

doi:10.3788/gzxb20184709.0905002

# 轨道角动量分离系统中纯相位型扇出光栅的设计

尹霄丽, 廖焕宇, 王拥军, 常欢, 崔小舟, 林娇玲

(北京邮电大学 电子工程学院 天地互联与融合北京市重点实验室, 北京 100876)

**摘 要:** 基于坐标变换的轨道角动量光束分离技术, 提出一种基于迭代算法的纯相位型扇出光栅设计方法, 实现光束复制, 以提高输出光斑的分辨率. 建立轨道角动量光束的高分辨率分离系统的数值仿真模型. 数值结果表明, 加入该方法设计得到的纯相位型扇出光栅后, 系统接收到的光斑能量更加集中, 轨道角动量螺旋谱的弥散程度至少下降了 0.35, 错误概率下降了 15% 以上, 有利于系统实现高分辨率的轨道角动量光束分离.

**关键词:** 轨道角动量; 坐标变换; 扇出; 纯相位; 分离

**中图分类号:** TN929.12; O436

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2018)09-0905002-7

## Design for the Phase-only FAN-OUT Grating of Orbital Angular Momentum Separation System

YIN Xiao-li, LIAO Huan-yu, WANG Yong-jun, CHANG Huan, CUI Xiao-zhou, LIN Jiao-ling  
(Beijing Key Laboratory of Space-Ground Interconnection and Convergence,  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Based on the coordinate-transformation Orbital Angular Momentum (OAM) sorting scheme, this paper designs a phase-only FAN-OUT grating using a method based on iterative algorithm to copy beams and improve the resolution of the OAM beams sorting efficiently. This paper establishes a numerical simulation model for high-resolution sorting of OAM beams. Numerical results indicate that the energy in the spot received by the system with phase-only FAN-OUT grating is more concentrate and the minimum reduction of dispersion degree of the OAM spectrum is 0.35, the minimum reduction of the error probability is 15%. The phase-only FAN-OUT grating is advantageous for realizing high-resolution sorting of OAM beams.

**Key words:** Orbital angular momentum; Coordinate transformation; Fan-out; Phase-only; Sorting

**OCIS Codes:** 050.1950; 010.1330; 100.4994; 060.5060; 040.1880

## 0 引言

1992 年, Allen 等指出具有  $\exp(-il\varphi)$  波前的涡旋光束每光子具有  $l\hbar$  的轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM)<sup>[1]</sup>, 其中拓扑荷  $l$  可以取任意整数,  $l$  也称作角向指数,  $\varphi$  为方位角. 由于具有不同 OAM 模式的光束是相互正交的, 因此有效利用 OAM 光束能极大地提升光通信系统的容量和频带利用率. OAM 光束的分离是空间光通信系统中的关键与难点<sup>[2-3]</sup>, 近年来出现了多种分离方法, 例如利用  $N$  个叉形衍射光栅分离  $N$  个模式复用的光束, 该方法的能量效率低而且系统复杂<sup>[4]</sup>; 利用  $N-1$  个级联的马赫增德尔干涉仪分离  $N$  个模式复用的光束, 虽然该方法能量效率高, 但是系统结构复杂<sup>[5]</sup>.

为了提高能量效率, 简化系统结构, BERKHOUT G C 等提出基于坐标变换的 OAM 分离方案. 该方案

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No.61575027) 和北京邮电大学博士创新基金 (Nos.CX2018212, CX2018213) 资助

