

基于激光光束轨道角动量的 8 位数据信号产生与检测的实验研究*

齐晓庆 高春清[†] 辛璟焘 张戈

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

(2010 年 6 月 25 日收到; 2012 年 2 月 29 日收到修改稿)

本文研究了利用激光光束的轨道角动量进行 8 位数据信息传输的技术. 建立了一套利用光束轨道角动量进行 8 位数据信息传输的系统, 在信息调制部分采用可选通控制的光源阵列和相位调制屏实现光束轨道角动量态的编码复用, 在信息解调部分采用二元振幅光栅进行轨道角动量态检测, 实现了无误码的数据信息传输.

关键词: 轨道角动量, 光源阵列, 相位调制, 二元振幅光栅

PACS: 42.50.Dv, 42.50.Tx

1 引言

轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 是描述电磁波螺旋波前特征的一个物理量. 1992 年, Allen 等人通过实验研究了光束的轨道角动量, 发现具有 $\exp(-il\varphi)$ 形式相位因子的光束的每个光子携带的轨道角动量为 $l\hbar$ (l 为轨道角动量量子数)^[1]. 此类光束的典型特征为光束中心存在相位奇点, 其波前为螺旋形, 因此也称为螺旋光束. 螺旋光束所携带的轨道角动量在许多领域具有非常重要的应用前景^[2-10].

由于光的轨道角动量可以取 $(-\infty, +\infty)$ 内的任意值, 因此其有可能被用于进行信息的传输^[11-14]. 近年来国外已有一些研究小组搭建了利用轨道角动量进行数据传输的系统^[2,15,16], 通过对光束进行相位或振幅调制实现数据信息加载; 国内我们实现了光束轨道角动量态的叠加复用系统, 采用光学干涉仪的方法实现信息的调制^[17,18]. 其中, 通过改变相位或振幅调制加载信息时^[2,12,15], 调制速度受到空间光调制器刷新频率的限制; 采用干涉仪方法时^[17,18] 信息调制速度直接取决

于 Dove 棱镜或 Porro 棱镜等光学元件的机械旋转速度, 并且系统对光路的调节精度要求很高. 2007 年, 由 Celechovsky 等人利用对四个 LD 进行相位调制的方法实现了 4 个不同轨道角动量态的叠加复用^[16], 该方法能够进行轨道角动量快速调制且调制过程中不需要旋转元器件, 实现起来相对便捷. 本文中, 我们建立了一套利用光束轨道角动量进行 8 位数据信息传输的系统, 在信息调制部分采用可选通控制的光源阵列和固定的相位调制屏实现轨道角动量态的编码复用, 在信息解调部分采用二元振幅光栅进行轨道角动量态检测, 实验实现了无误码的信息传输.

2 光束轨道角动量信息传输系统的工作原理

利用光源阵列选通控制和相位调制的方法实现数据信息加载的原理如图 1 所示, 可以简要描述为: 通过设计相位调制函数, 能够实现基模高斯光束变换到携带轨道角动量的螺旋光束, 如图 1 中基模高斯光束 (a) 经相位调制板 (b) 后衍射场光强分

* 国家自然科学基金 (批准号: 60778002) 资助的课题.

[†] E-mail: gao@bit.edu.cn

布为 (c); 根据 (c) 中的衍射图样分布, 在每个衍射级位置上摆放光源, 构成一个光源阵列, 如图 (d); 对图 (d) 中的光源阵列准直会聚后入射到设计好的相位调制板 (f) 上, 图中 (f) 与 (d) 为相同的调制板; 那么远场衍射场如 (g) 所示, 虚线圈内的衍射级上将携带光源阵列中每一个光源的一个衍射级且轨道角动量态互不相同; 根据待传输数据驱动控制光源阵列中各个光源的电源通断, 实现传输数据的加载; 滤出 (g) 中虚线框内的衍射光束并发射出去, 便完成了数据信息的调制.

