

文章编号: 0253-2239(2009)02-0331-05

具轨道角动量光束用于光通信编码及解码研究

吕 宏 柯熙政

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 无衍射光是在自由空间传播过程中一定范围内横向强度分布保持不变的光场, 具有方向性好以及传输距离远等特点, 某些类型的无衍射光具有轨道角动量。分析了具有轨道角动量光束以及无衍射光在空间中的传输特点, 以计算全息图作为反射式相位调制的空间光调制器(SLM)实现光学变换, 并通过由锥形透镜构成的模式转换器, 将携带信息的拉盖尔-高斯(L-G)光束转换为具有相同拓扑荷的高阶 Bessel 无衍射光束, 提出了一种通过具有轨道角动量的高阶 Bessel 无衍射光束来进行空间光信息传输的编码解码方法, 在保证激光大气通信的安全保密性的同时, 提高了信息传输的密度和准确率。

关键词 光通信; 轨道角动量; 数据编码; 无衍射光; 计算全息图

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092902.0331

Research on the Beam with Orbital Angular Momentum Used in Encoding and Decoding of Optical Communication

Lü Hong Ke Xizheng

(Faculty of Automation and Information Engineering; Xian University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract Non-diffracting beams possess advantages of better direction and far distance for applications to free-space communications. During free propagation, their profiles of transverse intensity remain nearly invariant in a range. Some non-diffracting beams have orbital angular momentum. By analyzing the characteristic of the beam with orbital angular momentum and non-diffracting beams transmission, the computer-generated hologram was used as spatial light modulator with reflective phase modulation to implement optical transformation. Laguerre-Gaussian beam carrying the information is transformed to a higher-order Bessel non-diffractive beam with the same topological charge by a mode converter consistina of axicon. A method of encoding and decoding of optical communication was proposed based on the non-diffracting high-order Bessel beams with orbital angular momentum. The proposed approach not only ensures the security of atmospheric laser communication, but also improves the density and precision of information transmission greatly.

Key words optical communication; orbital angular momentum; data coding; non-diffracting beams; computer-generated hologram

1 引 言

空间光通信是以大气作为传输媒介的, 光在大气中传播, 会受到空气的吸收、散射、折射等引起的衰减, 这种衰减在雨雪、大雾天气尤为严重, 将会导

致误码率急剧上升, 甚至导致通信中断。为了保证空间光通信系统的可靠性, 光学编码技术在光通信中具有潜在的应用前景。传统的光学编码方法都是在通信链路中通过对光强、频率或者偏振进行高速

收稿日期: 2008-04-28; 收到修改稿日期: 2008-09-09

基金项目: 国防重点实验室基金项目(9140C3601010901)、陕西省教育厅科技专项基金(07JK332)和陕西省自然科学基金(2007F12)资助项目。

作者简介: 吕 宏(1975-), 男, 博士研究生, 主要从事无线激光通信方面的研究。E-mail: lh511@sina.com

导师简介: 柯熙政(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大气激光通信、组合导航等方面的研究。

E-mail: xzke@263.net

调制,从而实现二进制数据的传输^[1]。近年来的研究表明,光束具有两种角动量,一种是由于光束的偏振特性产生的角动量,另一种由于光束具有螺旋形相位结构而产生的轨道角动量^[2],与利用偏振态编码相比,具有轨道角动量的涡旋光场由于具有额外的自由度而有望用于信息传输,而且可能的光束轨道角动量数只受诸如光学孔径等实际条件的限制^[3],因此,用光轨道角动量编码相对于传统的二进制编码能够有效地提高数据传送密度和速率。文献^[4]在光学存储领域针对如何提高数据存储密度方面,提出一个用光束轨道角动量实现高密度数据存储的方法,对存储区域进行相位编码,通过探测透射光束轨道角动量谱的特征来区分由相位编码形成的不同数据态。本文通过研究具有轨道角动量光束及其通过计算全息图的变化规律,并结合无衍射光束的传输特性,提出一种空间光通信的编码以及解码方法。

