

文章编号:1007-5321(2019)01-0133-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2017-094

基于信息后处理的 OAM 态成分检测方法及应用

赵生妹^{1,2}, 张文浩¹, 姚 浩¹, 顾晓帆¹, 李 威¹

(1. 南京邮电大学 信号处理与传输研究院, 南京 210003; 2. 教育部宽带无线通信与传感网技术重点实验室, 南京 210003)

摘要: 为了有效提升轨道角动量(OAM)态的检测效率,提出一种基于快速傅里叶变换(FFT)的 OAM 态成分检测方法. 在马赫曾德尔干涉仪 2 臂上加入道威棱镜,其中一个道威棱镜设置为 0,另一个道威棱镜设置为 0~180°旋转,以接收干涉总光强,并对总光强进行 FFT,从而在 FFT 域中提取 OAM 态的成分信息. 数值仿真结果表明,该方法可有效地实施单个 OAM 态和复用 OAM 态的成分检测. 不同于传统 OAM 态的检测方法,本方法可同时获取对 FFT 域设定子区间内总能量的判决. 当该方法被应用于 OAM 通信系统时,能直接判决各 OAM 态信息,显著减小系统噪声对 OAM 复用通信性能的影响.

关 键 词: 功率受限轨道角动量态; 轨道角动量检测; 轨道角动量谱; 快速傅里叶变换

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

Detection of OAM State with Post Information Processing and Its Application in Communications

ZHAO Sheng-mei^{1,2}, ZHANG Wen-hao¹, YAO Hao¹, GU Xiao-fan¹, LI Wei¹

(1. Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology, Ministry of Education, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to effectively improve the detection efficiency of orbital angular momentum (OAM), we propose an OAM detection method based on post information processing. In the proposed detection method, a Mach-Zehnder interferometer is applied, and two doves are placed in each arm of the interferometer, where one is setup to 0 degree, and the other is rotated from 0 to 180 degree. The interference beam is received and the fast Fourier transform (FFT) is operated on the received signal. In the FFT domain, each OAM component is separated, named OAM spectrum. Numerical simulation results show that it is separable for one OAM mode, and multiplexed OAM mode by the proposed OAM detection method. Different from the general OAM separation method, the proposed method can obtain the OAM information by summarizing the total energy during a period in FFT domain. And the performance of the communication system can be improved by using this detection method.

Key words: orbital angular momentum; orbital angular momentum detection; orbital angular momentum spectrum; fast Fourier transform

光子是信息传递的重要载体,可以通过对光子的强度、相位、频率和偏振等物理量的调制,增加信

息传输速率. 另一方面,Allen 等首次于 1992 年实验证实了拉盖尔-高斯(LG, Laguerre-Gaussian)模

收稿日期: 2017-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(61871234, 61475075); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17-0771)

作者简介: 赵生妹(1968—),女,博士生导师, E-mail: zhaosm@njupt.edu.cn.

的每个光子具有 lh 的轨道角动量(OAM, orbital angular momentum)^[1], 其中 l 称为拓扑荷(TC, Topological charge). 事实上, 轨道角动量是经典力学和量子力学的基本物理量^[2], 它仅与射线束的空间分布有关, 是螺旋相位射线束的自然特性. 现已证明, 无论是电子束、X-射线、还是无线电束都具有螺旋相位特性^[3-11]. 由于 OAM 态中 l 的取值可从负无穷至正无穷^[12], 且不同拓扑荷的 OAM 态的空间分布函数(又称空间模)相互正交, 因此 OAM 态更适合于信息信息的复用传输, 现已成为自由空间光通信(FSO, free-space optical communication)系统中一个全新的信息自由度^[13-14].

随着 OAM 的广泛应用, 高效快速的 OAM 检测和分离手段越来越受到人们的关注^[15-22]. 2010 年, Berkhout 等^[18-22]提出了一种高效的 OAM 态检测方法, 它基于静态光学原理, 运用坐标变换将螺旋相位的光束转变为横向的具有相位梯度的光束, 通过在电荷耦合器件横向不同位置的聚焦分离出不同的

OAM 态. 然而, 由于每个 OAM 态在横向位置都存在一定的宽度, 其分离精度受到一定限制.

