

轨道角动量光的区分

施 帅^{1,2} 丁冬生^{1,2} 周志远^{1,2} 李 岩^{1,2} 张 伟^{1,2} 史保森^{1,2}

¹中国科学技术大学量子信息重点实验室, 安徽 合肥 230026

²中国科学技术大学量子信息与量子科技前沿协同创新中心, 安徽 合肥 230026

摘要 载有轨道角动量(OAM)的光可用于提高光通信网络的带宽,而对不同轨道角动量态的区分是有效利用轨道角动量光的核心。利用空间光调制器设置合适的传递函数以实现傅里叶平面间的光学坐标变换。变换后,轨道角动量光随方位角的相位变化变成横向相位变化。相位修正后将不同轨道角动量的光聚焦到不同的横向位置,实现了对轨道角动量光的有效区分。

关键词 傅里叶光学; 模式识别; 空间光调制器; 光通信

中图分类号 O438.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0607001

Sorting of Orbital Angular Momentum States of Light

Shi Shuai^{1,2} Ding Dongsheng^{1,2} Zhou Zhiyuan^{1,2} Li Yan^{1,2} Zhang Wei^{1,2} Shi Baosen^{1,2}

¹Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

²Synergetic Innovation Center of Quantum Information & Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract While light carrying orbital angular momentum (OAM) has much potential in increasing the bandwidth of communication networks, sorting of different OAM states is one of the key techniques to utilize it effectively. A method is proposed to realize optical coordinate transformation between two Fourier planes with the aid of spatial light modulator. After the transformations, the phase of light depending on azimuthal angle is changed to depend on transverse position. Each OAM state is focused to a lateral position after a phase-correcting element. This method realizes sorting of light with OAM efficiently.

Keywords Fourier optics; pattern recognition; spatial light modulator; optical communication

OCIS codes 070.5010; 070.6120; 060.4510

1 引 言

当前轨道角动量(OAM)光吸引了大量研究人员的注意力^[1-3]。Allen等^[4]在1992年认识到具有 $\exp(il\alpha)$ 波前的螺旋相位光具有实质上的OAM,其中 α 代表绕光轴的方位角。当 l 取任意整数时都能保证光束绕光轴的相位连续变化,这样光束能够在空间稳定传输。OAM光可以对照射的物体产生力矩作用,可以无接触测量旋转物体的旋转频率,还可用作光镊等^[4-6]。与只有两个维度的偏振自由度不同,光的OAM自由度在理论上是没有维度限制的。利用光的OAM来编码信息是显著提高光通信网络带宽的重要方法^[7]。OAM叠加态的存储,以及频率变换过程中与OAM态的变化有关的实验工作,为OAM光编码信息提供了可靠的基础^[8-9]。而对不同OAM态的区分,是提取信息和提高带宽的重要技术。目前国内在OAM的区分技术上与国际水平还有差距。对不同OAM态的有效区分可以利用OAM光来编码信息,以提高光通信网络的带宽。本文实验

收稿日期: 2014-12-24; 收到修改稿日期: 2015-02-10

基金项目: 国家973计划(2011CBA00200)、国家自然科学基金(11174271、61275115、61435011)、中国科学技术大学青年创新基金(9850320804)。

作者简介: 施 帅(1989—),男,硕士研究生,主要从事量子信息等方面的研究。E-mail: shishuai@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 史保森(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事量子信息等方面的研究。E-mail: drshi@ustc.edu.cn(通信联系人)

验证了一种区分方案,利用透镜和空间光调制器对OAM光的波前进行重构,使之成为易于区分的、传播方向不同的平面波。该方案可同时区分含有多种OAM的光束,并且该模式识别的方法适用于单光子级。

2 实验装置

目前测量和区分OAM的方法主要有4种:1)利用有分叉的衍射光栅将特定OAM的光在一级衍射方向上转换成高斯光,这种方法的缺点是不能同时探测多种模式的光^[10];2)让OAM光与高斯光干涉,通过干涉图样来区分不同模式,但这种方法不能用于单光子水平的区分^[11];3)OAM光经过狭缝、小孔等产生的衍射图样也可以用于区分不同模式,但这种方法也不能用于单光子水平^[12];4)利用光学元件重构OAM光的波前使之易于区分,这种方法不仅能同时区分多种OAM光,还可以用于单光子水平的区分^[13]。本文采用最后一种区分方法,利用透镜和空间光调制器对OAM光的波前进行重构,使之成为易于区分的、传播方向不同的平面波。

