技术。与此同时, 目前报道的光信号处理方法和器件结构都较庞大和复杂, 而对于未来应用, 小型化和集成化是重要趋势, 因此关键器件的小型化和集成化是一大挑战。同时, 针对多信道的 OAM 光通信系统, 光信号处理节点处的关键器件的可扩展性、可重构性和可编程特性也是值得关注的研究方向之一, 未来也可以考虑引入神经网络思想对相应器件进行优化设计。总体来说, 随着信息时代的飞速发展和全球信息一体化进程的加速, 海、陆、空、天、微一体化跨尺度多场景的光通信网将会是未来通信发展的重要趋势, 而前述与之相适应的光信号处理技术也将呈现更多的可能性。

参考文献:

- [1] ESSIAMBRE R J, TKACH R W. Capacity trends and limits of optical communication networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(5): 1035-1055.
- [2] LORD A, SOPPERA A, JACQUET A. The impact of capacity growth in national telecommunications networks[J]. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2016, 374(2062): 20140431.
- [3] WINZER P J, NEILSON D T. From scaling disparities to integrated parallelism: a decathlon for a decade[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(5): 1099-1115.
- [4] KAO K C, HOCKHAM G A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies[J]. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1966, 113(7): 1151-1158.
- [5] THOMPSON G H B, HOLONYAK N J. Physics of semiconductor laser devices[J]. *Physics Today*, 2008, 34(4): 62.
- [6] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [7] BORN M, WOLF E, HECHT E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[J]. *Physics Today*, 2000, 53(10): 77-78.
- [8] WINZER P J. Making spatial multiplexing a reality[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 345-348.
- [9] BRACKETT C A. Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1990, 8(6): 948-964.
- [10] TUCKER R S, EISENSTEIN G, KOROTKY S K. Optical time-division multiplexing for very high bit-rate transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(11): 1737-1749.
- [11] ZHOU X, YU J 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.
- [12] KOIZUMI Y, TOYODA K, YOSHIDA M, et al. 1024 QAM (60 Gbit/s) single-carrier coherent optical transmission over 150 km[J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12508-12514.
- [13] HIROOKA T, RUAN P, GUAN P Y, et al. Highly dispersion-tolerant 160 Gbaud optical Nyquist pulse TDM transmission over 525 km[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15001.
- [14] ZHANG J W, YU J J. Generation and transmission of high symbol rate single carrier electronically time-division multiplexing signals[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 1-6.
- [15] ZHANG J W, YU J J, ZHU B Y, et al. WDM transmission of twelve 960 Gb/s channels based on 120-Gbaud ETDM PDM-16QAM over 1200-km TeraWave™ fiber link[C]//*Proceedings of 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-3.
- [16] SANO A, MASUDA H, KOBAYASHI T, et al. Ultra-high capacity WDM transmission using spectrally-efficient PDM 16-QAM modulation and C- and extended L-band wideband optical amplification[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(4): 578-586.
- [17] SHIEH W, ATHAUDAGE C. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(10): 587.
- [18] TSUKAMOTO S, KATO H, KIKUCHI K. Coherent demodulation of optical multilevel phase-shift-keying signals using homodyne detection and digital signal processing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(10): 1131-1133.
- [19] LY-GAGNON D S, TSUKAMOTO S, KATO H, et al. Coherent detection of optical quadrature phase-shift keying signals with carrier phase estimation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 12-21.
- [20] KIKUCHI N, SASAKI S. Highly sensitive optical multilevel transmission of arbitrary quadrature-amplitude modulation (QAM) signals with direct detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(1): 123-130.
- [21] BEPPU S, KASAI K, YOSHIDA M, et al. 2048 QAM (66 Gbit/s) single-carrier coherent optical transmission over 150 km with a potential SE of 153 bit/s/Hz[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4960.
- [22] OLSSON S L I, CHO J, CHANDRASEKHAR S, et al. Probabilistically shaped PDM 4096-QAM transmission over up to 200 km of fiber using standard intradyne detection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4522-4530.
- [23] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.

- lexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [24] WINZER P J. Spatial multiplexing in fiber optics: the 10X scaling of metro/core capacities[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 2014, 19: 22-30.
- [25] WINZER P J. Making spatial multiplexing a reality[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 345-348.
- [26] LI G F, BAI N, ZHAO N B, et al. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2014, 6(4): 413.
- [27] MIZUNO T, TAKARA H, SANO A, et al. Dense space-division multiplexed transmission systems using multi-core and multi-mode fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 582-592.
- [28] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M, SPREEUW R, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [29] FRANKE-ARNOLD S, ALLEN L, PADGETT M. Advances in optical angular momentum[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, 2(4): 299-313.
- [30] YAO A M, PADGETT M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161-204.
- [31] PADGETT M J. Orbital angular momentum 25 years on [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11265-11274.
- [32] DHOLAKIA K, ČIŽMÁR T. Shaping the future of manipulation[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 335-342.
- [33] PATERSON L, MACDONALD M P, ARLT J, et al. Controlled rotation of optically trapped microscopic particles[J]. *Science*, 2001, 292(5518): 912-914.
- [34] PADGETT M, BOWMAN R. Tweezers with a twist[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 343-348.
- [35] BERNET S, JESACHER A, FÜRHAPTER S, et al. Quantitative imaging of complex samples by spiral phase contrast microscopy[J]. *Optics Express*, 2006, 14(9): 3792-3805.
- [36] LAVERY M P J, SPEIRITS F C, BARNETT S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum[J]. *Science*, 2013, 341(6145): 537-540.
- [37] FANG L, PADGETT M J, WANG J. Sharing a common origin between the rotational and linear Doppler effects[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(6): 1700183.
- [38] VIEIRA J, TRINES R M G M, ALVES E P, et al. Amplification and generation of ultra-intense twisted laser pulses via stimulated Raman scattering[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10371.
- [39] ELIAS N M I. Photon orbital angular momentum in astronomy[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2008, 492(3): 883-922.
- [40] MAIR A, VAZIRI A, WEIHS G, et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. *Nature*, 2001, 412(6844): 313-316.
- [41] LEACH J, JACK B, ROMERO J, et al. Quantum correlations in optical angle-orbital angular momentum variables[J]. *Science*, 2010, 329(5992): 662-665.
- [42] WILLNER A E, WANG J, HUANG H. A different angle on light communications[J]. *Science*, 2012, 337(6095): 655-656.
- [43] 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.
- [44] WANG J. Advances in communications using optical vortices[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(5): B14-B28.
- [45] WANG J. Data information transfer using complex optical fields: a review and perspective (Invited Paper)[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 30005-30009.
- [46] LI S H, CHEN S, GAO C Q, et al. Atmospheric turbulence compensation in orbital angular momentum communications: advances and perspectives[J]. *Optics Communications*, 2018, 408: 68-81.
- [47] WANG J. Metasurfaces enabling structured light manipulation: advances and perspectives[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(5): 050006.
- [48] WANG J. Twisted optical communications using orbital angular momentum[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(3): 34201.
- [49] 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.
- [50] FAZAL I M, AHMED N, WANG J, et al. 2 Tbit/s free-space data transmission on two orthogonal orbital-angular-momentum beams each carrying 25 WDM channels[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4753-4755.
- [51] HUANG H, XIE G D, 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.
- [52] LEI T, ZHANG M, LI Y R, et al. Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(3): e257.
- [53] LIU J, WANG J. Polarization-insensitive PAM-4-carrying free-space orbital angular momentum (OAM) communications[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 4258-4269.
- [54] BOZINOVIC N, YUE Y, REN Y X, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [55] GREGG P, KRISTENSEN P, RAMACHANDRAN S. Conservation of orbital angular momentum in air-core optical fibers: erratum[J]. *Optica*, 2017, 4(9): 1115.
- [56] LI S H, WANG J. Supermode fiber for orbital angular momentum (OAM) transmission[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18736-18745.
- [57] CHEN S, WANG J. Characterization of red/green/blue orbital angular momentum modes in conventional G.652 fiber[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, 53(4): 1-14.
- [58] CHEN S, WANG J. Theoretical analyses on orbital angular momentum modes in conventional graded-index multimode fibre[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 3990.
- [59] HUANG H, MILIONE G, LAVERY M P J, et al. Mode division multiplexing using an orbital angular momentum mode sorter and MI-MO-DSP over a graded-index few-mode optical fibre[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14931.
- [60] WANG A D, ZHU L, LIU J, et al. Demonstration of hybrid orbital angular momentum multiplexing and time-division multiplexing passive optical network[J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 29457-29466.
- [61] LIU J, LI S M, DU J, et al. Performance evaluation of analog signal transmission in an integrated optical vortex emitter to 3.6-km few-mode fiber system[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 1969-1972.
- [62] WANG A D, ZHU L, CHEN S, et al. Characterization of LDPC-coded