**第一作者:** 尹霄丽 (1970—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为无线光通信. Email: yinxl@bupt.edu.cn

**收稿日期:** 2018-04-16; **录用日期:** 2018-05-31

<http://www.photon.ac.cn>

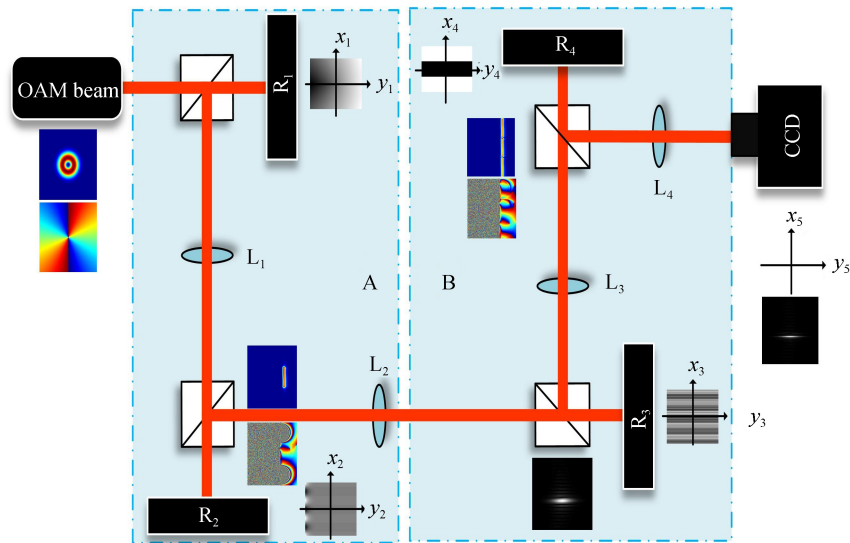
将具有不同 OAM 模式的光束转换成倾斜角不同的截断平面波,然后通过透镜将其聚焦到探测平面上不同的位置,从而实现 OAM 光束的分离<sup>[6-12]</sup>.但是该方案得到的相邻模式之间的重叠部分达到了 20%,模式之间的串扰较大<sup>[13]</sup>.为减少重叠,需在保持探测平面上相邻模式之间的空间间隔不变的情况下,减少各 OAM 模式对应光斑的主瓣宽度.因此可利用扇出(FAN-OUT)光栅将截断平面波复制之后再通过透镜聚焦实现高分辨率的 OAM 态分离<sup>[13-14]</sup>.

FAN-OUT 光栅的优化设计主要包含能量效率与均匀性两个优化步骤.1992 年,HERZIG H P 等提出虚源法设计纯相位型 FAN-OUT 光栅,第一步固定虚拟光源的幅度,通过调整虚拟光源的相位来优化能量效率;第二步保持虚拟光源的相位,通过调整虚拟光源的幅度来优化复制后各级光斑能量的均匀性.纯相位型 FAN-OUT 光栅的传输函数可由优化后虚拟光源的相位和幅度求得<sup>[15]</sup>.2007 年,DICKEY F M 等利用变分法实现纯相位型 FAN-OUT 光栅的优化设计,该方法通过两个优化步骤,分别对能量效率与均匀性进行优化.设计一个复制  $N$  次的纯相位型 FAN-OUT 光栅,需要求解具有  $2N-3$  个优化变量的约束优化问题以及具有  $N-2$  个优化变量的无约束优化问题,优化问题的构造与求解非常复杂<sup>[16]</sup>.

本文分析了高分辨率 OAM 分离系统的工作原理,提出一种基于迭代算法的纯相位型扇出光栅设计方法<sup>[17]</sup>,该方法只需一个优化步骤,设计得到的器件具有较理想的能量效率和均匀性.通过数值仿真,分别对单模式的 OAM 光束以及多模式 OAM 叠加光束进行了分离,并对比分析了加入所设计光栅前后系统接收到的螺旋谱的弥散程度以及接收光束的错误概率.

## 1 高分辨率 OAM 模式分离系统

实现基于坐标变换的高分辨率 OAM 分离的光学系统如图 1 所示,该系统由基于坐标变换的 OAM 分离系统 A 与 FAN-OUT 系统 B 组成.



$R_1$ : coordinate transformation filter;  $R_2$ : phase correction filter;  $R_3$ : FAN-OUT grating;  $R_4$ : phase correction filter; L: lens

图 1 高分辨率的 OAM 分离系统结构图

Fig.1 Structure diagram of high-resolution optical orbital angular momentum sorter

图 1 中基于坐标变换的 OAM 分离系统 A 由单透镜双滤波系统与透镜  $L_2$  组成<sup>[18-19]</sup>.输入的环形 OAM 光束经过平面  $(x_1, y_1)$  上的坐标变换滤波器  $R_1$ ,再由透镜  $L_1$  的傅里叶变换作用,在  $L_1$  后焦平面  $(x_2, y_2)$  上得到矩形光斑.为了消除由光程差带来的相位失真,接着将该矩形光斑通过相位矫正滤波器  $R_2$  得到倾斜的截断平面波,最后透镜  $L_2$  将该截断平面波聚焦到后焦平面  $(x_3, y_3)$  上,完成 OAM 模式光斑在空间上的分离.B 为 FAN-OUT 系统,系统 A 输出的光束  $u(x_3, y_3)$  通过 FAN-OUT 光栅  $R_3$  之后,再由透镜  $L_3$  的傅里叶变换在其后焦平面  $(x_4, y_4)$  上得到复制  $N$  次的截断平面波  $f(x_4, y_4)$ .由于复制  $N$  次后的各个截断平面波之间会产生相对相位差,所以需要利用滤波器  $R_4$  对其进行相位矫正,得到  $g(x_4, y_4)$ ,最后利用透镜  $L_4$  将矫正后的光束聚焦到后焦平面  $(x_5, y_5)$ ,完成高分辨率 OAM 光束的分离.