考虑到现实的 OAM 态通信系统, 人们仅需要获取 OAM 态成分信息, 而不需要将接收态逐个分离, 同时考虑接收设备的低成本, 论文提出一种基于信息后处理的 OAM 态成分检测方法. 它在不需增加昂贵的物理器件条件下, 可通过 FFT 变换实现 OAM 态成分检测, 且针对一次干涉输出的光强, 可通过信息后处理获取各个 OAM 态的成分信息.

1 基于信息后处理的 OAM 态成分检测方法

基于信息后处理 OAM 态成分检测方法示意图如图 1 所示, 马赫-曾德尔干涉仪 2 臂分别加入一个道威棱镜, 其中一个道威棱镜固定放置, 即棱镜角度为 0° , 另一个道威棱镜则以 $0^\circ \sim 180^\circ$ 为周期绕光轴旋转, 因此, 光路能够以 $0^\circ \sim 360^\circ$ 为周期.

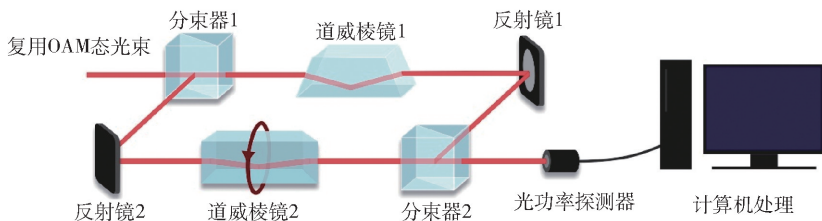


图1 基于信息后处理 OAM 态成分检测方法系统示意图

图 1 是基于信息后处理 OAM 态成分检测方法系统示意图. 入射的 OAM 态光束被分束器 1 分为 2 路, 其中一路光束通过道威棱镜 1 后(棱镜角度为 0°), 经由反射镜 1 射入分束器 2; 另一路经由反射镜 2 后, 通过一块绕轴旋转的道威棱镜 2 射入分束器 2. 接着, 2 路光束在分束器 2 处干涉合并, 出射光束将由光功率探测器接收, 并将数据传送给计算机进行快速傅里叶变换(FFT, fast Fourier transform)处理. 最终, 计算机将道威棱镜 2 的旋转情况, 给出复用 OAM 态光束的成分信息.

现给出基于信息后处理 OAM 态成分检测方法的理论推导. 为了简化推导过程, 不失一般性, 假设 OAM 态光束的光场分布为

$$E(l) = A \exp(i l \theta) \quad (1)$$

其中: A 是光场强度; l 是方位指数, 代表 OAM 态的拓扑荷, θ 为方位角. OAM 态光束被分成 2 路, 一路经过旋转角度为 0 的道威棱镜, 另一路经过旋转角度为 $\theta_i/2$ 的道威棱镜. 当 OAM 态经过旋转角度为

$\theta_i/2$ 的道威棱镜后, 其光场分布变为

$$E(l) = A \exp[i l (\theta + \theta_i)] \quad (2)$$

2 路光束通过相同的光程后在分束器 BS_2 处合并, 探测到的光强应为

$$\left| \frac{1}{\sqrt{2}} A \exp(i l \theta) + \frac{1}{\sqrt{2}} A \exp(i l (\theta + \theta_i)) \right|^2 \quad (3)$$

当方位角旋转一周时, 光功率探测器所接收到的光强为

$$\begin{aligned} I &= \int \left| \frac{1}{\sqrt{2}} A \exp(i l \theta) + \frac{1}{\sqrt{2}} A \exp(i l (\theta + \theta_i)) \right|^2 d\theta = \\ &= \int \left| \frac{1}{\sqrt{2}} A \exp(i l \theta) [1 + \exp(i l \theta_i)] \right|^2 d\theta = \\ &= \pi A^2 (1 + \cos l \theta_i) \propto 1 + \cos l \theta_i \end{aligned} \quad (4)$$

由此可见, 2 路光束干涉后的光场强度 I 与道威棱镜 2 旋转角度 θ_i 有关, 随着 $l \theta_i$ 的变化成余弦特性, 频率与 l 值有关. 对于不同 l 值, 可通过设置 θ_i 提取 l 值的成分信息.