由于该方法中携带信息的光束包含多个不同轨道角动量态的螺旋光束, 且各个螺旋光束互不相

干, 所以信息解调部分可用复合叉状光栅便可以实现轨道角动量态的检测及信息解调. 其原理为: 若入射光束的角量子数 l 与二元振幅光栅的中心位错数 l_0 匹配, 则在某一特定的衍射级将得到角量子数为零的光束, 此时该衍射级呈现为一个亮斑, 在检测轨道角动量态时我们能够根据亮点出现的位置反推出射光束的轨道角动量态. 利用此二元振幅光栅, 我们能够检测出角量子数为 $-4, -1, +1, +4$ 的 8 个轨道角动量态. 如图 2 中采用中心横向一个位错、纵向三个位错的二元振幅光栅, 当入射光束的角量子数 -3 时, 相应的纵向 $+1$ 级衍射位置上出现亮斑.

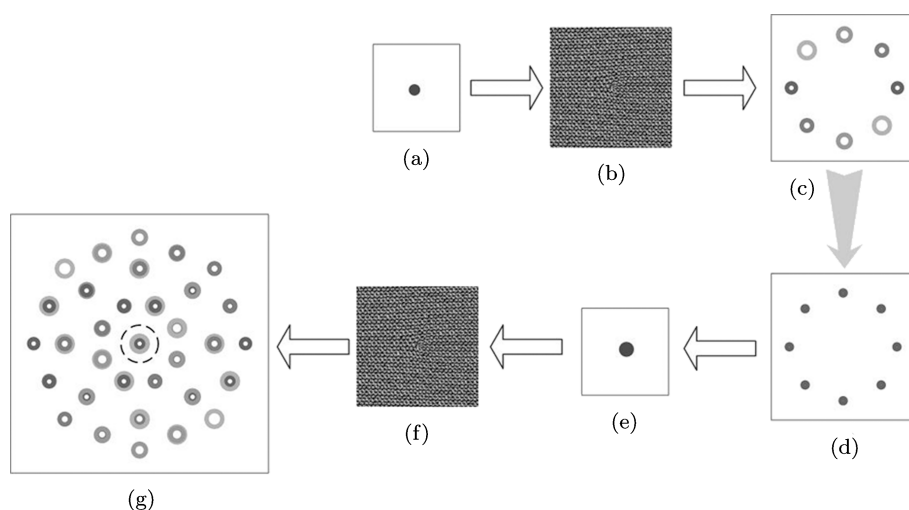


图 1 光束轨道角动量调制原理图

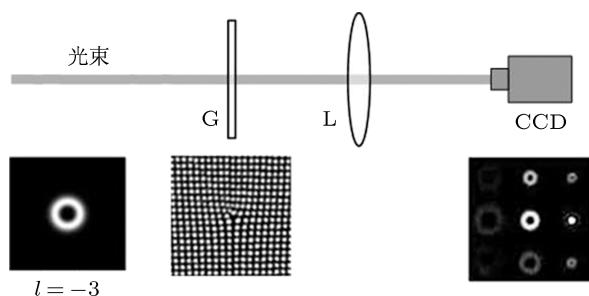


图 2 利用二元振幅光栅测量光束轨道角动量态原理图

3 光束轨道角动量信息传输系统实验及讨论

我们搭建了一套基于光束轨道角动量的信息

传输系统, 如图 3 所示. 实验中, 将 8 个激光二极管 (635 nm@2.5 mW) 固定在设计加工好的安装架上, 安装架对角线上两个 LD 中心间距为 70 mm, 每个 LD 通过前后总共 8 个螺钉来控制其高低俯仰及左右倾斜. L_1 (焦距 1000 mm)、 L_2 (焦距 100 mm) 构成的透镜系统将各光束之间间距拉近为出射时的 1/10, 即将对角线上 LD 出射光间距由 70 mm 缩小至 7 mm. 光束阵列经透镜 L_3 (焦距 500 mm) 聚焦后, 透过偏振片 P_1 入射到位于 L_3 后焦平面的空间光调制器上. 利用迭代优化算法设计相位调制板, 并通过调整空间光调制器上的相位调制函数, 使得光束阵列中各个光束的相应衍射级在光束阵列中心位置重合. 经过相位调制后的光束再经透镜 L_4 作光场傅里叶变换, 并用小孔光阑 H 滤出携带光源阵列 8 个激光二极管衍射分量的中心衍射光束,