理论推导分析高分辨率 OAM 光束的分离系统的工作原理,在系统 A 中,单透镜双滤波系统实现的极坐标变换关系为: $x_2 = a \arctan(y_1/x_1)$ ,  $y_2 = -a \ln(\sqrt{x_1^2 + y_1^2}/b)$ .坐标变换滤波器  $R_1$  与相位矫正滤波器  $R_2$  的相位函数分别如式(1)与式(2)所示.

$$\varphi_1(x_1, y_1) = 2\pi a / (\lambda f_L) [y_1 \arctan(y_1/x_1) - x_1 \ln(\sqrt{x_1^2 + y_1^2}/b) + x_1] \quad (1)$$

$$\varphi_2(x_2, y_2) = -2\pi ab / (\lambda f_L) \exp(-x_2/a) \cos(y_2/a) \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为波长,  $f_L$  为透镜的焦距,参数  $a, b$  为坐标变换的扩展因子,共同控制矩形光斑在  $x_2$  方向的位置,参数  $a$  控制矩形光斑的大小.

根据参考文献[13],透镜  $L_2$  后焦平面上的光场为  $2\pi a \text{sinc}[(x_3 + \Delta \cdot l)/\Delta]$ ,因此在透镜  $L_2$  的后焦平面上,拓扑荷为  $l$  的 OAM 光束对应光斑的主瓣最大值位置为  $x_3 = -\Delta \cdot l$ ,主瓣宽度为  $2\Delta$ ,相邻模式对应的光斑主瓣最大值之间的间隔为  $\Delta$ ,其中  $\Delta = (\lambda f_L)/(2\pi a)$ ,  $f_L$  为透镜的焦距.

在 FAN-OUT 系统 B 中,为了实现截断平面波在  $x_4$  方向上的  $N$  次复制,理想 FAN-OUT 光栅  $R_3$  的传输函数可设置为

$$h(x_3, y_3) = \sum_{n=1}^N a_{l_n} \exp(i2\pi l_n x_3/d) \quad (3)$$

式中,  $\{l_1, l_2, \dots, l_N\}$  为复制后所需光斑的衍射级数,  $a_{l_n}$  为对应级数光斑的加权复系数,  $d$  为  $h(x_3, y_3)$  在  $x_3$  方向的周期.

由傅里叶变换的卷积性质可得,透镜  $L_3$  的后焦平面上得到的复制  $N$  次的截断平面波的光场为

$$f(x_4, y_4) = \sum_{n=1}^N a_{l_n} U[(2\pi x_4/(\lambda f_L) - 2\pi l_n/d, 2\pi y_4/(\lambda f_L))] \quad (4)$$

式中,  $U(x_4, y_4) = \mathcal{F}\{u(x_3, y_3)\}$ ,  $\mathcal{F}\{\}$  表示透镜的傅里叶变换.由式(4)可知复制之后第  $l_n$  级截断平面波中心位于透镜  $L_3$  后焦平面上坐标为  $(l_n \lambda f_L/d, 0)$  的点上,复制之后第  $l_n$  级截断平面波附加的相位为  $\arg\{a_{l_n}\}$ ,因此复制  $N$  次后的各个截断平面波之间会产生相对相位差,为消除该相位差,需要利用相位矫正滤波器  $R_4$  对其进行相位矫正.

根据参考文献[13],透镜  $L_4$  后焦平面上的光场为  $2\pi a / \sqrt{N} \text{sinc}[(x_5 + \Delta \cdot l)/(\Delta/N)]$ ,因此在透镜  $L_4$  的后焦平面上,拓扑荷为  $l$  的 OAM 光束对应的光斑的主瓣最大值位置为  $x_5 = -\Delta \cdot l$ ,主瓣宽度为  $2\Delta/N$ ,相邻模式对应的光斑主瓣最大值之间的间隔为  $\Delta$ .因此,加入纯相位型 FAN-OUT 光栅之后各 OAM 模对应光斑主瓣的宽度为加入之前的  $1/N$ ,并且相邻模式之间的空间间隔不变,加入 FAN-OUT 系统可提高 OAM 模式分离的分辨率.