进一步分析复用 OAM 态情形. 假设 2 个 OAM

复用态的光场分布为 $A_1 \exp(i l_1 \theta) + A_2 \exp(i l_2 \theta)$, 其中 l_1 和 l_2 是 2 个 OAM 态的拓扑荷, A_1 和 A_2 是 OAM 态光场强度. 经过相同的操作后, 光功率探测器所接收到的光场强度为

$$I = \int | (1/\sqrt{2}) A_1 \exp(i l_1 \theta) [1 + \exp(i l_1 \theta_i)] + (1/\sqrt{2}) A_2 \exp(i l_2 \theta) [1 + \exp(i l_2 \theta_i)] |^2 d\theta = A_1^2 + A_2^2 + A_1^2 \cos(i l_1 \theta_i) + A_2^2 \cos(i l_2 \theta_i) = \sum_{k=1}^2 A_k^2 + \sum_{k=1}^2 A_k^2 \cos(l_k \theta_i) \quad (5)$$

式(5)表明, 光场强度可以表示为 2 种不同余弦分量的叠加. 由此类推, 对于 n 个 OAM 态复用的光束的光功率探测器所接收到的光强应为

$$I = \int | (1/\sqrt{n}) A_1 \exp(i l_1 \theta) [1 + \exp(i l_1 \theta_i)] + \cdots + (1/\sqrt{n}) A_n \exp(i l_n \theta) [1 + \exp(i l_n \theta_i)] |^2 d\theta = A_1^2 + \cdots + A_n^2 + A_1^2 \cos(i l_1 \theta_i) + \cdots + A_n^2 \cos(i l_n \theta_i) = \sum_{k=1}^n A_k^2 + \sum_{k=1}^n A_k^2 \cos(l_k \theta_i) \quad (6)$$

若对式(6)进行快速傅里叶变换, 可得到

$$\text{FFT}[I] = 2 \sum_{k=1}^N A_k^2 \pi \delta(l) + A_1^2 \pi [\delta(l + l_1) + \delta(l - l_1)] + \cdots + A_N^2 \pi [\delta(l + l_N) + \delta(l - l_N)] \quad (7)$$

若仅取式(7)的非负部分, 则可以得到

$$\text{FFT}[I] = \pi \left[2 \sum_{k=1}^N A_k^2 \delta(l) + A_1^2 \delta(l - l_1) + \cdots A_N^2 \delta(l - l_N) \right] \propto 2 \sum_{k=1}^N A_k^2 \delta(l) + A_1^2 \delta(l - l_1) + \cdots A_N^2 \delta(l - l_N) \quad (8)$$

至此, 原本在空间上难以分离的复用 OAM 态光束, 就可以转化成相互分离的 δ 函数之和, 即实现了复用 OAM 态在 FFT 域的分离. 另一方面, 每个 OAM 本征态分量对应的幅度值正比于各自的功率, 因而式(8)也可被理解为描述了接收光束的 OAM

谱. 对于不同 l 值, 可通过设置 θ_i 提取 l 值的 OAM 态成分信息. 于是可在 FFT 域提取各 OAM 态.

若将这种 OAM 态提取方法应用于 OAM 态复用系统, 还具有一定的抗噪声能力. 当 OAM 态受噪声干扰, 如大气湍流干扰, 在 FFT 域中会出现 OAM 态的能量弥散. 该方法由于是信息后处理方法, 可以在 FFT 域中设置一段小区域, 而不是 OAM 的本征态能量点, 通过小区域间的总能量对 OAM 态进行判决; 同时由式(8)可知, OAM 谱在 $l=0$ 处的幅值可以用来判断所复用的 OAM 态总个数.