- orbital angular momentum modes transmission and multiplexing over a 50-km fiber[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 11716-11726.
- [63] CHEN S, LIU J, ZHAO Y F, et al. Full-duplex bidirectional data transmission link using twisted lights multiplexing over 1.1-km orbital angular momentum fiber[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38181.
- [64] ZHU L, YANG C, XIE D Q, et al. Demonstration of km-scale orbital angular momentum multiplexing transmission using 4-level pulse-amplitude modulation signals[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 763.
- [65] ZHU L, WANG A D, CHEN S, et al. Orbital angular momentum mode groups multiplexing transmission over 26-km conventional multi-mode fiber[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25637.
- [66] WANG A D, ZHU L, WANG L L, et al. Directly using 8.8-km conventional multi-mode fiber for 6-mode orbital angular momentum multiplexing transmission[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10038-10047.
- [67] ZHU L, WANG A D, CHEN S, et al. Orbital angular momentum mode multiplexed transmission in heterogeneous few-mode and multi-mode fiber network[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1894-1897.
- [68] ZHU G X, HU Z Y, WU X, et al. Scalable mode division multiplexed transmission over a 10-km ring-core fiber using high-order orbital angular momentum modes[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 594-604.
- [69] ZHU L, ZHU G X, WANG A D, et al. 18 km low-crosstalk OAM + WDM transmission with 224 individual channels enabled by a ring-core fiber with large high-order mode group separation[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1890-1893.
- [70] LIU J, ZHU L, WANG A D, et al. All-fiber pre- and post-data exchange in km-scale fiber-based twisted lights multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(16): 3896.
- [71] LIU J, WANG J. Demonstration of reconfigurable joint orbital angular momentum mode and space switching[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37331.
- [72] MILIONE G, LAVERY M P J, HUANG H, et al. 4×20 Gbit/s mode division multiplexing over free space using vector modes and a q -plate mode (de)multiplexer[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 1980.
- [73] LIU J, LI S M, ZHU L, et al. Direct fiber vector eigenmode multiplexing transmission seeded by integrated optical vortex emitters[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(3): 17148.
- [74] BAGHDADY J, MILLER K, MORGAN K, et al. Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9794.
- [75] REN Y X, LI L, WANG Z, et al. Orbital angular momentum-based space division multiplexing for high-capacity underwater optical communications[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33306.
- [76] ZHAO Y F, XU J, WANG A D, et al. Demonstration of data-carrying orbital angular momentum-based underwater wireless optical multicasting link[J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 28743.
- [77] ZHAO Y F, WANG A D, ZHU L, et al. Performance evaluation of underwater optical communications using spatial modes subjected to bubbles and obstructions[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4699-4702.
- [78] WANG L L, AI J Z, ZHU L, et al. MDM transmission of CAP-16 signals over 1.1-km anti-bending trench-assisted elliptical-core few-mode fiber in passive optical networks[J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 22991-23002.
- [79] WANG A D, ZHU L, ZHAO Y F, et al. Adaptive water-air-water data information transfer using orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8669-8678.
- [80] ZHAO Y F, CAI C K, ZHANG J R, et al. Feedback-enabled adaptive underwater twisted light transmission link utilizing the reflection at the air-water interface[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16102-16112.
- [81] 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.
- [82] FICKLER R, LAPKIEWICZ R, PLICK W N, et al. Quantum entanglement of high angular momenta[J]. *Science*, 2012, 338(6107): 640-643.
- [83] HUI X N, ZHENG S L, CHEN Y L, et al. Multiplexed millimeter wave communication with dual orbital angular momentum (OAM) mode antennas[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10148.
- [84] ZHAO Z, REN Y X, XIE G D, et al. Experimental demonstration of 16-Gbit/s millimeter-wave communications link using thin metamaterial plates to generate data-carrying orbital-angular-momentum beams[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1392-1397.
- [85] ZHU L, WEI X L, WANG J, et al. Experimental demonstration of basic functionalities for 0.1-THz orbital angular momentum (OAM) communications[C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-3.
- [86] CHAN V W S. Free-space optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4750-4762.
- [87] ANSARI I S, ALOUINI M S, CHENG J L. Ergodic capacity analysis of free-space optical links with nonzero boresight pointing errors[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(8): 4248-4264.
- [88] WANG J, LIU J, LV 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]//Proceedings of 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-3.
- [89] SMIT M, VAN DER TOL J, HILL M. Moore's law in photonics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(1): 1-13.
- [90] SU T H, SCOTT R P, DJORDJEVIC S S, et al. Demonstration of free space coherent optical communication using integrated silicon photonic orbital angular momentum devices[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9396.
- [91] GUAN B B, QIN C, SCOTT R P, et al. Polarization diversified integrated circuits for orbital angular momentum multiplexing[C]//Proceedings of 2015 IEEE Photonics Conference (IPC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 649-652.
- [92] LI S M, NONG Z C, WU X, et al. Demonstration of chip-to-chip communication based on ultra-compact orbital angular momentum (de)multiplexers[C]//Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics. Washington: OSA Publishing, 2018: 1-3.
- [93] LIU J, LI S M, DING Y H, et al. Orbital angular momentum modes emission from a silicon photonic integrated device for km-scale data-carrying fiber transmission[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15471-15479.
- [94] POIRIER P, NEUNER B 3rd. Undersea laser communication using polarization and wavelength modulation[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(11): 2283-2289.
- [95] LEE C M, ZHANG C, CANTORE M, et al. 4 Gbps direct modulation