## 2 纯相位型 FAN-OUT 光栅设计方法

实际应用中往往使用纯相位型光学元件来实现空间滤波.显然,当复制次数  $N$  为大于 1 的整数时,式(3)为复数函数,因此无法将其直接加载到纯相位型器件实现光束的复制.但是可以找到一个周期为  $d$  的纯相位型光栅对式(3)所示传输函数进行近似,得到的传输函数为

$$h_1(x_3, y_3) = \exp[i\psi(x_3, y_3)] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m \exp(i2\pi m x_3/d) \quad (5)$$

式中傅里叶级数的复系数为

$$c_m = \frac{1}{d} \int_d \exp[i\psi(x_3, y_3)] \exp(-i2\pi m x_3/d) dx_3 \quad (6)$$

在设计过程中将纯相位型光栅的相位函数  $\psi(x_3, y_3)$  表示为

$$\psi(x_3, y_3) = \text{Re}\{-i \ln[\sum_{n=1}^N b_{l_n} \exp(i2\pi l_n x_3/d)]\} \quad (7)$$

式中,  $b_{l_n}$  为优化变量.纯相位型 FAN-OUT 光栅的作用是将入射光的能量尽可能按比例分配到所需的各衍射级上,即  $h_1(x_3, y_3)$  中  $\{|c_{l_1}|^2, |c_{l_2}|^2, \dots, |c_{l_N}|^2\}$  与(3)所示传输函数的  $\{|a_{l_1}|^2, |a_{l_2}|^2, \dots, |a_{l_N}|^2\}$  之间的差异应该尽可能小,则其均匀性尽可能高,  $\{l_1, l_2, \dots, l_N\}$  为所需的各衍射级数.本文用式(8)所示的相对均方根误差 R-RMSE 来表示这一差异. R-RMSE 值越小,均匀性越高,能量效率越高.

$$\text{R-RMSE} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (|c_{l_n}|^2 - |a_{l_n}|^2)^2 / (N \sum_{n=1}^N |c_{l_n}|^2)} \quad (8)$$

将 R-RMSE 作为评价函数,迭代算法的步骤为<sup>[17]</sup>:

第一步:迭代计数器  $k=1$ ,迭代总次数为  $K$ ,  $b_{l_n}$  的初始值为  $b_{l_n}^1 = |a_{l_n}|$ ,  $n=1, \dots, N$ , 设置迭代过程中用于调整  $b_{l_n}$  幅度的比例因子  $\beta$ , R-RMSE0 用于保存最佳的相对均方根误差,初值设置为 1;

第二步:开始第  $k$  次迭代,用  $b_{l_n}^k$  作为  $b_{l_n}$  代入式(7)求得相位函数  $\psi(x_3, y_3)$ . 根据式(6)计算  $c_{l_n}^k$ , 根据式(8)计算 R-RMSE;

第三步:如果  $\text{R-RMSE} < \text{R-RMSE0}$ , 保存  $\psi(x_3, y_3)$ , 令  $\text{R-RMSE0} = \text{R-RMSE}$ ;

第四步:如果  $k > K$ , 迭代结束. 否则  $|b_{l_n}^{k+1}| = |b_{l_n}^k| + \beta(|a_{l_n}| - |c_{l_n}^k|)$ ,  $b_{l_n}^{k+1} = |b_{l_n}^{k+1}| / |c_{l_n}^k| \cdot c_{l_n}^k$ ,  $k = k + 1$ , 执行步骤二.

在上述迭代过程中,  $|b_{l_n}^{k+1}| = |b_{l_n}^k| + \beta(|a_{l_n}| - |c_{l_n}^k|)$  表示第  $k+1$  次迭代中  $b_{l_n}^{k+1}$  的幅度等于第  $k$  次迭代中  $b_{l_n}^k$  的幅度加上  $a_{l_n}$  与  $c_{l_n}^k$  的幅度之差成比例的增量, 该比例为比例因子  $\beta$ ;  $b_{l_n}^{k+1} = |b_{l_n}^{k+1}| / |c_{l_n}^k| \cdot c_{l_n}^k$  表示第  $k+1$  次迭代的  $b_{l_n}^{k+1}$  的相位等于第  $k$  次迭代中  $c_{l_n}^k$  的相位<sup>[17]</sup>. 通过这种方式, 同时调整  $b_{l_n}$  的幅度和相位, 使得评价函数 R-RMSE 尽可能小, 获得较高的均匀性与能量效率. 相对于 HERZIG H P 等以及 DICKEY F M 等的设计方法, 本文提出的设计方法无需建立并求解一系列复杂的优化问题, 并减少了优化变量的数目. 这在一定程度上降低了纯相位型 FAN-OUT 光栅设计的复杂度.

