

# 基于涡旋光源和相位优化的中继镜系统上行链路光束传输缩比实验研究

吴慧云<sup>1</sup> 马浩统<sup>1</sup> 赵海川<sup>1</sup> 许晓军<sup>1</sup> 陈金宝<sup>1\*</sup> 赵伊君<sup>1</sup> 熊程平<sup>2</sup> 陈俊<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073  
<sup>2</sup>92016 部队, 广东广州 510380; <sup>3</sup>75818 部队, 广东广州 510380)

**摘要** 激光中继镜技术是一项备受各方瞩目的新型系统作战概念。光束在上行链路传输过程中,接收望远镜的截断和次镜的阻挡导致了严重的能量损耗,降低了中继镜系统的性能。涡旋光源和相位优化是提升激光中继镜系统上行链路能量效率的有效方法之一。以光源口径为 1.2 m,上行传输距离为 30 km,上行接收望远镜外径为 1.2 m,内径为 0.24 m 的中继镜系统为原型,搭建了相同菲涅耳数的中继镜系统光束上行传输缩比实验装置,通过液晶空间光调制器反射调制 Nd:YVO<sub>4</sub>光源的方法产生涡旋光源,并由随机并行梯度下降算法优化涡旋光源相位分布,开展了中继镜系统上行链路光束传输缩比实验研究。实验结果表明,通过采用涡旋光源和相位优化,中继镜系统上行链路能量效率得到了显著提高,由 71.89% 提升至 91.59%。

**关键词** 激光光学; 中继镜系统; 上行传输; 涡旋光束; 相位优化; 能量效率

**中图分类号** O43; TJ95 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s102014

## Reduced-Scale Experimental Study on Beam Uplink Propagation in a Relay Mirror System with Vortex Source and Phase Optimization

Wu Huiyun<sup>1</sup> Ma Haotong<sup>1</sup> Zhao Haichuan<sup>1</sup> Xu Xiaojun<sup>1</sup>  
Chen Jinbao<sup>1</sup> Zhao Yijun<sup>1</sup> Xiong Chengping<sup>2</sup> Chen Jun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

<sup>2</sup> 92016 Department of Chinese People's Liberation Army, Guangzhou, Guangdong 510380, China

<sup>3</sup> 75818 Department of Chinese People's Liberation Army, Guangzhou, Guangdong 510380, China

**Abstract** The relay mirror technology is an important system combat concept under extensive research. Beam blocked and truncated by the receiving Cassegrain telescope causes serious power losses in beam uplink propagation in the relay mirror system, which degrades performance of the relay mirror system. Using vortex beam source and phase optimization is an effective way to improve power efficiency of beam uplink propagation in the relay mirror system. A reduced-scale experimental installation is established with the same Fresnel number as beam uplink propagation process in the relay mirror system with the following parameters as "1.2 m source aperture, 30 km uplink propagation distance, receiving telescope with 1.2 m outer aperture and 0.24 m inner aperture". Vortex source is generated by using the Nd:YVO<sub>4</sub> laser and a liquid crystal spatial light modulator with spiral phase distribution, and phase distribution of the vortex source is optimized by using the stochastic parallel gradient descent algorithm. Reduced-scale experimental study on beam uplink propagation in a relay mirror system with vortex source and phase optimization is performed. Results show that power efficiency of beam uplink propagation in the relay

收稿日期: 2011-08-20; 收到修改稿日期: 2011-10-09

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(CX2011B031)和国防科学技术大学优秀研究生创新项目(B110701)资助课题。

作者简介: 吴慧云(1984—),男,博士研究生,主要从事高能激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: huiyun-wu@163.com

导师简介: 赵伊君(1930—),男,中国工程院院士,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: zhaoyi7@sina.com

\* 通信联系人。E-mail: kdchenjinbao@yahoo.com.cn

mirror system is improved from 71.89% to 91.59% by using vortex source and phase optimization.

