

文章编号 1672-6634(2024)01-0023-06

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2023010001

基于双量子数调制光通信系统的噪声滤除

张建东,王 帅

(江苏理工学院 数理学院,江苏 常州 213001)

摘 要 针对无线光通信中背景噪声和干扰噪声影响的问题,提出了双量子数调制的通信系统,展示了基于轨道角动量自由度调控实现噪声滤除的物理机理,还研究了大气湍流环境下的信噪比提升效果和信号利用率。结果表明,对于不同的湍流强度和调制量子数,信噪比可以提升几倍到几十倍。此外,在任意湍流强度的情况下,系统的信号利用率均大于50%。当调制量子数较大时,信号利用率接近100%。

关键词 激光通信;轨道角动量;大气湍流;信噪比

中图分类号 E963

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Noise Filtering of Optical Communication Systems Based on Two Modulated Quantum Numbers

ZHANG Jiandong, WANG Shuai

(School of Mathematics and Physics, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract This paper focuses on the impacts of background and jamming noise in wireless optical communications and proposes a communication system with two modulated quantum numbers. The physical mechanism of noise filtering based on the control of degree of freedom of orbital angular momentum is showed, and the effects of improved signal-to-noise ratio and signal utilization in atmospheric turbulence are studied. The results show that the signal-to-noise ratio can be improved by several times and even more for different turbulence intensities as well as modulated quantum numbers. In addition, the signal utilization of the system is more than 50% under any turbulence intensity. When the modulated quantum numbers are large, the signal utilization of the system approaches to 100%.

Key words laser communication; orbital angular momentum; atmospheric turbulence; signal-to-noise ratio

0 引言

激光的发明为光学传感领域注入了强大的动力,极大地推动了测量和通信等技术的演进。通过调控光场的偏振、强度和频率等自由度,可以实现信息的加载与读取。作为现代信息技术的重要代表,激光通信具有高带宽、快速度和抗电磁干扰等特点,广泛应用于天空、陆地和海洋等场景。近年来,随着应用场景复杂程度不断加剧,激光通信领域对于系统抗噪能力的要求也日益提高。光纤光通信系统具有特定的传输通道,所

收稿日期:2023-06-14

基金项目:国家自然科学基金项目(12104193)资助

通信作者:张建东,男,满族,博士,讲师,研究方向:光量子信息处理,E-mail:zhangjiandong@jsut.edu.cn。

以对于外界噪声具有较强的鲁棒性。相比之下,无线光通信系统的传输路径中可能存在太阳辐射等背景噪声和定向的干扰噪声,使其对于外界噪声非常敏感。有鉴于此,提升无线光通信系统的抗噪能力是一个亟待解决的问题。

1992年,Allen等人首次证明了光场可以携带轨道角动量自由度,并给出了轨道角动量光场的振幅表达式^[1]。随后的研究发现,轨道角动量的量子数可以构成无穷维希尔伯特空间,能够显著提升信道容量。此外,轨道角动量光场具有自愈合特性,可以实现“绕物传输”^[2-5]。上述特性使得基于轨道角动量自由度调控的激光通信成为光学传感领域的重点研究课题之一,得到了大量的理论和实验研究^[6-12]。这些方案使用 n 种单量子数的轨道角动量光场进行信息编码和解码,显著提高了通信系统的信道容量。在信息解码方面,目前主要有以下两种方式:(1)通过光纤将接收信号分为 n 份并利用 n 个单独的探测器进行量子数检测;(2)通过特殊的衍射光栅将接收信号按照量子数进行空间分离。由于分光操作和衍射效应导致信号利用率大幅降低,这两种方式均不适用于远距离通信系统。

近年来,基于双量子数轨道角动量光场的信息编码和解码也得到了关注。Krenn等人先后开展了信道长度为3 km和143 km的原理验证实验^[13-15]。最近,Chen等人完成了信道长度为55 m的水下光通信实验^[16]。不同于先前的方案,双量子数轨道角动量光场的量子数可以通过光强分布进行直接判断,使得系统的信号利用率显著提高。但是在定向干扰和背景噪声的影响下,光强分布将发生畸变,进而导致信息解码出现错误。因此,在高信号利用率的前提下滤除外界噪声是一个极具价值的研究课题。

