

doi:10.13756/j.gtxyj.2016.06.006

光通信系统与网络技术

双涡旋光斑随传输距离演变实验分析

陈亚群, 孙 奎, 陈建飞, 张 胜

(南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210046)

摘要: 涡旋光束携带的轨道角动量可以传递给粒子实现对粒子的微操控, 利用轨道角动量可以对信息进行编码实现自由空间光通信, 因而涡旋光的传输特性成为了近年来的研究热点。根据 ABCD 光学矩阵原理对双涡旋光束的光强表达式进行了推导, 利用 MATLAB 软件对内外环拓扑荷值为整数且保持不变的双涡旋光束传输特性进行了仿真研究。实验结果表明, 传输过程中光斑中心的暗核能够完整地保留下来, 且不会影响涡旋光束的轨道角动量。这表明双涡旋光束在传输过程中具有稳定性, 适用于自由空间的光学通信系统。

关键词: 双涡旋光束; 传输特性; 光强分布; 稳定性

中图分类号: TN012

文献标志码: A

文章编号: 1005-8788(2016)06-0023-03

Analysis of the Evolution of Double-Vortex Beam Spot with the Transmission Distance

CHEN Ya-qun, SUN Kui, CHEN Jian-fei, ZHANG Shen

(School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: The orbital angular momentum of vortex beams can be used to realize micromanipulation of the particles. It can also encode the particles to realize free space optical communication. Because of its wide potential applications, the characteristics of vortex beams have become a hot topic in recent years. In this paper, the propagation characteristic of integer order double-vortex beam is studied. The propagation expression of double-vortex beam is derived by using ABCD optical matrix firstly. Then under the condition of same topological charges, the evolution of double-vortex beam spot with transmission distance is observed by MATLAB software. The simulation results show that the spot characteristics of double-vortex beam can be preserved after propagation without affecting the orbital angular. It shows that the double-vortex beam is stable in the process of transmission, which is suitable for free-space optical communication system.

Key words: double-vortex beam; propagation characteristic; light distribution; stability

0 引 言

涡旋光束的波前分布呈螺旋结构, 其相位的不确定使得光束中心区域在传输过程中会形成奇点, 在相位奇点处光强为零, 无加热和衍射效应。随着对涡旋光束研究的深入, 涡旋光束的产生、传输与应用成为近年来光学研究领域的热点。目前涡旋光束的产生方法主要有螺旋相位板法、全息图法和空间光调制器法^[1]。涡旋光束可对微粒进行操控, 在信息处理、光学通信以及量子计算等方面都有较好的发展前景。此外, 相对于单束涡旋光束, 多涡旋光束能携带多个轨道角动量, 传输的信息量更大, 稳定性更高, 衍射更低^[2-3]。

本文在单涡旋光束传输^[4]的基础上对整数阶双涡旋光束传输中的光强对称性及中心暗斑的完整性做了进一步的研究分析, 理论推导和仿真发现: 整数阶双涡旋光束在传输中的光强能保留原来的对称性, 中心暗斑未发生畸变, 两束涡旋之间的距离随传

输距离的增大而增大。相对于单涡旋光束, 整数阶双涡旋光束在传输过程中具有更高的稳定性, 由于携带了更多的轨道角动量从而能够传输更多的信息, 因而更加适用于自由空间光学通信系统。

1 双涡旋光束的传输特性

本文采用两束单涡旋光束进行相干叠加形成双涡旋光束, 以 LG (拉盖尔-高斯) 光束为例来推导双涡旋光束的传输特性。假设该 LG 光束带有的相位因子为 $\exp(i l_1 \theta_1)$, 则该光束的光强为

$$E(r, \varphi) = A_0 \left(\frac{\sqrt{2} r}{\omega_0} \right)^{l_1} \exp \left(-\frac{r^2}{\omega_0^2} \right) \exp(-i l_1 \theta) ,$$

式中, A_0 为振幅, 一般取值为常数; r 为光源平面位置矢量的模; φ 为方位角; θ 为旋转方位角; ω_0 为高斯光束的束腰半径。该光束与另外一束相位因子为 $\exp(i l_2 \theta_2)$ 的 LG 光束在初始平面 ($z=0$) 处相干叠加后形成的双涡旋光束的电场分布为

