

复合涡旋光束的光强与相位特性

程珊,陈建飞,金兆祥,张胜*

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院,南京 210046)

摘要:为了研究复合涡旋光束的光强与相位特性,利用不同拓扑荷数的2束零阶径向拉盖尔-高斯(LG)涡旋光束共轴叠加,产生一种新型的复合涡旋光束,从理论上研究了拓扑荷数对复合涡旋光束的光强与相位分布特性的影响,分析了拓扑荷数与中心暗斑直径以及内、外环分叉数的线性关系,并进行了数值仿真。仿真结果表明:不同拓扑荷数的2个零阶LG涡旋光束叠加,光强分布呈亮斑、暗斑相间的模式,其亮斑数目等于两涡旋光拓扑荷数的差值,相位分布呈现双环模式,外、内环分叉数分别由拓扑荷数的较大值、较小值决定,两者互不影响;相同拓扑荷数的涡旋光束叠加,其光强图中亮斑数目是拓扑荷数的4倍,相位分布图中的分叉数与拓扑荷数相同。

关键词:零阶涡旋光束;共轴叠加;光强与相位分布;拓扑荷数

中图分类号:O436 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)01-0057-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.01.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



light intensity and phase characteristics of composite vortex beam

CHENG Shan, CHEN Jianfei, JIN Zhaoxiang, ZHANG Sheng*

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: In order to study the light intensity and phase characteristics of the composite vortex beam, two zero-order radial Laguerre-Gauss(LG) vortex beams with different topological charges are coaxially superimposed to produce a new type of composite vortex beam. The influence of the topological charge on the light intensity and phase distribution characteristics of the composite vortex beam is theoretically studied, and the linear relationship between the topological charge and the diameter of the central dark spot and the number of bifurcations of the inner and outer rings is analyzed, and numerical simulation is carried out. The simulation results show that when two zero-order LG vortex beams with different topological charge are superimposed, the light intensity distribution shows a pattern of alternating bright spots and dark spots, the number of bright spots is equal to the difference between the topological charges of the two vortex beams, the phase distribution shows a double ring mode, and the bifurcation numbers of the outer and inner rings are determined by the larger and smaller values of the topological charges respectively, which do not affect each other. When vortex beams with the same topological charge number are superimposed, the number of bright spots in the light intensity diagram is four times that of the topological charge number, and the bifurcation number in the phase distribution diagram is the same as that of the topological charge number.

Key words: zero-order vortex beam, coaxial superposition, light intensity and phase distribution, topological charge

0 引言

拉盖尔-高斯(LG)光束是最典型的涡旋光束,因

收稿日期:2021-07-04。

基金项目:国家自然科学基金项目(61601237)资助。

作者简介:程珊(1994—),女,安徽省安庆市桐城市人,硕士生,现就读于江苏省南京市南京邮电大学,电子与光学工程学院、微电子学院,主要从事复合涡旋光束相位与光强特性研究、涡旋光束轨道角动量检测方法研究等工作。

*通信作者:张胜(1963—),男,博士,教授,主要从事计算机应用技术、生物信息处理的研究工作。



其拓扑荷数取值的无限可能性,使得光束中每个光子携带的轨道角动量有无穷个量子本征态,可以解决当下自由光通信技术所面临的信道堵塞、传输效率低等问题^[1]。另一方面,涡旋光束因其特定的螺旋相位结构与暗中空环形光强分布,使其在光学操纵、生物医学等领域都具有非常大的应用空间。随着对涡旋光束的研究日益加深,研究者们发现由多束涡旋光束共轴叠加形成的复合涡旋光束会产生更多新奇的特性,具有更大的研究价值。复合涡旋光束作为轨道角动量光的叠加态,由于携带多个轨道角动量和多样化的相位分