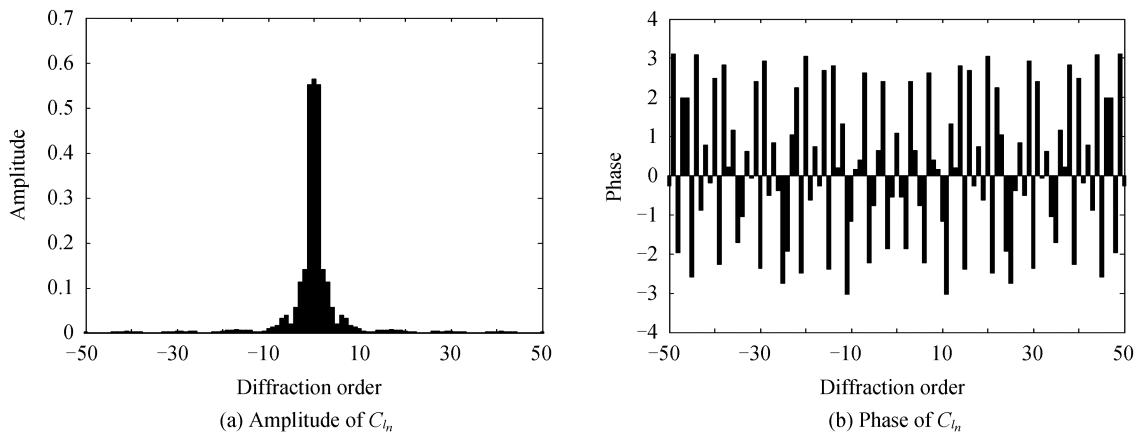
利用本文的设计方法得到的纯相位型 FAN-OUT 光栅  $R_3$  的传输函数为  $h_1(x_3, y_3) = \exp[i\psi(x_3, y_3)]$ .  $h_1(x_3, y_3)$  为式(3)的近似. 根据式(6)分解  $h_1(x_3, y_3) = \exp[i\psi(x_3, y_3)]$  得到  $c_{l_n}$ , 将  $c_{l_n}$  作为  $a_{l_n}$  代入式(3), 由式(4)分析得到复制之后第  $l_n$  级截断平面波附加的相位为  $\arg\{c_{l_n}\}$ . 因此消除该附加相位, 可利用  $-\arg\{c_{l_n}\}$  对第  $l_n$  级光斑进行相位矫正.

### 3 仿真与分析

#### 3.1 滤波器 $R_3, R_4$ 的仿真设计

仿真中将载有 OAM 模的拉盖尔-高斯(Laguerre-Gauss, LG)<sup>[20]</sup> 光束作为图 1 所示系统的输入, 光束波长为  $\lambda = 0.633 \times 10^{-6}$  m, 束腰半径为  $10^{-4}$  m, 光束平面尺寸为  $10^{-3}$  m, 像素为  $1001 \times 1001$ , 截断平面波的宽度为  $D = 67.5 \times 10^{-3}$  m, 扩展因子  $a, b$  分别为  $a = D/2\pi, b = 0.01$ , 透镜  $L_1, L_2, L_3, L_4$  的焦距为  $f_L = 0.32$  m.

以设计  $N=3$ , 周期  $d=4.8\lambda$  的纯相位型 FAN-OUT 光栅为例, 为了使输入光束能量集中到级数  $\{l_1, l_2, l_3\}$  为  $\{-1, 0, 1\}$  的光斑上, 令  $\sum_{n=1}^N |a_{l_n}|^2 = 1, \{a_{-1}, a_0, a_1\} = \{1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}\}$ , 迭代次数为  $K=500$ , 比例因子  $\beta=0.008$ , 设计得到的 R-RMSE 为 0.004 4, 光栅的能量效率为 92.04%. 其中  $c_{l_n}$  振幅以及相位分别如图 2(a)、(b)所示. 图 2(b)中复制后得到的 3 个截断平面波的附加相位为  $\arg\{c_{-1}, c_0, c_1\} = \{-0.5318, 1.0738, -0.5318\}$ . 设计得到  $R_3, R_4$  的相位结构分别如图 2(c)、(d)所示.