收稿日期: 2016-06-29

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20160901)

作者简介: 陈亚群 (1990-), 男, 江苏南京人。硕士研究生, 主要研究方向为涡旋光束的传输特性。

通信作者: 张胜, 教授。E-mail: 447415537@qq.com

$$E = A_0 \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0} \right)^{l_1} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) \exp(-il_1\theta) + A_0 \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0} \right)^{l_2} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) \exp(-il_2\theta) \quad (1)$$

为了简化计算,我们默认两束光束的振幅和束腰半径均相同; l_1, l_2 分别为两束光束的拓扑荷数,这里取不相等的整数。双涡旋光束的传输特性可以根据ABCD矩阵光学以及惠更斯-菲涅尔原理来描述。根据矩阵光学理论可知,传输距离为 z 时的光学矩

$$E(\rho, \varphi, z) = -\frac{ikA_0}{2\pi z} \exp(-ikz) \exp\left(-\frac{ik}{2z}\rho^2\right) \int_0^\infty \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0}\right)^{l_1} * \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2} - \frac{ikr^2}{2z}\right) \int_0^{2\pi} \exp\left[-il_1\theta + \frac{ik\rho r}{z} \cos(\theta - \rho)\right] d\theta dr - \frac{ikA_0}{2\pi z} \exp(-ikz) \exp\left(-\frac{ik}{2z}\rho^2\right) \int_0^\infty \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0}\right)^{l_2} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2} - \frac{ikr^2}{2z}\right) \int_0^{2\pi} \exp\left[-il_2\theta + \frac{ik\rho r}{z} \cos(\theta - \rho)\right] d\theta dr \quad (3)$$

根据贝塞尔函数的性质可知

$$\exp\left[i\frac{k\rho r}{z} \cos(\theta - \rho)\right] = \sum_{l=-\infty}^{\infty} i^l J_l\left(\frac{k\rho r}{z}\right) * \exp[i l(\theta - \rho)] \quad (4)$$

且有

$$\int_0^{2\pi} \exp[i(l-s)\theta] d\theta = \begin{cases} 2\pi & (l=s) \\ 0 & (l \neq s) \end{cases} \quad (5)$$

则式(3)中关于 θ 的积分可化简为

$$\int_0^{2\pi} \exp\left[-il\theta + \frac{ik\rho r}{z} \cos(\theta - \rho)\right] d\theta = \sum_{s=-\infty}^{\infty} J_s\left(\frac{k\rho r}{z}\right) * \exp(-is\varphi) \int_0^{2\pi} \exp[-i(l-s)\theta] d\theta = 2\pi J_l\left(\frac{k\rho r}{z}\right) \exp(-il\varphi) \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)后可得

$$E(\rho, \varphi, z) = \frac{i^{l_1} k A_0}{z} \exp(ikz) \exp(-il_1\varphi) * \exp\left(-\frac{ik\rho^2}{2z}\right) \int_0^\infty \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0}\right)^{l_1} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2} - \frac{ikr^2}{2z}\right) * J_{l_1}\left(\frac{k\rho r}{z}\right) r dr + \frac{i^{l_2} k A_0}{z} \exp(ikz) \exp(-il_2\varphi) * \exp\left(-\frac{ik\rho^2}{2z}\right) \int_0^\infty \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0}\right)^{l_2} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2} - \frac{ikr^2}{2z}\right) * J_{l_2}\left(\frac{k\rho r}{z}\right) r dr \quad (7)$$

根据贝塞尔函数的性质有

$$\int_0^\infty x^{m+1} \exp(-\beta x^2) (\alpha x^2) J_m(xy) dx = 2^{-m-1} * \beta^{m-1} (\beta - \alpha) y^m \exp\left(-\frac{y^2}{4\beta}\right) \left[\frac{\alpha y^2}{4\beta(\alpha - \beta)}\right] \quad (8)$$