2 基本原理

拉盖尔-高斯光束(LGB)是一类应用最为广泛的暗中空光束,具有固有的光轨道角动量。拉盖尔-高斯光束的电场表达式可由下式给出^[5]:

$$E = i\omega \left[(\hat{\alpha}x + \hat{\beta}y)u - \frac{i}{k} \left(\alpha \frac{\partial u}{\partial x} + \beta \frac{\partial u}{\partial y} \right) \hat{z} \right] \exp(-ikz), \quad (1)$$

其中

$$u = \frac{c \cdot z_R}{(1 + z^2/z_R^2)^{1/2}} \left[\frac{r\sqrt{2}}{w(z)} \right]^l L_p^l \left[\frac{2r^2}{w^2(z)} \right] \times$$

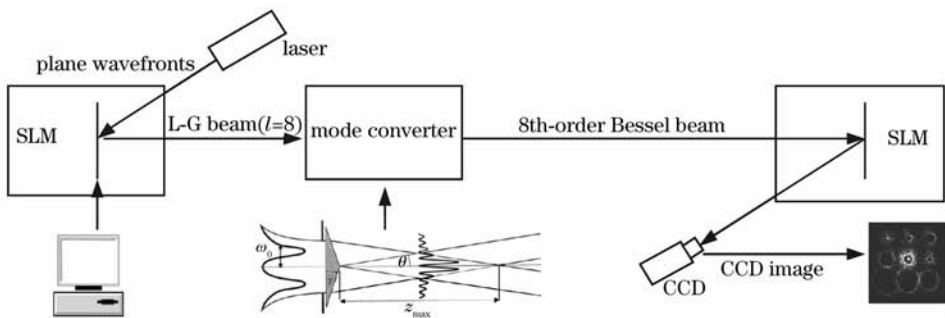


图1 通信系统光学结构示意图

Fig. 1 Optical configuration of communication system

无衍射光可以很容易的分解为具有相位因子 $\exp(i\theta)$ 的拉盖尔-高斯光束或贝塞尔光束的形式,角向相位函数 $\Phi(\varphi) = l\varphi$,因此每光子角动量为 $\hbar l$ 。对于无衍射光,考虑到远场分布 $A(\varphi)$ 是以 2π 为周期的,对远场(或透镜的焦点)上的角向幅值分

$$\exp \left[\frac{-r^2}{w^2(z)} \right] \exp \left[\frac{-ikr^2 z}{2(z^2 + z_R^2)} \right] \exp(-i\theta) \times \exp \left[i(2p + l + 1) \arctan \left(\frac{z}{z_R} \right) \right],$$

其中 α, β 为系数, $z_R = k\omega_0^2/2$ 为 Rayleigh 长度, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, ω_0 为束腰半径, $w(z) = [2(z^2 + z_R^2)/kz_R]^{1/2}$ 为距离束腰为 z 处的光束宽度, l, p 是整数变量,也是标定 L-G 模式的特征量子数, $c = \sqrt{2p!/\pi(|l|+p)!}$ 为归一化因子, L_p^l 是缔合拉盖尔多项式。由上式可以看出, L-G 光束存在一个相位因子 $\exp(i\theta)$,表明此模式的光束具有螺旋波前,是一种涡旋结构的光束。

无衍射光束被认为是在自由空间中传播时一定范围内横向强度分布保持不变的单色光场。理想的沿 z 轴传播单色空间相干无衍射光束的复振幅可以描述为如下形式:

$$U(x, y, z, t) = u(x, y) \exp[i(\omega t - \beta z)], \quad (2)$$

其中 u, ω, β 分别描述横向幅值分布、角频率和角波数。缓慢变化的幅值 u 与 z 坐标无关,因此光束在与 z 轴垂直的任一平面上的横向电场分布是完全保持不变的。(2)式描述的场通常是在线性或非线性光学材料中传输的波导模或空间孤子,对于理想的沿 z 轴传播的单色空间相干无衍射光束在自由空间中传输时,与时间无关的幅值

$$a(x, y, z) = u(x, y) \exp(-i\beta z) \quad (3)$$

必须满足 Helmholtz 方程

$$(\nabla^2 + k^2)a(x, y, z) = 0, \quad (4)$$

其中 $k = \omega/c$, c 是真空中光速。

布进行傅立叶变换,则得到光束的 $\exp(i\theta)$ 分量的傅里叶系数 \tilde{A}_l 的离散集。通过引入局部单光子轨道角动量 δ_l ,定义为 l_z 与能量密度 $w(x, y) = |u(x, y)|^2$ 比值的光子能量,故光束的每光子轨道角动量 δ_l 可写为

$$\delta l_z = \frac{\sum_l l |\tilde{A}_l|^2}{\sum_l |\tilde{A}_l|^2} \hbar. \quad (5)$$