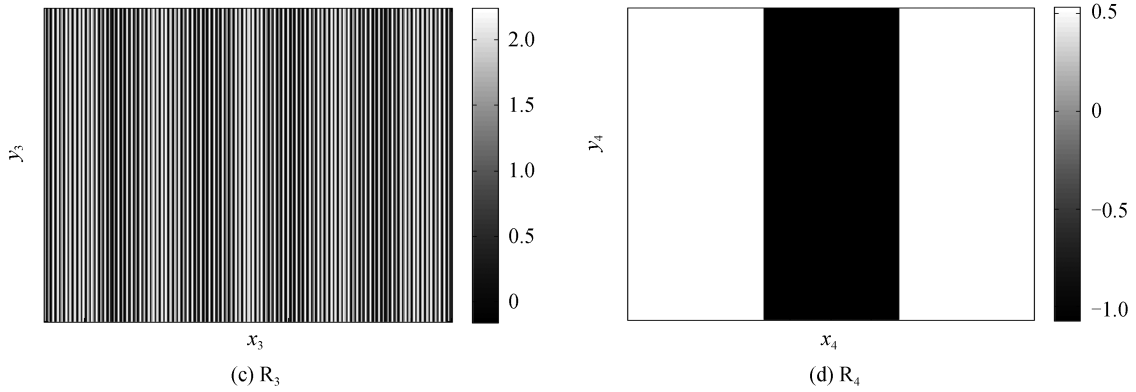


图2  $c_{tm}$  以及  $R_3$ 、 $R_4$  相位结构设计结果  
Fig.2 Design results of  $c_{tm}$  and phase structures of  $R_3$  and  $R_4$

### 3.2 单模式 LG-OAM 光束分离仿真结果与分析

图3是分别对  $l = -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5$  的 LG-OAM 光束分离得到的光斑.第一行与第二行分别为系统加入纯相位型 FAN-OUT 光栅前后得到的分离结果.从图3可以看到,分离得到的光斑的纵向位置随着拓扑荷的增加而下移.而且,加入纯相位型 FAN-OUT 光栅之后分离得到的光斑更细.

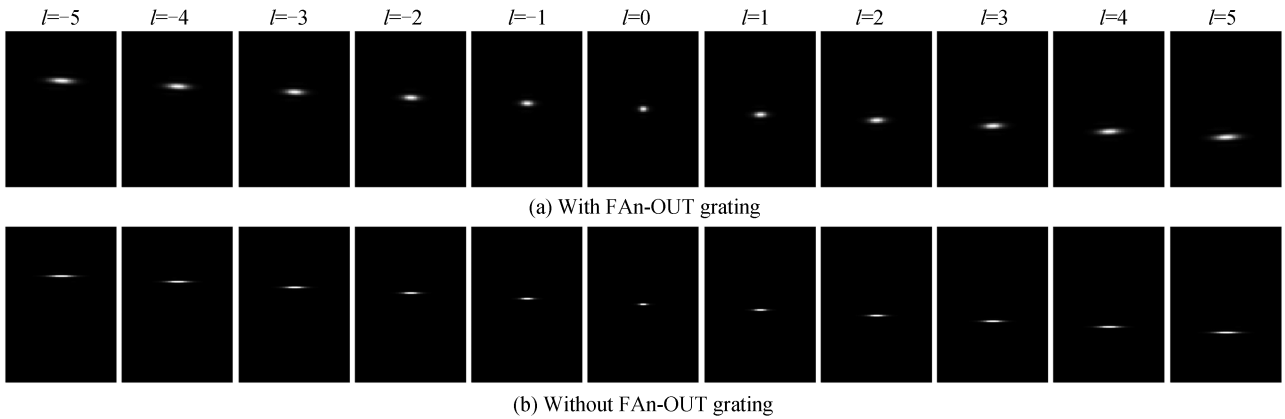


图3 分别对  $l = -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5$  的 LG-OAM 光束分离得到的光斑

Fig.3 Simulation sorting results for LG-OAM beams of  $l = -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5$  respectively

图3所示为探测平面上不同矩形区域的光斑,对应不同的 OAM 模式,可据此探测各 OAM 模式的能量  $I_l$ .将拓扑荷为  $l$  的 OAM 光束的探测概率表示为  $P_l = I_l / \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n$ .为评估系统分离 OAM 光束的性能,本文用错误概率(螺旋谱中串扰态对应的探测概率之和)以及螺旋谱弥散程度来评估系统分离 OAM 光束的性能.螺旋谱的弥散程度是表征螺旋谱的能量向发射态两边扩散程度的无量纲方差,可以表示为

$$V = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} P_l (l - \bar{l})^2 = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} P_l l^2 - \left( \sum_{l=-\infty}^{+\infty} P_l l \right)^2 \quad (9)$$

式中,螺旋谱的拓扑荷平均值为  $\bar{l} = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} P_l l$ .当螺旋谱不发生弥散时,  $V=0$ ,弥散程度越大,  $V$  越大<sup>[21]</sup>.本文数值计算时式(9)拓扑荷的取值范围为  $[-15, 15]$ .图4给出了加入 FAN-OUT 光栅前后的弥散程度与错误概率图.