实验装置如图1所示,795 nm的激光经1/4波片和1/2波片调偏振后进行拓束,使光束直径达到6 mm,以便空间光调制器(SLM)能够更精确地调节光束的波前。由于SLM只能有效地调节水平偏振的光束,因此需要用偏振分束器(PBS)将垂直偏振的光过滤掉。高斯光束垂直入射到SLM1上,SLM1用于将入射的高斯光转换为所需的OAM光。SLM上加载的相位图,从白到黑表示对波前由0到 2π 的相位调制。后续的标准4f系统用于将SLM1处的波前加载到SLM2上。SLM2与SLM3处在一对傅里叶平面上,一个焦距为250 mm的透镜用于实现光学傅里叶变换。SLM2上加载的相位图可以任意调节光学傅里叶变换中的传递函数,适当的传递函数可以实现两个傅里叶平面间的坐标变换。SLM2平面的坐标用 x, y 表示,SLM3平面的坐标用 u, v 表示,为了将OAM光随方位角变化的相位变换为横向变化的相位,所要实现的光学坐标变换为

$$u = -a \ln(\sqrt{x^2 + y^2}/b) \text{ 和 } v = -a \arctan(y/x),$$

实验中加载的相位函数是

$$\varphi_1(x, y) = \frac{2\pi a}{\lambda f} \left[y \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - x \ln\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{b}\right) + x \right], \quad (1)$$

式中 λ 是输入光的波长, f 是傅里叶变换透镜的焦距, a 参数决定了光学变换后光束在SLM3平面上的横向尺寸,变换后光束的横向尺寸 $2\pi a$ 不能超过SLM3的有效作用范围。 b 是独立于 a 的参数,可根据系统适当调节。实验中使用的波长 $\lambda = 795 \text{ nm}$,透镜焦距 $f = 250 \text{ mm}$,变换后光束的横向尺寸 $2\pi a = 8 \text{ mm}$,参数 $b = 4.5 \text{ mm}$ 。该相位函数最大值与最小值之差远大于 2π 。由于SLM只能实现0到 2π 的相位调制,为了对波前进行满足上面函数的大幅度相位调制,实验时将相位函数对 2π 取余。由于相隔 2π 整数倍的相位调制是等效的,因此SLM上加载的条纹状相位图能够对波前进行满足(1)式的大幅度相位调制。随后的标准傅里叶光路实现了从SLM2平面到SLM3平面间的光学坐标变换,给出了两平面上复振幅间的近似关系^[14]。计算可得OAM光加载相位函数(1)式后经傅里叶变换在SLM3上的复振幅分布。变换后的复振幅相位部分除了源自OAM光随方位角变化的相位,还有源自光学坐标变换时不同坐标点光程差异导致的相位。为了区分不同OAM的光,需要利用SLM3来校正光学坐标变换带来的相位扭曲。SLM3上加载的相位校正函数是

$$\varphi_2(u, v) = -\frac{2\pi ab}{\lambda f} \exp\left(-\frac{u}{a}\right) \cos\left(\frac{v}{a}\right). \quad (2)$$

相位校正后,光束只有横向的相位变化,并且横向的相位变化量等于原OAM光相位随方位角的变化量。由于不同OAM光的相位变化量相差 2π 整数倍,变换后的光束对应于不同传播方向的平面波。最后的透镜将不同OAM光聚焦到相机感光平面不同的横向位置。OAM量子数为 l 的光变换后横向相位变化为 $2\pi l$,最后由焦距为 f 的透镜聚焦到横向位置为 $d_l = l \frac{\lambda f}{2\pi a}$ 处。由于相邻OAM的光变换后横向相位变化量相差 2π ,因此聚焦位置正好满足衍射分辨极限。

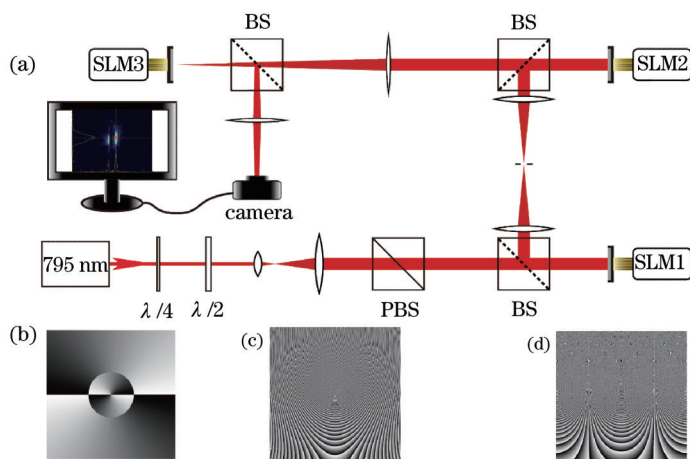


图1 (a) 实验装置图; (b) SM1; (c) SM2; (d) SM3上加载的相位图

Fig.1 (a) Experimental setup; (b) phase profile for SM1; (c) phase profile for SM2; (d) phase profile for SM3