之后,经透镜 L_5 (焦距 300 mm) 准直后发射出去;至此,完成了对光束轨道角动量态的 8 位数据调制和信息加载. 整个光束传输链路在光学平台上经过四次全反射进行光路折叠,总光程为 10 m. 在接收端,由复合叉状二元振幅光栅 G 、透镜 L_6 (焦距 800 mm) 及 CCD 构成的轨道角动量态检测系统完成信息检测.

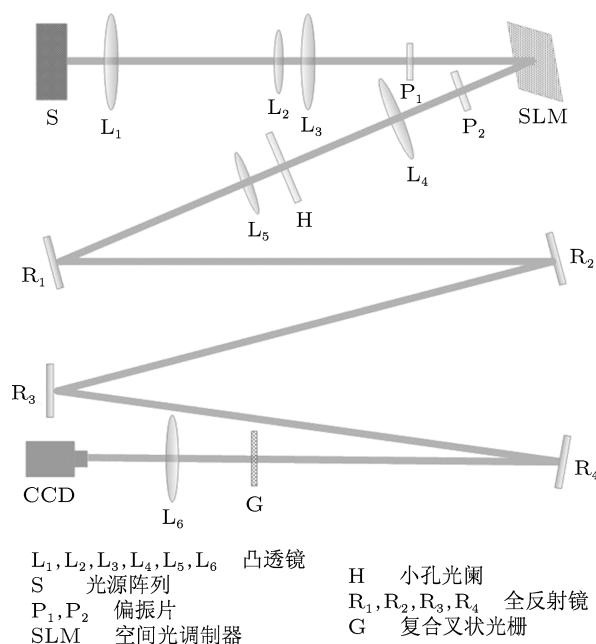


图 3 光束轨道角动量信息传输系统结构示意图

3.1 对光源阵列进行相位调制实现数据信息加载

根据迭代优化算法设计相位调制函数^[19],并利用空间光调制器生成相位调制板,如图 4(b),使得高斯光束远场衍射场能量集中 8 个不同轨道角动量态的螺旋光束上,利用衰减片滤除能量微弱的衍射光束后,远场衍射场光斑如图 4(c)所示.

实验中,光源阵列 S 出射的 8 束高斯光束经会聚后入射到图 4(b)所示的相位调制板上,在小孔光阑 H 前可观测到远场衍射图样,如图 5 所示.

图 5 中虚线框内的衍射光束携带了光源阵列 S 中 8 个光源的不同衍射级.若按照衍射光束的不同角量子数 $+4 \rightarrow +1, -1 \rightarrow -4$ 进行编码,则对 $LD_1 \rightarrow LD_8$ 进行选通控制时,图 5 虚线圈内的衍射光束将

包含相应的不同角量子数螺旋光束的同轴叠加组合,从而实现 8 位数据信息的加载.