由图4可知,螺旋谱的弥散程度与错误概率变化趋势基本一致,加入 FAN-OUT 光栅得到的错误概率降低 15% 以上,螺旋谱的弥散程度最少下降 0.35.本设计中 FAN-OUT 光栅的复制次数为 3,得到的错误概率平均值稍大于 5%.



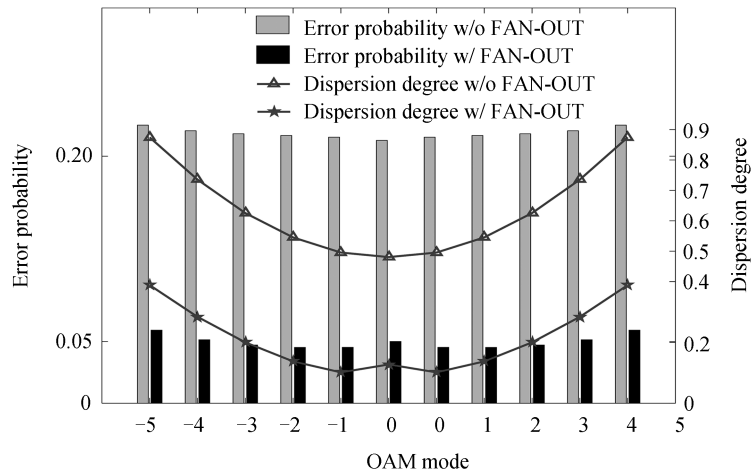


图4 两种分离系统的弥散程度与错误概率

Fig.4 Error probability and dispersion degree of two OAM sorting systems

### 3.3 多模式 LG-OAM 光束分离仿真结果与分析

图5为加入纯相位型 FAN-OUT 光栅前后对不同的 LG 复用光束分离得到的光斑,其中,左右分别是加入纯相位型 FAN-OUT 光栅前后分离得到的光斑.从图5可得加入纯相位型 FAN-OUT 光栅之后,探测平面上相邻模式之间的空间间隔不变,各 OAM 模对应光斑主瓣的宽度减少,光斑之间重叠部分减少,模间串扰减少,更有利于对复用光束进行高分辨率分离.

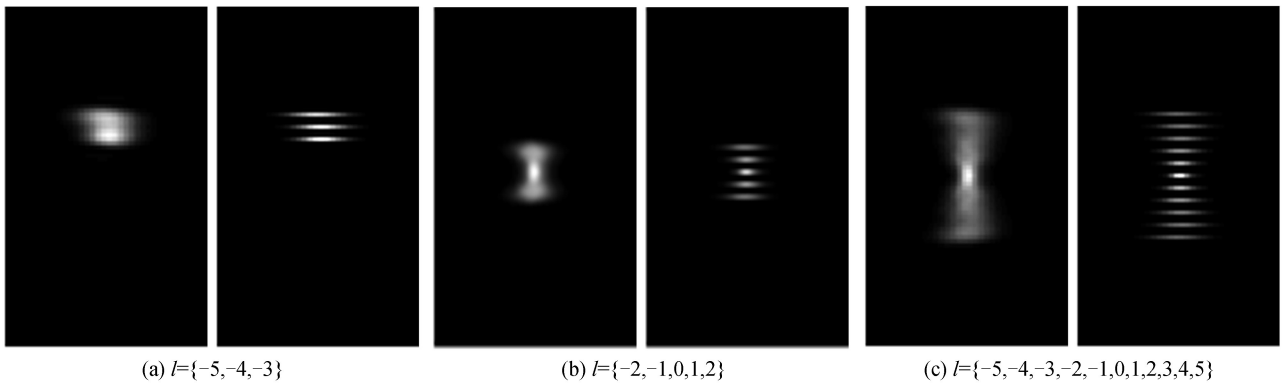


图5 加入纯相位型 FAN-OUT 光栅前后 LG-OAM 复用光束分离得到的光斑

Fig.5 Simulation sorting results for the system with FAN-OUT grating and without FAN-OUT grating

## 4 结论

本文利用基于迭代算法的设计方法得到纯相位型 FAN-OUT 光栅,并将其应用于基于坐标变换的 OAM 分离系统.通过数值仿真,分别对  $l = -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5$  的 LG 光束以及多模式的 LG 复用光束进行分离.仿真结果表明,加入纯相位型 FAN-OUT 光栅之后,探测平面上相邻模式之间的空间间隔不变,各 OAM 模对应光斑主瓣的宽度减少,接收光束的 OAM 螺旋谱弥散程度以及错误概率显著下降,有利于实现高分辨率的 OAM 分离.