2 成分检测方法在自由空间光通信系统中的应用

图 2 是基于 OAM 成分检测的 4 束 OAM 态自由空间光通信方案, 其中 OAM 态的拓扑荷值 l 取 2, 4, 6, 8. 4 束经过二进制启闭键控 (OOK, on-off keying) 调制的高斯光入射 4 个透射型 SLM, 分别转换成 4 路不同的 OAM 态光束, 经过光束耦合系统、望远镜系统, 传送至自由空间. 接收端, 复用 OAM 态光束经过望远镜系统整形后进入 OAM 成分检测系统. 由于数值仿真中最大的 OAM 值取为 8, 根据 Nyquist 采样定理, 可以计算出旋转道威棱镜的旋转步进最大值为 $\frac{\pi}{16}$. 每当旋转道威棱镜的旋转一个角度时, 光功率探头将测量一次, 并将数据传送到计算机. 当采样完一个周期后, 将采集结果进行 FFT 变换.

对于具体的解复用方案如下: 首先在 FFT 域上划分 4 个均匀的区间, 使得每个区间内都包含一个用于复用传输的 OAM 本征态; 之后, 根据获取的 OAM 谱在 $l=0$ 处的幅值, 判断出此次通信传输的 OAM 本征态的个数, 并分别计算出 4 个区间内所有 OAM 态分量的功率之和; 最后, 依照判断出的 OAM 本征态的个数, 按照区间功率总和从高到低选取相应数目的区间, 那么这些区间对应的本征态即判为

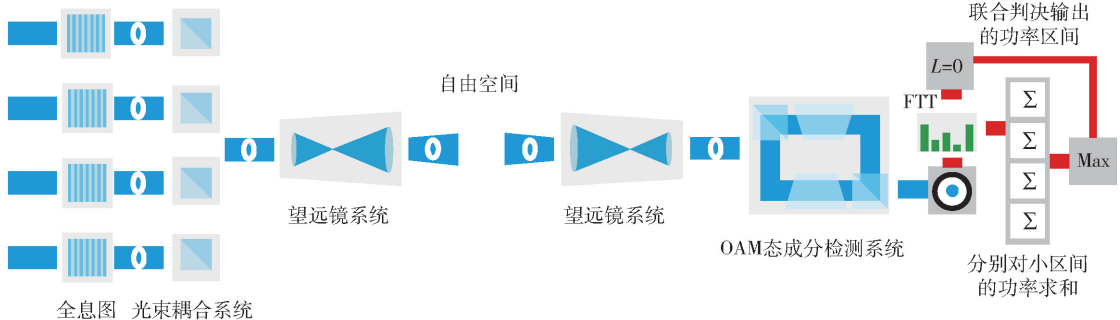
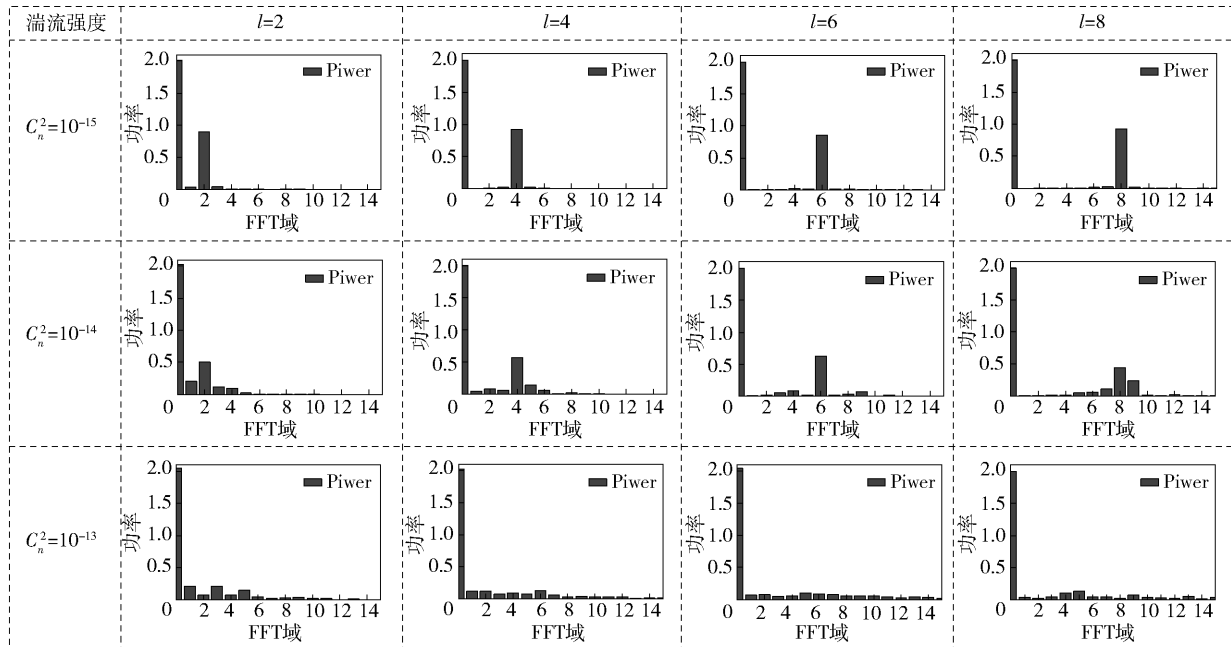