布,可以应用于微粒操控^[2-4]、量子光学^[5]和光通信^[6-8]等多个领域,现已被人们广泛研究。MOLINATREEIZA G 等人^[9]研究了共轴与离轴条件下涡旋光束叠加的基本方法,通过改变控制参数,可以改变所得到的复合涡旋光束的横向位置。NAIDOO D 等人^[10]采用腔内选模法,将 2 束拓扑荷数值相反的 LG 光束在固体激光器中相干叠加。贺超等人^[11]选取径向指数为零,拓扑荷数不同的 2 束 LG 光叠加形成的新型复合涡旋光束作为研究对象,分析了复合涡旋光束的光强分布及传输特性。陈亚群等人^[12]研究了整数阶双涡旋光束光斑随传输距离的演变过程。柯熙政等人^[13]以具有相同高阶径向指数和互为相反数轨道角动量(OAM)态的 2 束 LG 光共线叠加形成的复合涡旋光束为例,从理论和实验两方面分析了束腰参数和传输距离对其光强分布的影响。但是,上述文献均未深入研究双涡旋光束光强与相位特性。

本文利用不同拓扑荷数的 2 束零阶径向 LG 涡旋光束共轴叠加,在研究复合涡旋光束的光强与相位特性的同时,还为拓扑荷数的测量提供一种新的方法。

1 复合涡旋光束叠加特性

LG 光束是一种暗中空环形光束,在中心位置存在一个光强为零、相位不确定的涡旋。LG 光束特性主要由拓扑荷数 l 与径向指数 p 共同决定。 l 可以取整数或者分数,取值范围为 $(-\infty, +\infty)$ 。当 $p=0$ 时, LG 光束被称为零阶 LG 光束,其光强分布为单环; $p \geq 1$ 时, LG 光束被称为高阶 LG 光束,其光强分布为多环。因高阶涡旋光束能提供更多的控制参数,使其在光通信研究、微粒操纵和生物医学等领域具有广泛的应用场景与研究意义。

当光束沿着 z 轴传输时,其光场复振幅^[14]表示为:

$$E(r, \varphi, z) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!}} \times \frac{1}{\omega(z)} \times \left(\frac{r\sqrt{2}}{\omega(z)} \right)^{|l|} \times \exp\left(\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right) \times L_p^{|l|} \times \left(\frac{2r^2}{\omega^2(z)} \right) \times \exp(-il\varphi) \times \exp\left[\frac{ikr^2z}{2(z^2+z_R^2)}\right] \times \exp\left[-i(2p+|l|+1)\tan^{-1}\left(\frac{z}{z_R}\right)\right] \quad (1)$$

其中, r 为极径, φ 为方位角, z 为传输距离; z_R 为瑞利

长度, $z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$; k 为波矢, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\omega(z)$ 为光斑尺寸, $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$, ω_0 为束腰半径, 即 $z=0$ 处的束腰;

$(2p+|l|+1)\tan^{-1}\left(\frac{z}{z_R}\right)$ 为古伊相位; $L_p^{|l|}$ 为缔结拉盖尔多项式, 表示如式(2)所示。

$$L_p^{|l|}(x) = \sum_{k=0}^p (-1)^k C_{p-k}^{p+k} \frac{x^k}{k!} \quad (2)$$

当 $p=0$ 时, $L_p^{|l|}(x)=1$ 。于是, LG 光束在柱坐标系下源平面, 即 $z=0$ 处的复振幅表达式为:

$$E = \alpha(r) \times \beta(r, l) \times \exp(-il\varphi) \quad (3)$$

其中, $\alpha(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega_0} \times \exp\left(\frac{-r^2}{\omega_0^2}\right)$, $\beta(r, l) = \sqrt{\frac{1}{(|l|)!}} \times \left(\frac{r\sqrt{2}}{\omega_0}\right)^{|l|}$ 。

本文主要研究涡旋光束的叠加过程与特性, 因此默认 LG 光束为零阶涡旋光束。利用束腰半径相等(皆为 ω_0), 径向指数皆为 0, 拓扑荷数不同的 2 束 LG 光束共轴叠加, 产生一种新型的复合涡旋光束, 其复振幅 E_r 表达式为:

$$E_r = \alpha(r) \times [\beta(r, l_1) \times \exp(-il_1\varphi) + \beta(r, l_2) \times \exp(-il_2\varphi) \times \exp(i\delta)] \quad (4)$$

其中, δ 是赋予其中一束涡旋光束的相位差, $\delta = \lambda \times \frac{\pi}{2}$, $\lambda=0, 1, 2, 3, \dots, 8$, l_1, l_2 为拓扑荷数。