### 参考文献

- [1] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A Atomic Molecular & Optical Physics*, 1992, **45**(11): 8185.
- [2] YAO A M, PADGETT M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics & Photonics*, 2011, **3**(2): 161-204.
- [3] WILLNER A E, MOLISCH A F, BAO C, *et al.* Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Advances in Optics & Photonics*, 2015, **7**(1): 66-106.
- [4] KHONINA S N, KOTLYAR V V, SKIDANOV R V, *et al.* Gauss-Laguerre modes with different indices in prescribed

- diffraction orders of a diffractive phase element[J]. *Optics Communications*, 2000, **175**(4): 301-308.
- [5] LEACH J, PADGETT M J, BARNETT S M, *et al.* Measuring the orbital angular momentum of a single photon[J]. *Physical Review Letters*, 2002, **88**(1): 257901.
- [6] BERKHOUT G C, LAVERY M P, COURTIAL J, *et al.* Efficient sorting of orbital angular momentum states of light [J]. *Physical Review Letters*, 2010, **105**(15): 153601.
- [7] LAVERY M P J, BERKHOUT G C G, COURTIAL J, *et al.* Measurement of the light orbital angular momentum spectrum using an optical geometric transformation[J]. *Journal of Optics*, 2011, **13**(13): 064006.
- [8] LAVERY M P, ROBERTSON D J, BERKHOUT G C, *et al.* Refractive elements for the measurement of the orbital angular momentum of a single photon.[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(3): 2110-2115.
- [9] LAVERY M P J, ROBERTSON D J, SPONSELLI A, *et al.* Efficient measurement of an optical orbital-angular-momentum spectrum comprising more than 50 states[J]. *New Journal of Physics*, 2013, **15**(3): 013024.
- [10] SHUAI S, DONGSHENG D, ZHIYUAN Z, *et al.* Sorting of orbital angular momentum states of light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **36**(6) :0607001.  
施帅, 丁冬生, 周志远, 等. 轨道角动量光的区分[J]. 光学学报, 2015, **36**(6):0607110.
- [11] LIU C, WEI X, NIU L, *et al.* Discrimination of orbital angular momentum modes of the terahertz vortex beam using a diffractive mode transformer[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(12): 12534-12541.
- [12] LI C, ZHAO S. Efficient separating orbital angular momentum mode with radial varying phase[J]. *Photonics Research*, 2017, **5**(4):267.
- [13] OSULLIVAN M N, MIRHOSSEINI M, MALIK M, *et al.* Near-perfect sorting of orbital angular momentum and angular position states of light.[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(22): 24444-24449.
- [14] MALIK M, MIRHOSSEINI M, SHI Z, *et al.* Efficient separation of the orbital angular momentum eigenstates of light [J]. *Nature Communications*, 2013, **4**(7): 2781.
- [15] PRONGUÉ D, HERZIG H P, GALE M T, *et al.* Optimized kinoform structures for highly efficient fan-out elements [J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(26): 5706-5711.
- [16] DICKEY F M, ROMERO L A. Theory of optimal beam splitting by phase gratings. I. One-dimensional gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2007, **24**(8): 2280.
- [17] LIN J, YUAN X, TAO S H,*et al.* Synthesis of multiple collinear helical modes generated by a phase-only element[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2006, **23**(5): 1214-1218.
- [18] HOSSACK W J, DARLING A M, DAHDOUH A. Coordinate transformations with multiple computer-generated optical elements[J]. *Journal of Modern Optics*, 1987, **34**(9): 1235-1250.
- [19] BRYNGDAHL O. Geometrical transformations in optics[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1974, **64**(8): 1092-1099.
- [20] LEMBESSIS V E. A mobile atom in a Laguerre-Gaussian laser beam[J]. *Optics Communications*, 1999, **159**(4-6): 243-247.
- [21] ZAMBRINI R, BARNETT S M. Quasi-intrinsic angular momentum and the measurement of its spectrum[J]. *Physical Review Letters*, 2006, **96**(11): 113901.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61575027), BUPT Excellent Ph.D. Students Foundation (Nos. CX2018212, CX2018213)

引用格式: YIN Xiao-li, LIAO Huan-yu, WANG Yong-jun, *et al.* Design for the Phase-only FAN-OUT Grating of Orbital Angular Momentum Separation System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0905002

尹霄丽, 廖焕宇, 王拥军, 等. 轨道角动量分离系统中纯相位型扇出光栅的设计[J]. 光子学报, 2018, **47**(9): 0905002