虽然理想的无衍射光束由于实际光学孔径的限制无法实现,但已得到的近似的无衍射光束传播距离远大于相同半径的高斯光束的瑞利距离。J. A. Davis 等于 1996 年提出,场分布具有高阶贝塞尔函数的光束也是无衍射光束^[6]。除了零阶贝塞尔光束外,其他高阶贝塞尔光束均为中心强度为零的空心光束,并且 n 阶贝塞尔函数仅比零阶贝塞尔函数多一个相位因子 $\exp(il\theta)$, 故属于光学涡旋(Optical Vortices),具有轨道角动量。图 1 为通过具有轨道角动量光学涡旋实现自由空间光通信系统的光学结构示意图,此处是 $l = 8$ 的情况。

3 编码原理

为了提高光学数据存储密度,文献[4]通过探测透射光束轨道角动量谱的特征,实现了高密度数据存储,文中使光束通过对其具有变化函数 $h(\rho, \varphi)$ 的四个台阶的结构(Quadrant Staircase Structure, QSS),并将作用后的场按螺旋斜波函数 $\exp(in\varphi)$ 进行展开,对其中的展开系数径向积分,进而得到螺

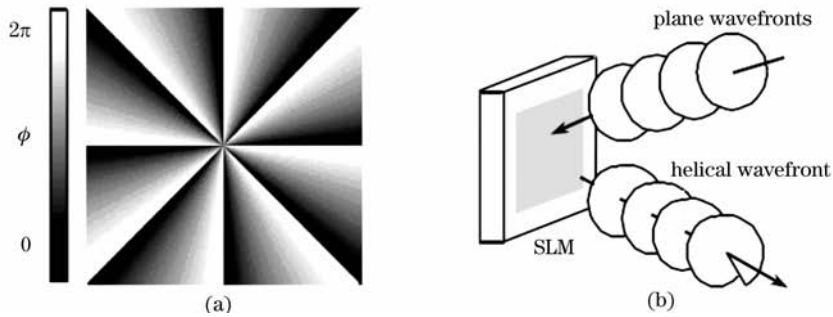


图 2 应用 SLM 产生 $l = 8$ 的 L-G 光束。(a) 相息图;(b) 波前变换示意图

Fig. 2 Create LG beam with $l = 8$ using a SLM. (a) The kinoform; (b) A schematic diagram of wavefront transform

从而使得入射平面波经过 SLM 进行反射式相位调制,如图 2(b)所示,在调制器的后焦面处光场分布为

$$\psi_l(r, \theta, 0) = \pi \omega^2 u_0 \exp(il\theta) \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{n+\frac{l}{2}} (\omega k r / 2f)^{2l+2n}}{n!(n+l)! (\frac{l}{2} + n + 1)}, \quad (7)$$

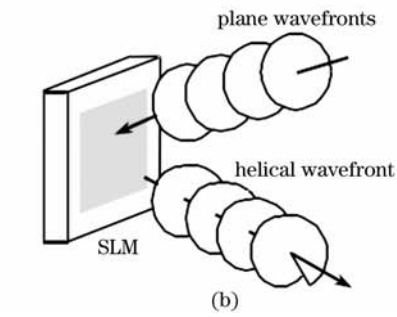
其中 $(r, \varphi, 0)$ 表示后焦面处的坐标, ω 是系统入射光瞳的半径, $u_0 = u(r, -f)$, 这里 $u_l(r, 0) = \int_0^{\omega} r' u(r', -f) J_l\left(\frac{k r r'}{f}\right) dr'$, 其中 $J_l(x)$ 是 l 阶第一类 Bessel 函数, 根据上式可以看出, 由于光场分布中含有方向角相移因子 $\exp(il\varphi)$, 该相位全息光栅