针对上述问题,在双量子数调制光通信系统的基础上,拓展了轨道角动量自由度的功能,通过在发射端和接收端进行轨道角动量调控,实现了外界噪声的有效滤除。为了验证系统的实际性能,分析了大气湍流对于通信系统的影响,推导了外界噪声环境下的信噪比提升效果以及信号利用率。

1 基于双量子数调制的光通信系统

在柱坐标下,单量子数轨道角动量光场的振幅可以表示为^[1]

$$E_l(r, \varphi, z) = \frac{C}{\sqrt{1+z^2/z_R^2}} \left[\frac{\sqrt{2}r}{\omega(z)} \right]^l \exp\left(\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right) \exp\left[\frac{-ikr^2z}{2(z^2+z_R^2)}\right] \exp(il\varphi) \exp\left[i(l+1)\tan^{-1}\frac{z}{z_R}\right], \quad (1)$$

式中 C 为归一化系数, z_R 为瑞利距离, k 为波矢, $\omega(z)$ 为束腰半径, l 为轨道角动量光场的量子数。从上式能够看出,基模高斯光场就是量子数为0的轨道角动量光场。由信息光学理论可知:基模高斯光经过 $\arg[E_l(r, \varphi, z=0)]$ 的相位调制后即可变为单量子数轨道角动量光场。

在此基础上,双量子数轨道角动量光场的振幅可以表示为

$$E_{\pm l} = E_l(r, \varphi, z) + E_{-l}(r, \varphi, z). \quad (2)$$

根据上述振幅表达式,可以绘制轨道角动量光场的强度分布图,如图1所示。图中结果表明,单量子数轨道角动量光场的强度为中空环状分布,双量子数轨道角动量光场的强度则为中空 $2l$ 重花瓣状分布。强度的中空分布来源于螺旋型波前 $\exp(il\varphi)$ 的干涉效应。

图2(a)为基于双量子数调制的光通信系统示意图。基模高斯光场在发射端经过相位调制并演化成为双量子数轨道角动量光场,其中调制相位可以通过 $\arg[E_l(r, \varphi, z=0) + E_{-l}(r, \varphi, z=0)]$ 进行计算。图2(b)给出了量子数为3时的调制相位,该相位分布可以通过相位片^[17]或者空间光调制器^[18]实现。经过相位调制后,信号光场的量子数变为 $\pm l$ 。在随后的传输过程中,外界噪声光场混入信号光场之中。由于噪声光场未经过任何调制,其量子数为0。最终,信号和噪声光场一同进入接收端,双量子数解调装置依据光场的量子数对其进行识别和分离。

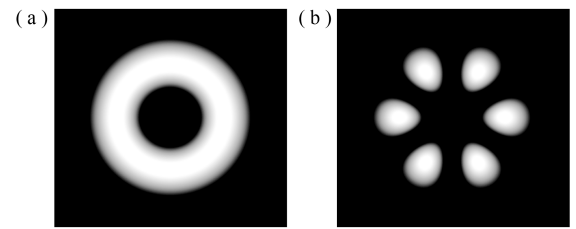


图1 (a) 单量子数($l=3$); (b) 双量子数($l=\pm 3$)
轨道角动量光场的强度分布

Fig. 1 The intensity distribution of orbital angular momentum light fields with (a) single quantum number ($l=3$) and (b) two quantum numbers ($l=\pm 3$)

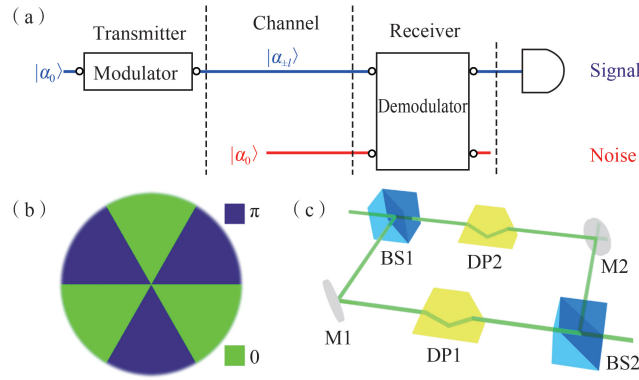


图 2 (a) 基于双量子数调制的光通信系统示意图;(b) 双量子数调制器($l=3$)示意图;
(c) 双量子数解调器示意图,BS,分束器,M,反射镜,DP,Dove 棱镜