3 实验结果

实验结果如图2所示,图2(a)表示的是不同OAM的光经过变换后聚焦的横向位置。从横向光强分布曲线可以清楚地看出,横向偏移量正比于轨道角动量的大小。并且相邻OAM光变换聚焦后相对偏移半个焦斑,正好满足衍射分辨极限,这与理论相符。通过光斑位置测量OAM时,可以令不同OAM对应相同大小的横向区域,则各区域中的光强对应相应OAM分量的大小。由于该系统变换时只利用了OAM光的一个周期,相邻OAM的焦斑间有交叠,实际操作中会存在交叉测量。由于系统中透镜的球差以及其他不完美性导致OAM较大时会出现焦斑形变。

在SLM1上加载图1(b)中所示的相位,使得光束中包含不同OAM的光。经过该系统变换聚焦后光束中不同OAM分量的光聚焦到不同的横向位置。该系统对符号相反的OAM光的区分比较清晰,如图2(b)中对 $l=1$ 、 -1 的区分明显优于对 $l=1$ 、 3 的区分,虽然 l 值都是相差2。图2(b)中 $l=5$ 、 0 、 -5 是对含有3种OAM光的光束进行区分。

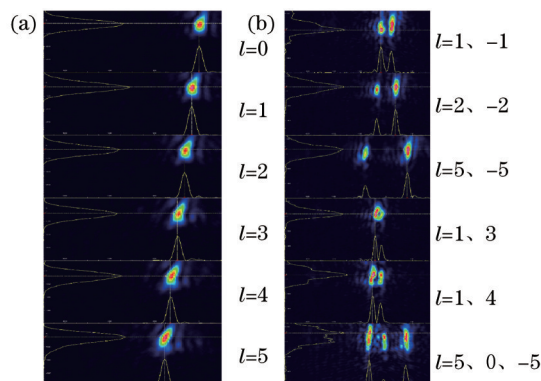


图2 实验结果图,图中的黄色曲线表示横向和纵向的光强分布。(a)不同OAM的光聚焦到不同的横向位置;(b)含有不同OAM的光束被聚焦到各分量相应的焦点处

Fig.2 Experimental results, yellow curves in the pictures represent the transverse and longitudinal intensity distribution. (a) Beams with different OAMs are focused to different transverse positions; (b) Beams containing different OAMs are focused to the focuses corresponding to each component

4 结 论

该系统通过对傅里叶变换加载适当的传递函数来实现光学坐标变换;从而将OAM光随方位角的相位变化变换为横向的相位变化。相位校正后由透镜将不同OAM的光聚焦到不同的横向位置,从而达到区分不同OAM光的目的。实验实现了对不同OAM光的有效区分,并且可以同时区分含有多种OAM的光。对OAM光

的聚焦使得软件识别更加容易,也有利于该方案用于单光子级的OAM的光区分。

参 考 文 献

- 1 Guo Jianjun, Guo Banghong, Cheng Guangming, *et al.*. Research progress on photon orbital angular momentum in quantum communication applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080003.
郭建军, 郭邦红, 程广明, 等. 光子轨道角动量在量子通信中应用的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 080003.
- 2 Liu Man. Novel method to detect the orbital angular momentum in optical vortex beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0326002.
刘 曼. 探测涡旋光束轨道角动量的新方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0326002.
- 3 Chen Juan, Ke Xizheng, Yang Yiming. Laguerre-Gaussian beam diffraction and dispersion of the orbital angular momentum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0427001.
谌 娟, 柯熙政, 杨一明. 拉盖尔高斯光的衍射和轨道角动量的弥散[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0427001.
- 4 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.
- 5 Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, *et al.*. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum[J]. *Science*, 2013, 341(6145): 537-540.
- 6 Simpson N B, Allen L, Padgett M J. Optical tweezers and optical spanners with Laguerre - Gaussian modes[J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(12): 2485-2491.
- 7 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.
- 8 Ding D S, Zhou Z Y, Shi B S, *et al.*. Single-photon-level quantum image memory based on cold atomic ensembles[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1-7.
- 9 Zhou Z Y, Ding D S, Jiang Y K, *et al.*. Orbital angular momentum light frequency conversion and interference with quasi-phase matching crystals[J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20298-20310.
- 10 Mair A, Vaziri A, Weihs G, *et al.*. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. *Nature*, 2001, 412(6844): 313-316.
- 11 Harris M, Hill C A, Tapster P R, *et al.*. Laser modes with helical wave fronts[J]. *Physical Review A*, 1994, 49(4): 3119.
- 12 Berkhout G C G, Beijersbergen M W. Method for probing the orbital angular momentum of optical vortices in electromagnetic waves from astronomical objects[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(10): 100801.
- 13 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.
- 14 Bryngdahl O. Geometrical transformations in optics[J]. *J Opt Soc Am*, 1974, 64(8): 1092-1099.

栏目编辑: 张 雁