**Key words** laser optics; relay mirror system; uplink propagation; vortex beam; phase optimization; power efficiency

**OCIS codes** 140.3300; 140.3325; 010.1300; 220.4830

# 1 引 言

激光中继镜技术是近年来备受各方瞩目的一项新型结构的高能激光系统技术,也是一项新型激光系统作战概念<sup>[1~8]</sup>。中继镜技术概念的主要思想是将激光系统的光源与光束控制部分分离,通过置于高空(太空)的中继镜系统接收激光源向其发射激光束,经系统校正净化后重定向发射到目标上,完成对目标的打击<sup>[1,2]</sup>。中继镜系统被认为具有能降低大气等因素对激光的影响、拓宽激光系统的作战范围、降低系统跟踪带宽、增长系统积分时间等优势,是机载激光和地基激光的威力倍增器,并被冠名为“革命性航空和航天全球激光交战系统”<sup>[1,2]</sup>。目前,美国军方已把中继镜技术作为军队的转型技术,它的发展必将影响到未来一代的高能激光系统<sup>[3]</sup>。

2005年,美国空军研究实验室完成了1/2比例大小的战略中继镜的实验室集成与测试工作,系统采用双焦结构模式设计,两台望远镜口径均为75 cm<sup>[4,5]</sup>。2006年,美国空军研究实验室与波音公司<sup>[6]</sup>在科特兰空军基地研究实验室进行中继镜系统外场演示试验,检验系统有效载荷跟踪战术目标的能力,试验成功地将5 km外一束地面亚千瓦级的激光重定向射向3 km外的地基靶板上。试验同时也暴露出中继镜系统能量效率低的问题,用于试验的系统样机能量效率仅为50%<sup>[7]</sup>,严重影响了系统性能。

近年来,如何提高中继镜系统上行链路能量效率得到国内外学者的广泛研究,Justin Mansell<sup>[8]</sup>提出了光束整形方法,周朴等<sup>[9]</sup>提出通过相干光束阵列合成传输方法提高中继镜系统能量效率。本文提出利用涡旋光源和相位优化提升中继镜系统上行链路能量效率的方法,并搭建了中继镜系统光束上行传输缩比实验装置,通过实验分析该方法对中继镜系统上行链路能量效率的提升效果。

## 2 模型建立与理论分析

### 2.1 中继镜系统模型

如图1所示,中继镜系统由高功率激光源、发射与接收模块、高空平台、光束净化系统和必要的地面和通信线路等部分组成。如图2所示,上行链路部分含有合作信标和两套自适应装置,合作信标用于实时

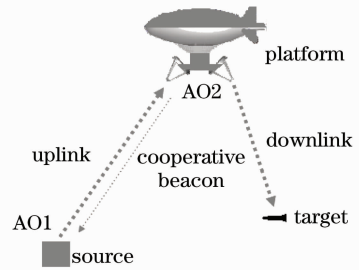


图1 中继镜系统模型图

Fig. 1 Model of a relay mirror system

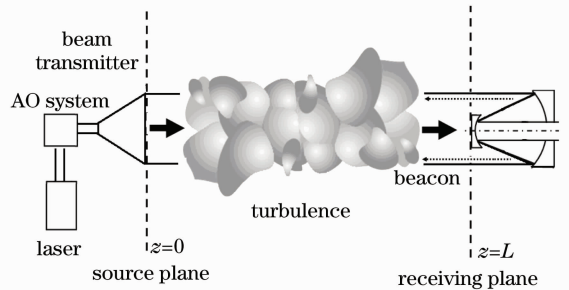


图2 中继镜系统上行链路光束传输示意图

Fig. 2 Schematic diagram of beam uplink propagation in a relay mirror system

探测上行链路大气扰动,两套自适应装置中一套位于光源处,用于光束的上行湍流预校正;另一套位于平台上,用于接收光束的相位后校正与净化。“闭环”工作时,光束上行传输过程的大气影响可以得到有效校正<sup>[10]</sup>,忽略透射率的影响,上行传输过程可以近似为真空传输,上行接收光场分布可表示为

$$U_1(x, y, z) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} U_0(\epsilon, \eta) \times \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x - \epsilon)^2 + (y - \eta)^2]\right\} d\epsilon d\eta, \quad (1)$$