Fig. 2 (a) Optical communication system based on two modulated quantum numbers; (b) Diagram of modulator with two quantum numbers ($l=3$); (c) Diagram of demodulator with two quantum numbers: BS, beam splitter; M, mirror; DP, Dove prism

双量子数解调装置由一个马赫—增德干涉仪和两块夹角为 θ 的 Dove 棱镜组成。根据量子光学理论,激光器产生的光场为相干态 $|\alpha\rangle$ 。基于此,量子数为 $\pm l$ 的信号光场可以表示为 $|\alpha_{\pm l}\rangle$,而量子数为 0 的噪声光场为 $|\alpha_0\rangle$ 。为了简化分析过程,这里用 s 统一表示信号光场和噪声光场的量子数。经过第 1 个分束器后,光场 $|\alpha_s\rangle$ 演变为^[19]

$$|\psi_1\rangle = \frac{\alpha_s}{\sqrt{2}} |i \frac{\alpha_s}{\sqrt{2}}\rangle. \quad (3)$$

因为夹角为 θ 的 Dove 棱镜会在干涉仪两臂间引入 $2s\theta$ 的相位差^[20],所以经过 Dove 棱镜后的光场可以表示为

$$|\psi_2\rangle = \frac{\alpha_s e^{i2s\theta}}{\sqrt{2}} |i \frac{\alpha_s}{\sqrt{2}}\rangle. \quad (4)$$

最终经过第 2 个分束器后的输出光场为^[21]

$$|\psi_3\rangle = |i\alpha_s \cos(s\theta)\rangle |i\alpha_s \sin(s\theta)\rangle, \quad (5)$$

这里考虑对第一个输出端口进行强度测量。经过计算易得:光强的期望值为

$$\langle \hat{n} \rangle = \langle \psi_3 | \hat{a}^\dagger \hat{a} | \psi_3 \rangle = |\alpha_s|^2 \sin^2(s\theta), \quad (6)$$

式中 $\hat{a}^\dagger$ ($\hat{a}$) 为光子产生(湮灭)算符, $\hat{a}^\dagger \hat{a}$ 为光子数算符。

假设到达接收端信号和噪声光场强度分别为 I_s 和 I_n 。根据信噪比定义^[22],未调制的原始信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{I_s}{I_n}, \quad (7)$$

将式(6)中 s 分别取为 $\pm l$ 和 0 可得:信号和噪声光场经过解调器后的强度分别为

$$I'_s = I_s \sin^2(l\theta), \quad (8)$$

$$I'_n = I_n \sin^2(0\theta). \quad (9)$$

因此,解调后的信噪比为

$$\text{SNR}' = \frac{I'_s}{I'_n} = \infty. \quad (10)$$

(10)式说明双量子数调制系统理论上可以实现噪声的完全滤除。对于任意的夹角 θ ,全部的噪声光场和部分的信号光场由干涉仪的第二个端口输出。当两块棱镜的夹角满足 $\theta = \pi/2|l|$ 时,全部的信号光场由第一个端口输出,此时达到最佳的信噪分离效果。

需要说明的是,图 2 所示的系统旨在通过轨道角动量自由度调制实现噪声滤除,因此图中并未涉及具体的编码方式。由于载信光束采用的是经典激光场,脉冲位置调制(PPM)、开关键控调制(OOK)和数字脉冲

间隔调制(DPIM)等编码方式均可应用于本系统。

2 大气湍流对信噪比提升的影响

在实际的无线光通信场景中,信号和噪声光场将不可避免地受到大气湍流的影响。当光场在大气通道中传输时,大气湍流造成的折射率起伏使得光场的波前相位出现随机起伏。因为轨道角动量调制的本质就是相位调制,所以波前相位的起伏对应着轨道角动量的弥散,即信号和噪声光场的量子数从单值变为多值。