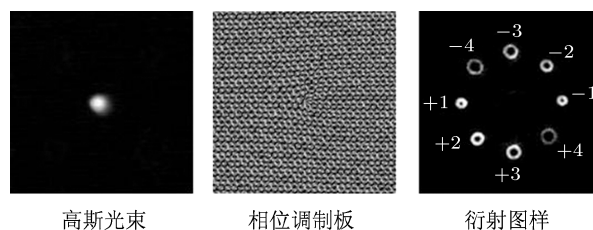


图 4 高斯光束相位调制实验结果

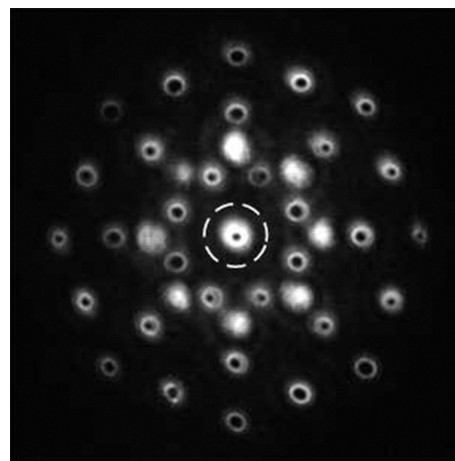


图 5 光源阵列相位调制实验结果

3.2 利用二元振幅光栅实现轨道角动量检测和信息解码

在实验中,由小孔光阑 H 滤出携带光源阵列各个衍射分量的光束并进行传输.在数据接收端,我们使用图 2 所示的检测装置对传输光束携带的轨道角动量态进行检测,进而确定出该通信链路传输的码字.部分测量结果如图 6 所示.图 6(a)—(h)为只选通光源阵列中单个 LD 时,对应的检测图样;图 6(i)—(k)为选通光源阵列中两个 LD 时的检测结果;图 6(l)为选通光源阵列中四个 LD 的检测结果.

图 6 中的 8 位码字是对 $LD_1 \rightarrow LD_8$ 按照各个 LD 安装位置进行编码的,也即对传输光束的轨道角动量态按照 $(+4, +3, +2, +1, -1, -2, -3, -4)$ 进行编码.实验中,在光学平台上用全反射镜对光路进行四次折叠,最终实现 8 位数据传输.