根据式(4)可得复合涡旋光束的相位 P ^[15]为:

$$P = \frac{E_r}{\alpha(r)\beta(r, l_1)} = \exp(-il_1\varphi) + \frac{\beta(r, l_2)}{\beta(r, l_1)} \exp(-il_2\varphi) \quad (5)$$

其中, $\beta(r, l_2)/\beta(r, l_1) \propto (r\sqrt{2}/\omega_0)^{|l_2-l_1|}$ 。

2 数值计算与仿真

2.1 相位差对仿真结果的影响情况分析

本文分别取 $\lambda=0, 2, 4, 8$, 验证相位差 δ 对复合涡旋光束光强仿真结果的影响, 取拓扑荷数分别是 $l_1=3, l_2=5$ 的零阶 LG 光束干涉叠加, 其仿真结果如图 1 所示。可以看出, 改变 δ 的值, 光强图中的亮斑个数始终为 2, 由此可知相位差 δ 的变化不会改变复合涡旋光的拓扑荷数值, 只会使得干涉叠加图形的位置旋转, 其旋转角度与 λ 值有关。

2.2 复合涡旋光束光强分布特性分析

涡旋光束叠加时, 其强度表达式为 $I = |E_r(r, \varphi)|^2$ 。基于此理论, 本文对 2 束零阶径向 LG 光束的共轴叠加产生的复合涡旋光束进行数值仿真分析, 参数设置为: 径向指数 $p=0$, 束腰半径 $\omega_0=1$ mm, 波长 $\lambda=632.8$ nm。拓扑荷数分别是 l_1, l_2 的零阶 LG 光束干涉叠加的数值

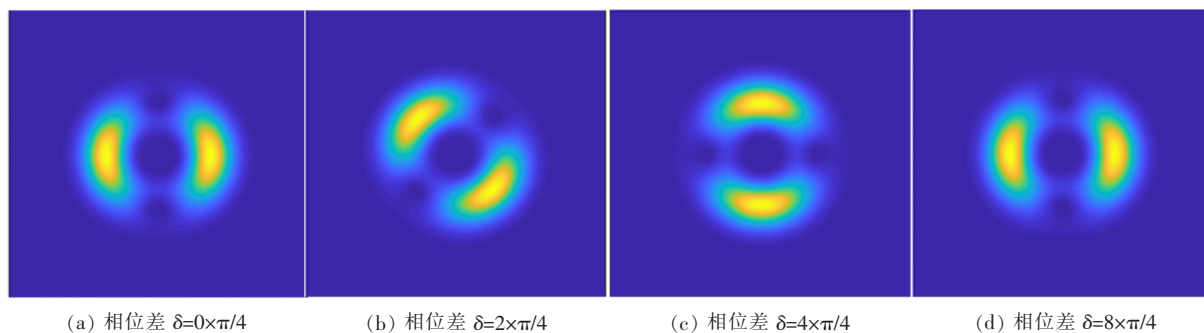


图1 相位差对光强仿真结果的影响

模拟结果如图2所示。可以看出,图中亮斑个数分别为4、3、2、1。

相同拓扑荷数的同号零阶LG光束干涉叠加的数值模拟结果如图3所示。可以看出,光强分布图中亮斑个数分别为4、8、12、16。

由图2、图3可知,当拓扑荷数取值不同时,复合涡旋光束的光强分布呈现亮斑、暗斑相间的模式,其中亮斑数目 $m=|l_1-l_2|$,中心暗斑始终存在,且随着2个LG光束的拓扑荷数差值越来越小,中心暗斑直径 R 越大。当两拓扑荷数取值相同的LG光束叠加时,形成的复合涡旋光束光强分布呈现一定的规律,即亮斑个数 $m=4l_1$,中心暗斑直径 R 随着拓扑荷数的增大而逐渐增大的变化关系如表1所示。

2.3 复合涡旋光束相位分布特性分析

假设 $|l_2| > |l_1|$, 由式(5)可知:

当 $r \rightarrow \infty$ 时, $\beta(r, l_2), \beta(r, l_1) \rightarrow \infty, \beta(r, l_2)/\beta(r, l_1) \times \exp(-il_2\varphi) > \exp(-il_1\varphi)$ 。因此,在远离中心位置时,复合涡旋光的相位主要由较大的拓扑荷数 l_2 决定。

当 $r \rightarrow 0$ 时, $\beta(r, l_2)/\beta(r, l_1) \rightarrow 0, \beta(r, l_2)/\beta(r, l_1) \times \exp(-il_2\varphi) < \exp(-il_1\varphi)$ 。因此,在中心位置时,复合涡旋光的相位主要由较小的拓扑荷数 l_1 决定。

基于以上分析,本文得到拓扑荷数分别是 l_1, l_2 的同号零阶LG光束干涉叠加的相位模拟结果如图4所示。可以看出,图4(a)中外环分叉数 $\varepsilon_1=5$,内环分叉数 $\varepsilon_2=1$;图4(b)中外环分叉数 $\varepsilon_1=5$,内环分叉数 $\varepsilon_2=2$;图4(c)中外环分叉数 $\varepsilon_1=5$,内环分叉数 $\varepsilon_2=3$;图4(d)中外环分叉数 $\varepsilon_1=5$,内环分叉数 $\varepsilon_2=4$ 。