近年来,大气湍流对轨道角动量光场的影响获得了大量研究,其中多数工作都是基于 Kolmogorov 湍流理论开展的数值仿真研究^[23-27]。由于大气湍流的时变性极强,单次仿真结果具有随机性,只有大量统计后的结果才能正确反映出轨道角动量的变化情况。

先前的研究表明,单量子数轨道角动量光场经过大气传输通道后的量子数遵循高斯分布,且均值仍为原来的量子数。基于这一结论可知:对于量子数为 s 的轨道角动量光场,经过大气湍流后的量子数分布为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-s)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (11)$$

式中 σ 为轨道角动量弥散后的标准差,其大小由湍流的特征参数共同决定。由于高斯分布为连续分布而量子数只能为整数,需要对高斯分布进行离散化处理。以量子数 L 为例,具体方法为:将 $L \pm 0.5$ 范围内的概率密度函数积分结果视为量子数 L 的权重,即

$$P_L = \int_{L-0.5}^{L+0.5} f(x) dx = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{L+0.5}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{L-0.5}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]. \quad (12)$$

容易验证,弥散后各个量子数的权重之和仍为 1。根据 3σ 准则可知,仿真计算可以忽略权重极小的量子数,仅需考虑量子数处于 $L \pm 3\sigma$ 区间的轨道角动量光场。

为了定量描述该系统对于外界噪声的滤除效果,将解调前后信噪比的比值定义为增强系数 N^* ,即

$$N^* = \frac{\text{SNR}'}{\text{SNR}}. \quad (13)$$

基于上述分析和式(6)可知:当存在大气湍流时,解调后的系统信噪比变为

$$\text{SNR}' = \frac{I_s}{I_n} \frac{\sum_{s=|l|-3\sigma}^{|l|+3\sigma} P_s \sin^2(s\theta)}{\sum_{s=-3\sigma}^{3\sigma} P_s \sin^2(s\theta)} \bigg|_{\theta=\pi/2|l|}, \quad (14)$$

式中分子和分母分别为调制后的信号和噪声光场的强度。在此基础上,增强系数可表示为

$$N^* = \frac{\sum_{s=|l|-3\sigma}^{|l|+3\sigma} P_s \sin^2(s\theta)}{\sum_{s=-3\sigma}^{3\sigma} P_s \sin^2(s\theta)} \bigg|_{\theta=\pi/2|l|}. \quad (15)$$

为了直观地展示大气湍流环境下的信噪比增强效果,基于式(15)绘制了增强系数随着调制量子数 $|l|$ 的变化情况,如图 3 所示。从图中可以看出,对于任意强度的大气湍流,增强系数随着调制量子数的增大而迅速增大。对于相同的调制量子数,增强系数随着湍流强度的增大而减小。上述结果表明系统在弱湍流情况下具有明显的抗噪优势。例如: $\sigma=1$ 和 $|l|=5$ 情况下的增强系数为 10,即信噪比提升了一个数量级。对于强湍流情况,信噪比仍然具有几倍的提升。

3 大气湍流对能量利用率的影响

在实际通信系统中,一般接收端获取的信号量非常有限,但是噪声滤除过程会导致部分信号的损耗。这就需要综合考虑信号量和信噪比之间的关系,不能为了信噪比的提升而无限地消耗信号量。为了避免利用率和信噪比出现“此消彼长”的情况,需要分析系统的信号利用率,即调制前后信号光场强度的比值。式(14)为调制后的信噪比表达式,其中分子即为调制后的信号光场强度。再根据未调制的信号光场强度 I_s 可得大气湍流环境下的信号利用率为

$$H = \sum_{s=|l|-3\sigma}^{|l|+3\sigma} P_s \sin^2(s\theta) \bigg|_{\theta=\pi/2|l|}. \quad (16)$$