图 2 基于 OAM 成分检测的 4 束 OAM 自由空间光通信方案

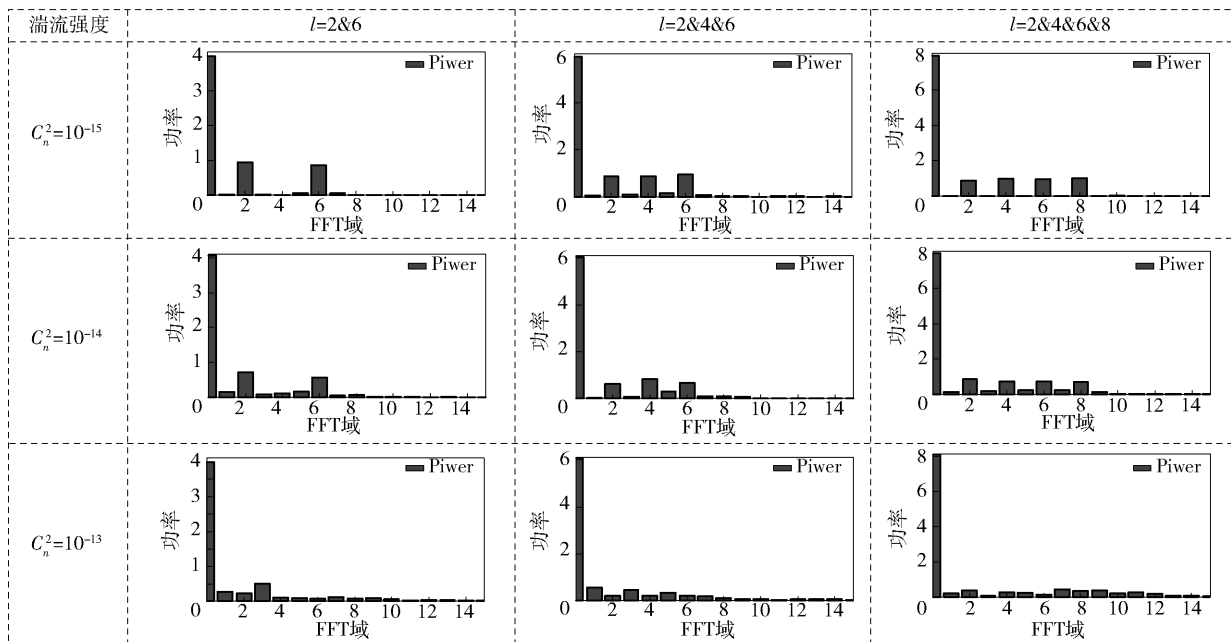
1,即获得 OAM 态成分信息。

以 Labview 软件为数据仿真工具,使用 LG 模表示 OAM 态,其中 LG 模式光的波长设置为 $1.55 \times 10^{-6} \text{ m}$,束腰半径设置为 0.035 m ,光场强度归一化。引入的大气湍流模型采用文献[23]中的相位屏模型。数值仿真中用了 10 个随机相位屏模拟大气湍流,每 2 个相位屏之间的距离为 100 m ,外尺度 $L_0 = 50 \text{ m}$,内尺度 $l_0 = 1 \text{ mm}$,LG 光束在大气湍流中的传输距离均为 1 km 。