式中, J_m 为 m 阶贝塞尔函数。可以得到 LG 光经过

阵为 $\begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 则在距离为 z 的接收平面处得到双涡旋光束的光电场分布^[5-6]为

$$E(\rho, \varphi, z) = -\frac{ikA_0}{2\pi z} \exp(ikz) * \int d^2r E \exp\left[-\frac{ikA_0}{2z}(\rho - r)^2\right] \quad (2)$$

式中, k 为波矢; E 为初始平面双涡旋的电场分布; ρ 为极坐标参数。将式(1)代入式(2)可得

传输距离 z 后在接收平面的光场为

$$E(\rho, \varphi, z) = \frac{i^{l_1+1} k A_0}{2^{l_1+1} z} \left(\frac{\sqrt{2}k\rho}{\omega_0 z}\right) \left(\frac{ik}{2z} - \frac{1}{\omega_0^2}\right) * \left(\frac{2\rho^2}{4z^2 + \omega_0^2}\right) \exp\left(-\frac{ik\rho^2}{2z} - \frac{\rho^2}{4z^2 + \omega_0^2} + \frac{i2z}{k}\right) \exp(il_1\varphi) * \exp(-ikz) + \frac{i^{l_2+1} k A_0}{2^{l_2+1} z} \left(\frac{\sqrt{2}k\rho}{\omega_0 z}\right) \left(\frac{ik}{2z} - \frac{1}{\omega_0^2}\right) * \left(\frac{2\rho^2}{4z^2 + \omega_0^2}\right) \exp\left(-\frac{ik\rho^2}{2z} - \frac{\rho^2}{4z^2 + \omega_0^2} + \frac{i2z}{k}\right) * \exp(il_2\varphi) \exp(-ikz) \quad (9)$$

令 $\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_0^2}}$, $z_0 = \frac{k\omega_0^2}{2}$ 为瑞利距离, 将式(9)继续化简可得

$$E(\rho, \varphi, z) = \frac{\omega_0 A_0}{\omega} \left(\frac{\sqrt{2}\rho}{\omega}\right)^{l_1} \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega^2}\right) * \exp(il_1\varphi) \exp(-ikz) \exp\left[-\frac{ik\rho^2}{2z} \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right)\right] * \exp\left[i(l_1 + 1) \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right)\right] + \frac{\omega_0 A_0}{\omega} \left(\frac{\sqrt{2}\rho}{\omega}\right)^{l_2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega^2}\right) * \exp(il_2\varphi) \exp(-ikz) * \exp\left[-\frac{ik\rho^2}{2z} \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right)\right] * \exp\left[i(l_2 + 1) \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right)\right] \quad (10)$$

则双涡旋光束的光强表达式为

$$I(\rho, \varphi, z) = E(\rho, \varphi, z) E^*(\rho, \varphi, z) \quad (11)$$

2 数值计算与仿真

为了清楚地观测双涡旋传输的光斑演变性质,

分别取 $l_1 = 1, l_2 = 7$, 并保持不变进行模拟, 主要参数为: 波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 束腰半径 $\omega_0 = 0.5 \text{ mm}$, 偏离涡旋光束中心横向距离 z 分别为 $0.3, 0.5$ 和 0.8 m , 利用 MATLAB 软件进行仿真, 图 1 所示为双涡旋光束在源平面及目标平面的光强分布图。