根据式(16),图 4 绘制了不同湍流强度下的能量利用率随着调制量子数的变化情况。图中结果表明,信号利用率随着调制量子数的增大或者湍流强度的减小而增大。与此同时,对于任意的调制量子数和湍流强度,信号利用率均不低于 50%。当调制量子数增大时,信号利用率趋近 100%。上述结果说明,系统在提升信噪比的同时仅造成少量的信号损耗。这是因为量子数较大时存在如下数学关系

$$\sin^2[(|l| + \Delta l)\theta] = \sin^2[(|l| - \Delta l)\theta] \simeq \sin^2(|l|\theta) \big|_{\theta=\pi/2|l|}, \quad (17)$$

说明绝大部分的信号光场从第一个端口输出,进而使得信号利用率接近 100%。

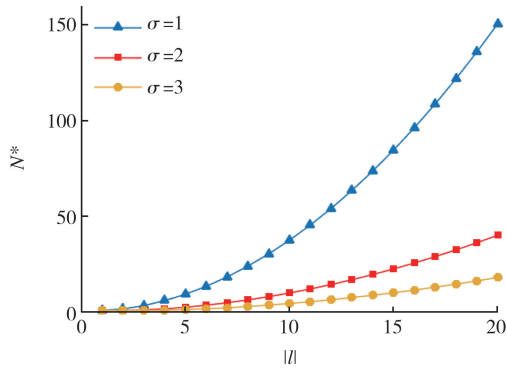


图 3 不同湍流强度情况下增强系数随调制量子数的变化, 标准差 1、2 和 3 分别对应湍流强度为弱、中和强

Fig. 3 The enhancement factor as a function of modulated quantum number with different turbulence intensities. The standard deviations 1, 2, and 3 correspond to weak, medium, and strong turbulence intensities, respectively

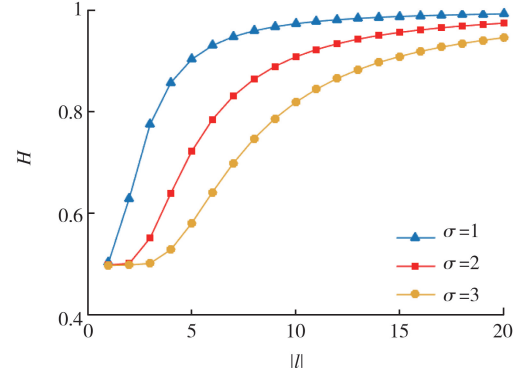


图 4 不同湍流强度情况下能量利用率随调制量子数的变化, 标准差 1、2 和 3 分别对应湍流强度为弱、中和强

Fig. 4 The energy utilization as a function of modulated quantum number with different turbulence intensities. The standard deviations 1, 2, and 3 correspond to weak, medium, and strong turbulence intensities, respectively

上述分析结果表明,基于双量子数调制的光通信系统可以在高信号利用率的前提下显著提升信噪比。这里对系统进行两点说明:(1) 理论上,基于单量子数 1 和双量子数 ± 1 调制的系统具有相同的信噪比提升效果和信号利用率。但是双量子数调制系统的量子数可以通过强度分布进行直接识别,为信息解码和相位修复提供了便利^[28]。有鉴于此,本文设计了双量子数调制的通信系统,为信息容量和信噪比的进一步提升奠定基础。(2) 上述讨论的外界噪声是光子之间具有相干性干扰噪声,因此可以通过干涉仪进行较为理想的滤除。对于光子之间不具有相干性的背景噪声,通过选取合适的夹角,可以使得全部的信号光场和一半的噪声光场从第一个端口输出,即滤除 50% 的背景噪声($N^*=2$)。若考虑采用集成光学技术组成级联干涉仪,则可进一步提升系统的滤噪效果。

4 结论

本文面向无线光通信系统的实际应用需求,针对系统抗噪能力的问题,提出了双量子数调制的通信系统,展示了基于轨道角动量自由度调控的噪声滤除机理和信噪比提升效果。在此基础上,分析了大气湍流对于轨道角动量光场的影响,研究了实际环境下的信噪比增强系数和信号利用率。结果表明,弱湍流环境下的信噪比可以提升一个数量级,强湍流环境下的信噪比可以提升几倍。此外,系统的信号利用率在任意湍流强度情况下均大于 50%。随着调制量子数增大,信号利用率可以接近 100%。研究结果为高性能和强鲁棒的光通信系统设计提供了理论参考。

参 考 文 献

- [1] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185.
- [2] ZHAO S, ZHANG W, WANG L, et al. Propagation and self-healing properties of Bessel-Gaussian beam carrying orbital angular momentum in an underwater environment[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 2025.