相同拓扑荷数的同号零阶LG光束干涉叠加的相位模拟结果如图5所示。可以看出,图5(a)~图5(d)中亮斑分叉数 ε 分别为1、2、3、4。

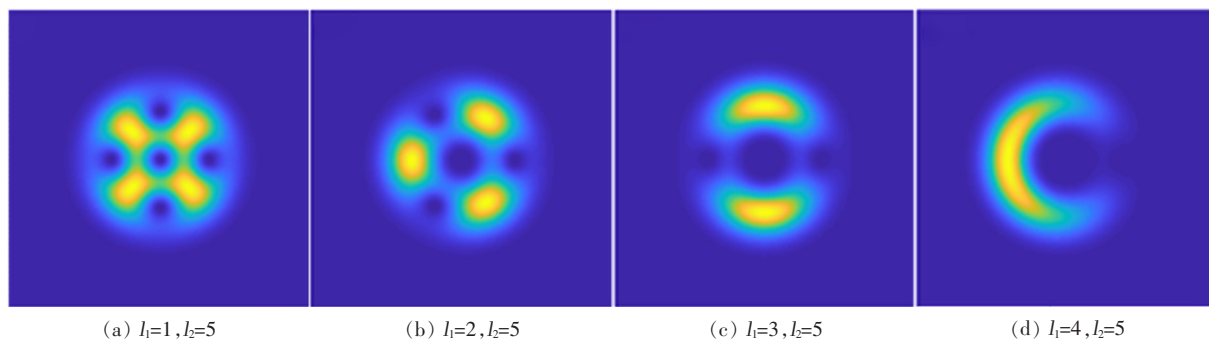


图2 不同拓扑荷数复合涡旋光束的光强分布

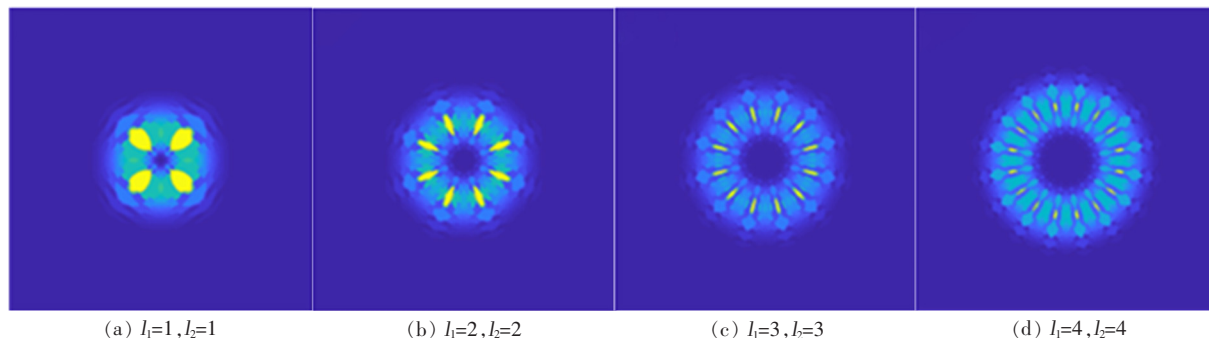


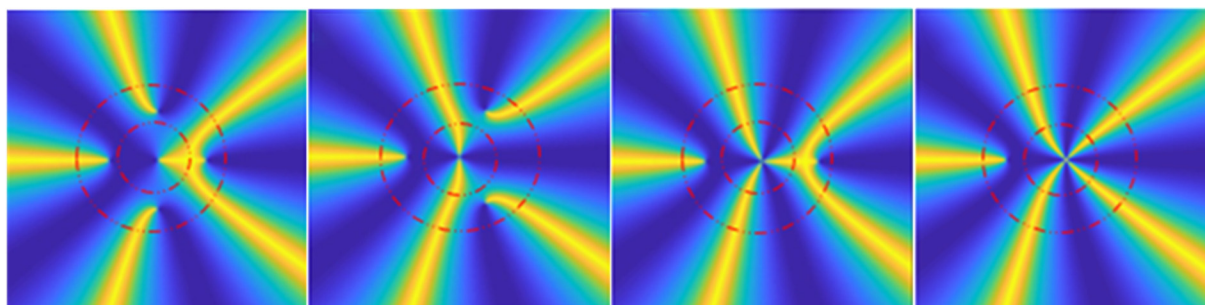
图3 相同拓扑荷数复合涡旋光束的光强分布

表 1 光斑数目和中心暗斑尺寸随拓扑荷数值的变化关系

拓扑荷数	参数名称	参数值			
不同时	拓扑荷数差值 $\Delta= l_1-l_2 $	4	3	2	1
	亮斑个数	4	3	2	1
	中心暗斑直径 R/mm	0.1338	0.5618	0.99	1.5251
相同时	拓扑荷数值 $l_1=l_2$	4	3	2	1
	亮斑个数	16	12	8	4
	中心暗斑直径 R/mm	1.3646	0.9364	0.6688	0.1873

表 2 相位分布图中亮斑分叉数随拓扑荷数变化关系

拓扑荷数	参数名称	参数值			
不同时	拓扑荷数 l_1	5	5	5	5
	拓扑荷数 l_2	1	2	3	4
	外环分叉数 ε_1	5	5	5	5
	内环分叉数 ε_2	1	2	3	4
相同时	拓扑荷数值 $l_1=l_2$	1	2	3	4
	亮斑分叉数 ε	1	2	3	4