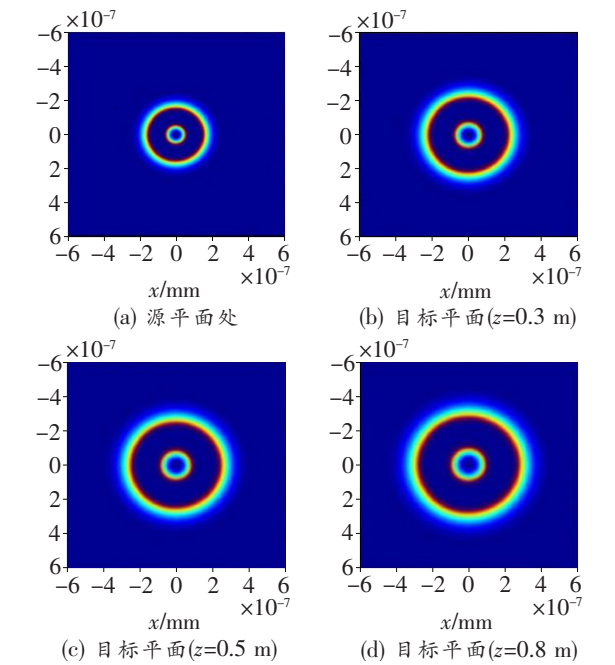


图 1 双涡旋光束在源平面以及目标平面的光强分布图

表 1 所示为仿真过程中不同位置的相对光强值。图 2 所示为双涡旋光束在源平面以及目标平面的相对光强纵向分布曲线图。

表 1 源平面以及目标平面各位置的相对光强分布

		目标平面		
		0.3 m	0.5 m	0.8 m
内环内	0	0	0	0
内环	0.74	0.71	0.66	0.62
内外环间	0	0	0	0
外环	0.68	0.65	0.61	0.56
外环外部	0	0	0	0

由表 1 和图 2 可知, 根据衍射效应, 双涡旋光束的光斑存在一定程度的展宽, 但传输过程中光强仍然保持中心对称分布, 中央的暗斑得到了完整保留, 表明整数阶双涡旋光束在传输过程中相位奇点具有相对稳定性。只有在两束涡旋光同时为暗斑的地方在图中才能显示为暗斑, 只有一束为暗斑的区域表现为亮环, 而两束涡旋均为亮环的区域光强更强, 也验证了双涡旋在相互传输过程中内外环保持相互独立。由仿真结果可知, 整数阶双涡旋光束在传输过程中光斑中心的暗核保留完整, 中心对称的光强保持不变, 相位奇点完整的保留下来, 且不会影响涡旋

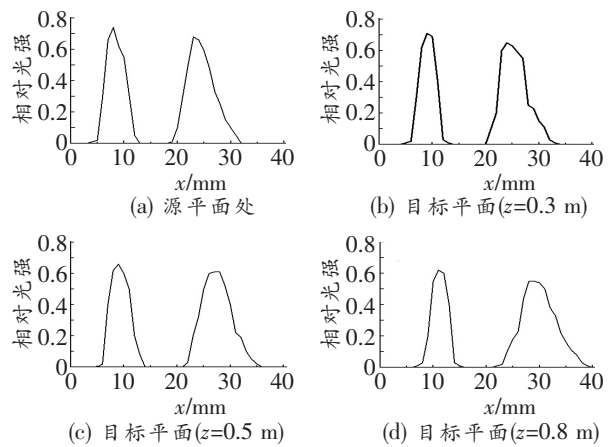


图 2 双涡旋光束在源平面以及目标平面的相对光强分布曲线图

光束的轨道角动量。这表明双涡旋光束在传输过程中稳定性较高, 相对于单涡旋光束, 其在自由空间光学通信系统中能够得到更好的应用。

3 结束语

利用光学矩阵推导了整数阶双涡旋光束在传输过程中的光强分布表达式, 理论分析和仿真实验表明, 双涡旋光束在传输过程中依旧能够保留完整的光环, 且不会影响轨道角动量, 表明在利用轨道角动量的自由空间光学通信系统中, 双涡旋光束具有更高的稳定性和可行性。

参考文献:

[1] 陈君, 胡承忠. 光学涡旋产生方法的分析与研究 [J]. 泰山学院学报, 2010, 32(6): 72-76.

[2] Fang G J, Sun S H, Pu J X. Experimental study on fractional double-vortex beams [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 31(02): 64210-64216.

[3] Tao S H, Yuan X C, Lin J. Residue orbital angular momentum in interferenced double vortex beams with unequal topological charges [J]. Opt Exp, 2006, 14(2): 535-541.

[4] 丁攀峰. 整数与分数阶涡旋光束相位奇点的稳定性分析 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, (5): 118-122.

[5] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. Opt Exp, 2004, 12(22): 5448-5456.

[6] Chu X. Propagation of cosh-Gaussian beam through an optical system in turbulent atmosphere [J]. Opt Exp, 2007, 15(26): 17613-17618.