图 3 给出了基于 FFT 的复用 OAM 态检测方法在不同湍流强度下,对单个 OAM 态和 OAM 复用态的检测结果,其中图 3(a)为单个 OAM 态的检测结果,图 3(b)为 OAM 复用态的检测结果。图 3 显示不论在何种湍流强度下,FFT 域中 $l=0$ 处的幅值保持不变,且正比于通信过程中总的光功率。因此,在每个 OAM 本征态光功率相等的前提下,可以凭借 OAM 谱在 $l=0$ 处的幅值来判断接收到的 OAM 态的个数;另一方面,在湍流强度为 $C_n^2 =$



(a) 单个 OAM 态的检测结果



(b) OAM 复用态的检测结果

图 3 基于信息后处理 OAM 态检测方法的数值仿真

$1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 和 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, 即弱湍流和中等强度的湍流, 通过该方法可以在 FFT 域中可以清晰地分析出被检测复用 OAM 态的成分信息, 但是当湍流强度达到 $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, 即强湍流时, OAM 谱的弥散现象变得十分严重, 无法进行正确判决. 研究结果表明基于 FFT 的复用 OAM 态检测方法可以在弱或中等强度湍流下检测出单个 OAM 态和复用 OAM 态成分. 图 3 所示为用同一方法检测单个 OAM 态和 OAM 复用态的结果, 当输入是单个 OAM 态时, FFT 域有一个 OAM 谱主峰; 而当输入是 OAM 复用态时, FFT 域有多个 OAM 谱主峰. 另外, 由于大气湍流的作用, 单个 OAM 态输入时, 只有单 OAM 态在 FFT 域中弥散, 而 OAM 复用态输入时, 在 FFT 域中不仅存在 OAM 态的弥散, 而且出现 OAM 态间串扰. 因此, 基于信息后处理的 OAM 态成分检测方法应用于单 OAM 态的精度要优于 OAM 复用态.

进一步假设 $l=2, 6, 10, 14$, 且除了大气湍流外, 大气的衰减效应、电信号处理中的噪声由方差为 0.01 的高斯白噪声模拟. 图 4 给出了 4OAM 态复用通信系统在使用本成分检测方法和基于逆相位掩膜检测方法^[24]下的系统误码率性能比较.

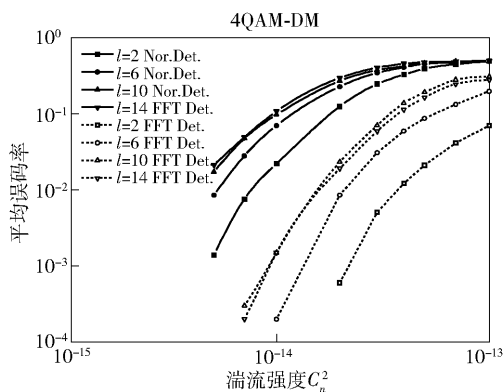


图 4 $l=2, 6, 10, 14$ 的 OAM 复用通信系统的误码率性能

数值仿真结果表明, 大气湍流对基于 4OAM-DM 调制的 FSO 通信系统有着明显的影响, 随着湍流强度的增大, 系统的误码率也随之增高; 且参与复用的 OAM 态的 l 值越大, 对应的系统误码率越高. 同时, 本 OAM 态成分检测方法相对于逆相位掩膜检测方法有着明显的优势, 对于同一 l 值的 OAM 态来载荷信息, 本 OAM 态成分检测方法获得的误码率性能至少提升一个数量级, 且当复用 OAM 态的拓扑荷间距越大时, 本方法的检测性能越好. 例如, 利用本 OAM 态成分检测方法, 提取 $l=2$ OAM 所载

OOK 信号时, 先获得 OAM 谱, 设置 $l=1, 2, 3$ 的小区域, 对该小区域间的每个 OAM 谱的能量求和后进行判决. 随着 OAM 态在 OAM 谱上的距离增大, 利用区间功率总和进行判决时, 将会大大提高系统误码率性能. 当该方法被应用于 OAM 通信系统时, 能直接判决各 OAM 态信息, 显著减小系统噪声对 OAM 复用通信性能的影响.