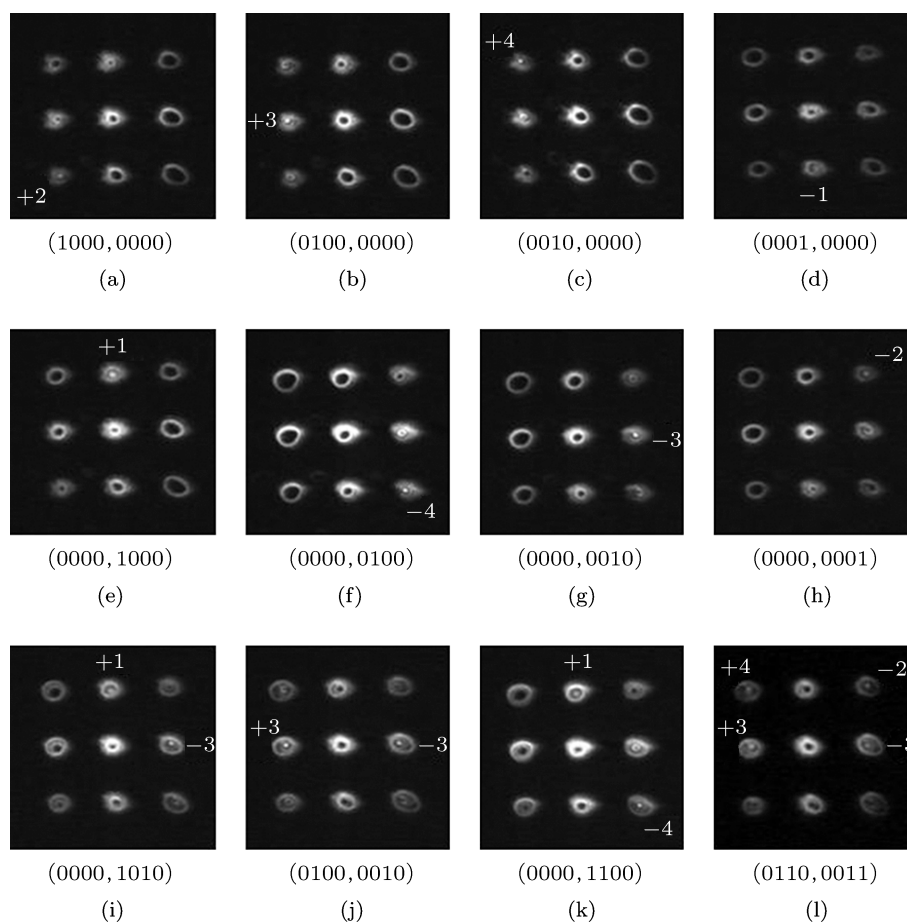


图6 激光光束轨道角动量数据传输系统解调实验结果

4 结论

本文首次搭建了一套基于激光光束轨道角动量的8位数据传输系统,并对该系统的工作情

况进行了实验验证,给出了相应的原理分析和实验结果.该系统实现了8位数字信息无误码自由空间传输,能够用于提高光束轨道角动量信息传输系统的调制速度和信息容量.

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [2] Bouchal Z, Celechovsky R 2004 *New J. Phys.* **21** 1192
- [3] Liu Y D, Gao C Q, Li F, Gao M W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 854 (in Chinese) [刘义东, 高春清, 李丰, 高明伟 2007 物理学报 **56** 854]
- [4] Santamato E, Sasso A, Piccirillo B, Vella A 2002 *Opt. Express* **10** 871
- [5] Gao C Q, Gao M W, Weber H 2004 *Optik*. **113** 129
- [6] Jeascher A, Fiihrapter S, Maurer C, Bernet S, Ritsch-Marte M 2006 *Opt. Express* **14** 6342
- [7] Morris J E, Carruthers A E, Mazilu M, Reece P J, Cizmar T, Fischer P, Dholakia K 2008 *Opt. Express* **16** 10117
- [8] Mair A, Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2001 *Nature* **412** 313
- [9] Liu N C, Wang W B, Gao W J, Yin J P 2000 *Phys.* **29** 220 (in Chinese) [刘南春, 王文宝, 高伟建, 印建平 2000 物理 **29** 220]
- [10] Su Z K, Wang F Q, Lu Y Q, Jin R B, Liang R S, Liu S H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3016 (in Chinese) [苏志锟, 王发强, 路轶群, 金锐博, 梁瑞生, 刘颂豪 2008 物理学报 **57** 3016]
- [11] Wu J Z, Li Y J 2007 *Chin. Phys.* **16** 1334
- [12] Lin J, Yuan X C, Tao S H, Burge R E 2007 *Appl. Opt.* **46** 4680
- [13] Chen L X, She W L 2009 *Opt. Lett.* **34** 1855
- [14] Wang T, Pu J X, Chen Z Y 2009 *Opt. Commun.* **282** 1255
- [15] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, Vasnetsov M, Pas'ko V, Barnett S M, Franke-Arnold S 2004 *Opt. Express* **12** 5448
- [16] Celechovsky R, Bouchal Z 2007 *New J. Phys.* **9** 328
- [17] Liu Y D, Gao C Q, Gao M W, Qi X Q, Weber H 2008 *Opt. Commun.* **281** 3636
- [18] Gao C Q, Qi X Q, Liu Y D, Weber H 2010 *Opt. Express.* **18** 72
- [19] Qi X Q, Gao C Q, Liu Y D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 264 (in Chinese) [齐晓庆, 高春清, 刘义东 2010 物理学报 **59** 264]

Experimental study of 8-bits information transmission system based on orbital angular momentum of light beams*

Qi Xiao-Qing Gao Chun-Qing[†] Xin Jing-Tao Zhang Ge

(School of Optical-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 25 June 2010; revised manuscript received 29 February 2012)

Abstract

An experimental setup is built to realize 8-bits information transmission based on orbital angular momentum (OAM) of light beams. In the modulation section, a controllable laser diode array and a stable phase modulator are used to superpose and encode the OAM states. A binary amplitude grating is used to detect the OAM states in the demodulation part. This system transmits 8-bits data successfully.

Keywords: orbital angular momentum, laser diode array, phase modulation, binary amplitude gratings

PACS: 42.50.Dv, 42.50.Tx

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60778002).

[†] E-mail: gao@bit.edu.cn