- of 450 nm GaN laser for high-speed visible light communication[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 16232.
- [96] HALE G M, QUERRY M R. Optical constants of water in the 200-nm to 200-microm wavelength region[J]. Applied Optics, 1973, 12(3): 555-563.
- [97] 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.
- [98] WANG J, LI S H, LIU J, et al. Experimental demonstration of N-dimensional 1-to-1100 multicasting (25 wavelengths \times 22 orbital angular momentum modes \times 2 polarizations) of OFDM-mQAM signal[C]//Proceedings of CLEO. Washington: OSA Publishing, 2015: 1-2.
- [99] HUANG H, REN Y X, XIE G D, et al. Tunable orbital angular momentum mode filter based on optical geometric transformation[J]. Optics Letters, 2014, 39(6): 1689.
- [100] 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.
- [101] HARM W, BERNET S, RITSCH-MARTE M, et al. Adjustable diffractive spiral phase plates[J]. Optics Express, 2015, 23(1): 413-421.
- [102] HECKENBERG N R, MCDUFF R, SMITH C P, et al. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms[J]. Optics Letters, 1992, 17(3): 221.
- [103] CAI X L, WANG J W, STRAIN M J, et al. Integrated compact optical vortex beam emitters[J]. Science, 2012, 338(6105): 363-366.
- [104] YU N F, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [105] 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.
- [106] GARIEPY G, LEACH J, KIM K T, et al. Creating high-harmonic beams with controlled orbital angular momentum[J]. Physical Review Letters, 2014, 113(15): 153901.
- [107] BLOCH N V, SHEMER K, SHAPIRA A, et al. Twisting light by nonlinear photonic crystals[J]. Physical Review Letters, 2012, 108(23): 233902.
- [108] ZHAO Z, REN Y X, XIE G D, et al. Invited Article: division and multiplication of the state order for data-carrying orbital angular momentum beams[J]. APL Photonics, 2016, 1(9): 090802.
- [109] RUFFATO G, MASSARI M, ROMANATO F. Multiplication and division of the orbital angular momentum of light with diffractive transformation optics[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 113.
- [110] BRAGG W L. The X-ray microscope[J]. Nature, 1942, 149(3782): 470-471.
- [111] GABOR D. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.
- [112] SUR B, ROGGE R B, HAMMOND R P, et al. Atomic structure holography using thermal neutrons[J]. Nature, 2001, 414(6863): 525-527.
- [113] OZAKI M, KATO J I, KAWATA S. Surface-plasmon holography with white light illumination[C]//SPIE NanoScience + Engineering. Proc SPIE 8455, Metamaterials: Fundamentals and Applications V. Bellingham: SPIE Press, 2012, 8455: 26-31.
- [114] MUELLER J P B, RUBIN N A, DEVLIN R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. Physical Review Letters, 2017, 118(11): 113901.
- [115] LIM K T P, LIU H L, LIU Y J, et al. Holographic colour prints for enhanced optical security by combined phase and amplitude control[J]. Nature Communications, 2019, 10: 25.
- [116] FANG X Y, REN H R, GU M. Orbital angular momentum holography for high-security encryption[J]. Nature Photonics, 2020, 14(2): 102-108.
- [117] ERHARD M, FICKLER R, KRENN M, et al. Twisted photons: new quantum perspectives in high dimensions[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(3): 17146.
- [118] CAO H, GAO S C, ZHANG C, et al. Distribution of high-dimensional orbital angular momentum entanglement over a 1 km few-mode fiber[J]. Optica, 2020, 7(3): 232.
- [119] LIU J, NAPE I, WANG Q, et al. Multidimensional entanglement transport through single-mode fiber[J]. Science Advances, 2020, 6(4): eaay0837.

[作者简介]



刘俊（1991-），男，湖北天门人，博士，华中科技大学在站博士后，主要研究方向为基于结构光场的自由空间和光纤空分复用通信、基于轨道角动量的高维量子通信等。



王健（1981-），男，江苏南京人，博士，华中科技大学教授、博士生导师，主要研究方向为多维光通信、光信号处理、光场调控（轨道角动量、矢量光、结构光）、光电子器件与集成、硅基光子学等。