3 结束语

提出一种基于信息后处理 OAM 态检测方法, 即通过快速傅里叶变换, 将空间上具有复杂结构的复用 OAM 光束转换至 FFT 域中一个个分离的 OAM 本征态上, 这样可避免空间分离复用 OAM 态光束所需的复杂设备, 且分离过程可以通过计算机的后信息处理完成. 数值仿真结果表明: 笔者提出的方法可以有效地实施单个 OAM 态、复用 OAM 态的成分检测; 不同于传统检测方法, 只针对某个 OAM 本征态的能量进行判决, 本方法可以获取设定 FFT 域子区间内总能量的判决. 这样, 在 OAM 态通信系统中, 当选取区间合理的情况下, 可大大减小系统噪声对性能的影响, 且直接判断复用 OAM 态成分信息的解复用方法可为 OAM 态通信系统的实现提供一种新的思路.

参考文献:

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, 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): 81-85.
- [2] Mandel L, Wolf E, Meystre P. Optical coherence and quantum optics [C] // Optical Coherence and Quantum Optics. [S. l.]: Cambridge University Press, 2001: 1438-1439.
- [3] Franke-Arnold S, Allen L, Padgett M. Advances in optical angular momentum [J]. Laser and Photonics Reviews, 2008, 2(4): 299-313.
- [4] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. Advances in Optics and Photonics, 2011, 3(2): 161-204.
- [5] Uchida M, Tonomura A. Generation of electron beams carrying orbital angular momentum [J]. Nature, 2010, 464(7289): 737-9.
- [6] McMoran B J, Agrawal A, Anderson I M, et al. Electron vortex beams with high quanta of orbital angular mo-

- mentum[J]. Science, 2011, 331(6014): 192-195.
- [7] Sasaki S, McNulty I. Proposal for generating brilliant x-ray beams carrying orbital angular momentum [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(12): 124801.
- [8] Marrucci L, Manzo C, Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media [J]. Physical Review Letters, 2006, 96(16): 163905.
- [9] 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.
- [10] Thidé B, Then H, Sjöholm J, et al. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(8): 087701.
- [11] Tamburini F, Mari E, Sponselli A, et al. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test [J]. New Journal of Physics, 2012, 14(3): 033001.
- [12] 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.
- [13] Wang A, Dong B, Wang D Y, et al. A large serial time-division multiplexed fiber bragg grating sensor network [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(17): 2751-2756.
- [14] 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.
- [15] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, et al. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate [J]. Optics Communications, 1994, 112(5-6): 321-327.
- [16] 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): 221-223.
- [17] 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.
- [18] Hossack W J, Darling A M, Dahdouh A. Coordinate transformations with multiple computer-generated optical elements [J]. Journal of Modern Optics, 1987, 34(9): 1235-1250.
- [19] Lavery M P J, Robertson D J, Berkhout G C G, et al. Refractive elements for the measurement of the orbital angular momentum of a single photon [J]. Optics Express, 2012, 20(3): 2110-2115.
- [20] Berkhout G C G, Lavery M P J, Courtial J, et al. Efficient sorting of orbital angular momentum states of light [J]. Physical Review Letters, 2010, 105(15): 153601.
- [21] Mirhosseini M, Malik M, Shi Z, et al. Efficient separation of the orbital angular momentum eigenstates of light [J]. Nature Communications, 2013, 4(7): 2781.
- [22] Cheng Li, Shengmei Zhao. Efficient separating orbital angular momentum mode with radial varying phase [J]. Photonic Research, 2017, 5(4): 267-270.
- [23] Zhao S M, Leach J, Gong L Y, et al. Aberration corrections for free-space optical communications in atmosphere turbulence using orbital angular momentum states [J]. Optics Express, 2012, 20(1): 452-461.
- [24] 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.