旋谱 P_n 。为了实现多位数据存储,通过研究台阶结构与螺旋谱的对应关系,结合 QSS 台阶参数的排列规则约束,得到了通过四个台阶形成 57 个不同的可由螺旋谱区分的排列,实现了同一存储单元上近 6 位数据的存储,极大的提高了数据的存储密度。

空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)是一种对光波的空间分布调制的器件。液晶空间光调制器是空间调制器的一种,主要利用液晶的光电效应实现对光波的相位调制和振幅调制,基于液晶的这一性质,可以作为空间光调制器实现光波的波前变换。计算全息是利用计算机设计制作全息图或衍射光学元件的技术,只需对被记录物波的数学描述或离散数据通过利用计算机程序进行处理,即形成一种可以光学再现的计算全息图。

文献[7]提出了利用液晶空间光调制器产生具有轨道角动量的光束,通过使用反射式相位调制 SLM,如图 2(a)所示,根据此相位分布,对入射光波的相位调制可以表示为

$$\varphi = l\theta - 2\pi \cdot \text{ent}\left(\frac{l\theta}{2\pi}\right), \quad (6)$$



用于产生 0 到 2π 范围内的与空间相关的相位延迟,此时准直的 He-Ne 激光光束照射到 SLM 上会产生 $l = 8$ 的 L-G 光束,同时产生的空心光束的光环强度最大处距离相位奇点中心距离 R 与 l 值成正比,二者具有如下关系:

$$R = a \frac{\lambda f}{\pi \omega} \left(1 + \frac{l}{l_0}\right) \quad (8)$$

此处 a 及 l_0 可取常数,在编码部分可以通过调制空间光调制器实现不同 l 值进行编码。

编码中发射机单元由激光器产生入射平面波,准直的激光光束照射到 SLM 上,通过计算机控制显示在 SLM 上的一组计算好的全息光栅图样,相

应产生具有不同 l 值的 $L-G$ 光束,经 SLM 调制后光束具有了相应的轨道角动量,由于 l 是整数变量,也是标定 $L-G$ 模式的特征量子数,这里选用一组具有不同 l 值的 $L-G$ 光束作为字符集,设定的字符集包括 l 的值为 $-16, -12, -8, -4, 4, 8, 12, 16$ 八种字符,代表八种不同信息。三位二进制信息被编码到涡旋光场中,其中具有拓扑荷为 $-16, -12, -8, -4, 4, 8, 12, 16$ 的八个值通过编码,各个涡旋光场的权重系数可以被控制并且用于描述信息单元。在接收端经过计算全息图衍射,信息代码通过在探测器预先确定的位置上的亮点光斑来识别。图 2(a) 是在 SLM 上用来对入射光波进行相位调制的相息图,此处通过相位全息光栅进行编码并且测量光轨道角动量,该相位全息光栅用于产生 0 到 2π 范围内的与空间相关的相位延迟,此时准直的 He-Ne 激光光束照射到 SLM 上会产生 $l = 8$ 的 $L-G$ 光束,如图 2(b) 所示。

无衍射光在自由空间中传播时一定范围内横向强度分布保持不变,光斑半径小,传播距离远大于相应高斯光束的瑞利距离。高阶 Bessel 光束便是一种典型的无衍射光,一种高效产生高阶 Bessel 光束的方法是利用锥形透镜作为模式转换器,能够将入射的 $L-G_p^l$ 光束转变为相应的 l 阶 Bessel 模^[8]。将锥形透镜放置在入射 $L-G_p^l$ 光束的束腰处, $L-G_p^l$ 光束的相位因子 $\exp(il\theta)$ 经锥形镜转换后仍然存在,近似产生 l 阶 Bessel 光,此时 $L-G$ 模束腰处电场幅度为

$$E(r, \varphi, 0)_{LG} = A(2r^2/w_0^2)L_p^{|l|}(2r^2/w_0^2) \times \exp(-r^2/w_0^2)\exp(il\varphi), \quad (9)$$