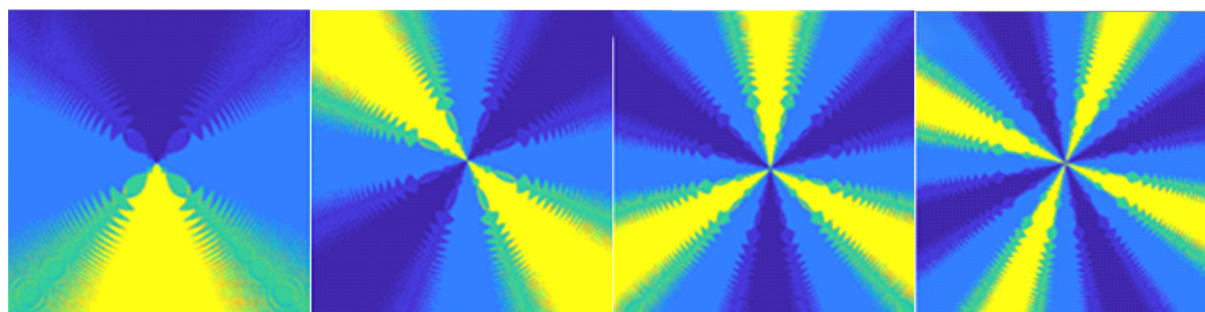
(a) $l_1=1, l_2=5$

(b) $l_1=2, l_2=5$

(c) $l_1=3, l_2=5$

(d) $l_1=4, l_2=5$

图 4 不同拓扑荷数复合涡旋光束的相位分布



(a) $l_1=1, l_2=1$

(b) $l_1=2, l_2=2$

(c) $l_1=3, l_2=3$

(d) $l_1=4, l_2=4$

图 5 相同拓扑荷数复合涡旋光束的相位分布

由图 4、图 5 可知,当拓扑荷数不同时,复合涡旋光束的相位分布呈现双环模式,外环分叉数由拓扑荷数较大值决定,内环分叉数由拓扑荷数较小值决定,两者互不影响。当拓扑荷数相同时,复合涡旋光束的相位分布中,不再呈现双环结构,其亮斑分叉数等于拓扑荷数。当拓扑荷数发生变化时,相位分布图中分叉数随拓扑荷数变化关系如表 2 所示。

3 结束语

基于理论推导与数值模拟,本文得出了复合涡旋光束的光强与相位分布特征。当拓扑荷数不同时,复合涡旋光束的光强分布图中亮斑数目等于两拓扑荷

数的差值;相位分布呈现双环模式,外环分叉数由拓扑荷数较大值决定,内环分叉数由拓扑荷数较小值决定,两者互不影响。由此可知,2 束零阶径向 LG 光束共轴叠加产生的新型复合涡旋光束可以携带不同的拓扑荷数,且互不干涉。本研究结果对解决当下空间光通信面临的信息阻塞、传输效率低下问题具有重要意义,在光通信信息的编码与传输等方面具有重要的应用价值。当拓扑荷数相同时,光强分布图中亮斑个数是拓扑荷数的 4 倍,相位分布图中亮斑分叉数等于拓扑荷数的这一特征,为检测涡旋光束拓扑荷数值提供了一种新的方法。

参考文献:

- [1] 苏明样. 面向光通信的光学涡旋传输特性及复用技术研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- [2] OWHAL A, BORUAH D, BELGAMWAR S U. Establishment of an optical trapping curve for prediction of trapping parameters[EB/OL]. [2021-07-04]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030402620302680>.
- [3] KANG-BIN I, HYUN-IK K, IN-JE J, et al. Optical trapping forces by a focused beam through two media with different refractive indices[J]. Optics Communications, 2003, 226(1-6): 25-31.
- [4] SHI L, LI J, TAO T, et al. Rotation of nanowires with radially higher-order Laguerre-Gaussian beams produced by computer-generated holograms[J]. Applied Optics, 2012, 51(26): 6398-6402.
- [5] ALAAEDDINE R, GIANLUCA G, KHALED I, et al. Inverse-raised-cosine fibers for next-generation orbital angular momentum systems[J]. Optics Communications, 2020, 458(2): 124736-1-124736-6.
- [6] 黄思河. 涡旋光束的特性及其在光通信的应用[D]. 厦门: 华侨大学, 2017.
- [7] 陈云. 高阶轨道角动量模场传输光纤的设计研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [8] 张远颖. 基于 LED 的轨道角动量光束的调控与光通信应用 [D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- [9] MOLINATERRIZA G, RECOLONS J, TORNER L. The curious arithmetic of optical vortices[J]. Optics Letters, 2000, 25(16): 1135-1137.
- [10] NAIDOO D, AIT-AMEUR K, BRUEL M, et al. Intra-cavity generation of superpositions of Laguerre-Gaussian beams[J]. Applied Physics B, 2012, 106(3): 683-690.
- [11] 贺超, 黄素娟. 一种新型的共轴叠加复合涡旋光束[J]. 光电子激光, 2013(12): 2330-2334.
- [12] 陈亚群, 孙奎, 陈建飞, 等. 双涡旋光斑随传输距离演变实验分析[J]. 光通信研究, 2016(6): 23-25.
- [13] 柯熙政, 石欣雨. 高阶径向拉盖尔 - 高斯光束叠加态的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 335-341.
- [14] 杨春勇, 丁丽明, 张文, 等. 拉盖尔 - 高斯光束空间传播波前畸变的 RMS 评估[J]. 光电子·激光, 2015(9): 1814-1821.
- [15] ANGUITA J A, OAQUIN H, DJORFJEVIC I B. Coherent multimode OAM superpositions for multidimensional modulation [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 6(2): 1-11.