- [3] SHEN Y, PIDISHETY S, NAPE I M, et al. Self-healing of structured light: a review[J]. *Journal of Optics*, 2022, 24: 103001.
- [4] MCLAREN M, MHLANGA T, PADGETT M J, et al. Self-healing of quantum entanglement after an obstruction[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 3248.
- [5] LI S, WANG J. Adaptive free-space optical communications through turbulence using self-healing Bessel beams[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 43233.
- [6] 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.
- [7] TRICHILI A, ROSALES-GUZMAN C, DUDLEY A, et al. Optical communication beyond orbital angular momentum[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 27674.
- [8] SHAPIRO J, GUHA S, ERKMEN B. Ultimate channel capacity of free-space optical communications[J]. *Journal of Optical Networking*, 2005, 4(8): 501-516.
- [9] MARTELLI P, GATTO A, BOFFI P, et al. Free-space optical transmission with orbital angular momentum division multiplexing[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(17): 972-973.
- [10] 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.
- [11] WILLNER A E, ZHAO Z, REN Y, et al. Underwater optical communications using orbital angular momentum-based spatial division multiplexing[J]. *Optics Communications*, 2018, 408: 21-25.
- [12] REN Y, LI L, WANG Z, et al. Orbital angular momentum-based space division multiplexing for high-capacity underwater optical communications[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-10.
- [13] KRENN M, FICKLER R, FINK M, et al. Twisted light communication through turbulent air across Vienna[J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16(113028): 10.1088.
- [14] KRENN M, HANDSTEINER J, FINK M, et al. Twisted photon entanglement through turbulent air across Vienna[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(46): 14197-14201.
- [15] KRENN M, HANDSTEINER J, FINK M, et al. Twisted light transmission over 143 km[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(48): 13648-13653.
- [16] CHEN Y, SHEN W G, LI Z M, et al. Underwater transmission of high-dimensional twisted photons over 55 meters[J]. *Photonix*, 2020, 1: 1-11.
- [17] KHONINA S N, PODLIPNOV V V, KARPEEV S V, et al. Spectral control of the orbital angular momentum of a laser beam based on 3D properties of spiral phase plates fabricated for an infrared wavelength[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 18407-18417.
- [18] ZHU L, WANG J. Arbitrary manipulation of spatial amplitude and phase using phase-only spatial light modulators[J]. *Scientific reports*, 2014, 4(1): 7441.
- [19] ZHANG J D, ZHANG Z J, CEN L Z, et al. Super-resolved angular displacement estimation based upon a Sagnac interferometer and parity measurement[J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 4320-4332.
- [20] XIAO S, ZHANG L, WEI D, et al. Orbital angular momentum-enhanced measurement of rotation vibration using a Sagnac interferometer[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1997-2005.
- [21] ZHANG Z, QIAO T, MA K, et al. Super-resolving angular rotation measurement using binary-outcome homodyne detection[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18477-18484.
- [22] COHEN L, MATEKOLE E S, SHER Y, et al. Thresholded quantum LIDAR: exploiting photon-number-resolving detection[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(20): 203601.
- [23] MALIK M, O'SULLIVAN M, RODENBURG B, et al. Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13195-13200.
- [24] PATERSON C. Atmospheric turbulence and orbital angular momentum of single photons for optical communication[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(15): 153901.
- [25] RODENBURG B, LAVERY M P J, MALIK M, et al. Influence of atmospheric turbulence on states of light carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3735-3737.
- [26] TYLER G A, BOYD R W. Influence of atmospheric turbulence on the propagation of quantum states of light carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(2): 142-144.
- [27] FU S, GAO C. Influences of atmospheric turbulence effects on the orbital angular momentum spectra of vortex beams[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(5): B1-B4.
- [28] LOHANI S, GLASSER R T. Turbulence correction with artificial neural networks[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(11): 2611-2614.

(责任编辑:赵海军)