转换过程如图 3 所示。

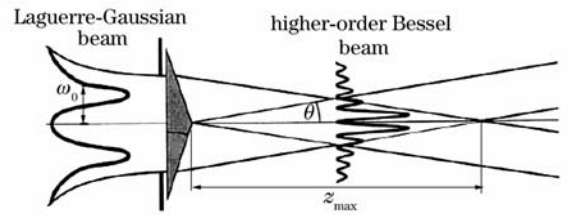
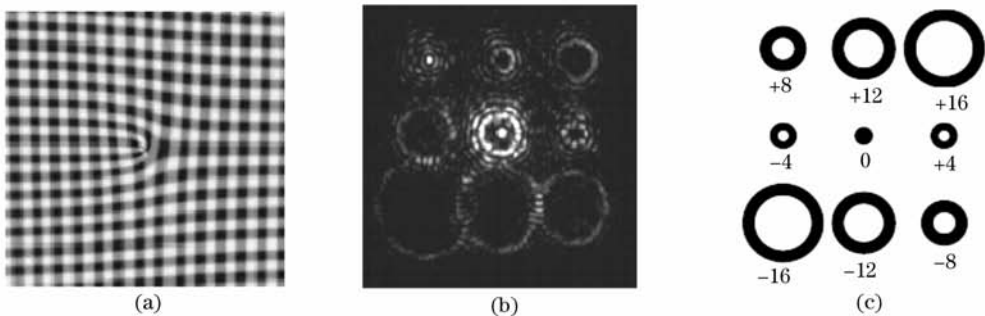


图 3 用 $L-G$ 光束照射圆锥透镜产生近似高阶 Bessel 光束
Fig. 3 Illuminating an axicon with a Laguerre-Gaussian mode generates an approximation to a higher-order Bessel beam within the shaded region

这里使平面波通过具有 $l = 8$ 的相息图的反射式相位调制的 SLM,将得到的 $l = 8$ 的 $L-G$ 光束,利用锥形透镜作为模式转换器,转变为相应的 8 阶无衍射的 Bessel 模,根据无衍射光的特点,保证了携带信息的具有轨道角动量的光束能够在自由空间得以有效的传输。

4 解码原理

接收部分主要由具有分析光栅图样的反射式相位调制的 SLM 和 CCD 光探测器构成。接收部分接收到发射机的光束并聚焦后照射到有分析光栅图样的 SLM 上。光栅图样如图 4(a) 所示,接收机的全息分析光栅是两种相位图样的和,一个是 4 级中心位错的垂直相位光栅和一个类似的 12 级中心位错的水平相位光栅,通过两个相位图样叠加起来,就可以产生水平和垂直的分离光束,然后用 CCD 光探测器测量特定点光强,得到一个由分离光束组成的 3×3 矩阵,如图 4(b) 所示,其中 $l = 0$ 处为中心光强,在此可以用来对准和确定测量轴,除此以外,可以认为产生了相应于所选字符集的八个衍射级,其中有一束具有最高光强,以此光束来确定入射光的轨道角动量^[9]。

图 4 (a)分析衍射光栅计算全息图;(b) $L-G$ 光束照射时相应的远场衍射图样;(c)衍射图样相应的字符集定义
Fig. 4 (a)Computer generated hologram with diffractive grating ;(b)The corresponding far-field diffraction patterns under $L-G$ beam illumination; (c)A alphabet corresponding to diffraction patterns has been defined

对于编码部分所设定的字符集,可以以上述除过中心 $l=0$ 通道位置的八个衍射级进行一一对应,即由 l 值为 $-16, -12, -8, -4, 0, 4, 8, 12, 16$ 九束光组成的 3×3 矩阵分别对于所选字符集,如图 4(c) 所示。

数据解码结果如图 5 所示,通过观察具有最高光强的一束光,结合在探测器上预先确定的位置,可以确定入射光的轨道角动量 $l=8$,即通过光束的轨道角动量编码,实现信息传送^[10],由于字符集包括 l 的值为 $-16, -12, -8, -4, 4, 8, 12, 16$ 八种字符,作为离散无记忆信源,可以对每个字符进行等长编码,编码长度 N 由下式决定:

$$N = \begin{cases} \log_2 L & L \text{ 是 2 的幂} \\ \lceil \log_2 L \rceil + 1 & L \text{ 不是 2 的幂} \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示取正运算。此处 $L=8$,故设定接收端收到对应的等长的八个三位二进制信息,依次为 000,001,010,011,100,101,110,111,通过这种方式编码,可以产生 2^3 个信息码。

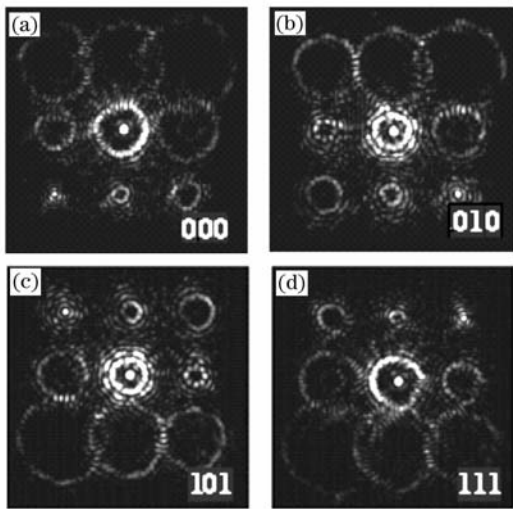


图 5 特定点最高光强代表信息码

000($l=-16$),010($l=-8$),101($l=8$)和111($l=16$)

Fig. 5 Intensity at specific points on the diffraction patterns representing information codes 000($l=-16$),010($l=-8$),101($l=8$) and 111($l=16$)

5 结 论

近年来,随着光轨道角动量研究的进一步深入,利用有轨道角动量的光场实现自由空间光通信数据编码也取得一些进展。本文提出了一种结合计算全

息图和无衍射光束传输特点的单光束轨道角动量编码方法,通过外调制方式,使激光器发出的光经过计算机全息图,转换为具不同轨道角动量的 L - G 光束,再经过轴锥透镜转换为相应的高阶 Bessel 无衍射光束来进行信息传输,最后通过全息图对于编码为不同 l 值的不同的数据进行解析,由于 l 值越大则 L - G 光束直径越大,故选择的 l 值的光束直径通常会受到通信系统的光学孔径的限制,通过转换为诸如高阶 Bessel 无衍射光束来进行信息传输,可以更为自由灵活的选取不同的 l 值进行信息编码,对字符集进行扩展,从而增加传输数据量。充分利用无衍射光束在自由空间中传播时一定范围内横向强度分布保持不变的特点,这样在保证信息内容不会被窃听的同时,保证了传输的信息量和准确性。对于光学系统的设计问题作者正在进一步研究设计之中,计划在另外一篇文章中对其进行专门论述。

参 考 文 献

- 1 Ke Xizheng, Xi Xiaoli. The survey of Wireless Laser Communication [M]. Beijing University of Posts and Telecommunications Press,2004
柯熙政,席晓莉.无线激光通信概论[M].北京:北京邮电大学出版社,2004
- 2 Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L. Management of the angular momentum of light: preparation of photons in multidimensional vector states of angular momentum[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**: 013601
- 3 Zdenek Bouchal, Radek Celechovsky. Mixed vortex states of light as information carriers[J]. *New J. Phys.*, 2004, **6**(1): 131
- 4 Liu Yidong, Gao Chunqing, Gao Mingwei et al. . Realizing high density optical data storage by using orbital angular momentum of light beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56** (2):854~858
刘义东,高春清,高明伟等.利用光束的轨道角动量实现高密度数据存储的机理研究[J]. *物理学报*, 2007, **56** (2):854~858
- 5 L. Allen, V. E. Lembessis, M. Babiker. Spin-orbit coupling in free - space Laguerre - Gaussian light beam [J]. *Phys. Rev.*, 1996, **A53** (5):2937
- 6 J. A. Davis, E. Carcole, D. M. Cottrell. Intensity and phase measurement of nondiffracting beams generated with a magneto-optic spatial light modulator [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35** (4): 593~598
- 7 Jennifer E. Curtis, David G. Grier. Modulated optical vortices [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**: 872~874
- 8 J. Arlt, K. Aholakia. Generation of high - order Bessel beams by use of an axicon [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **177**: 297~301
- 9 Graham Gibson, Johannes Courtial, Miles J. Padgett. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(22):5448~5456
- 10 G. Gibson, J. Courtial, M. Vasnetsov et al. . Increasing the data density of free-space optical communications using orbital angular momentum[C]. *SPIE*, 2004, **5550**:367~373