式中  $U_0(\epsilon, \eta)$  为光源场分布,  $(\epsilon, \eta)$  为光源发射面的二维坐标,  $k$  为波数,  $z$  为传输距离。中继镜系统上行链路能量效率可表示为

$$T = \frac{\int I_1(x, y, z) t(D_0, D_1) ds}{P_0}, \quad (2)$$

式中

$$I_1(x, y, z) = U_1(x, y, z)U_1^*(x, y, z), \quad (3)$$

$$t(D_0, D_1) = \begin{cases} 1 & \frac{D_0}{2} \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{D_1}{2} \\ 0 & \text{else} \end{cases}, \quad (4)$$

$I_1(x, y, z)$  为接收光场强度分布,  $*$  为复共轭运算符号,  $t(D_0, D_1)$  表示接收望远镜的截断函数,  $D_0$ 、 $D_1$  分别为接收望远镜的内外口径大小,  $P_0$  为光源功率。相关研究结果表明<sup>[5,8-10]</sup>: 中继镜系统上行链路的能量损耗主要是由两方面造成的, 分别是接收望远镜对光束的截断和接收望远镜次镜对光束中心部分的阻挡。

## 2.2 涡旋光束的传输特性

如图 3 所示, 涡旋光束是指具有连续涡旋状相位分布的光束, 光束的波阵面既不是平面, 也不是球面, 而是像漩涡状, 具有奇异性<sup>[11,12]</sup>。涡旋光束可以通过涡旋相位板、全息光栅、低阶高斯模和模式转换器等方法产生<sup>[13-16]</sup>。具有拉盖尔-高斯强度分布的涡旋光束光场可表示为

$$U_0(r, \theta) \Big|_{z=0} = E(r, \theta, \omega) \exp[j\varphi(\theta)], \quad (5)$$

式中

$$\varphi(\theta) = n\theta, \quad (6)$$

$\varphi(\theta)$  为光束的相位分布,  $n$  为光束的光学拓扑荷数。 $(r, \theta)$  为二维极坐标,  $E(r, \theta, \omega)$  为拉盖尔-高斯光束的振幅分布,  $\omega$  为拉盖尔-高斯光束的腰斑半径, 涡旋光束具有重要的传输特性: 在传输过程中, 光束中心呈现一个暗核且暗核的形状由光学拓扑荷数决定, 仅当  $n$  为整数时暗核呈圆型分布<sup>[11,12]</sup>; 暗核的大小由光学拓扑荷数、光束口径和光束传输距离等因素共同决定<sup>[11,12,17]</sup>。当光束口径和光束传输距离确定时, 空心暗核大小仅由光束光学拓扑荷数决定, 可通过调整光束光学拓扑荷数改变空心暗核的大小。

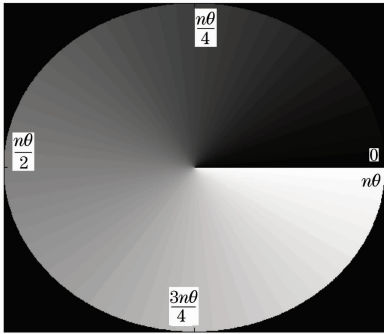


图 3 涡旋光束相位分布图

Fig. 3 Phase distribution of a vortex beam

## 2.3 相位优化

光束传输过程中, 通过调整光场初始相位可以调整光束的强度空间分布, 因而可以通过优化初始相位分布实现特定的光场强度分布形态。在中继镜系统中, 通过优化控制初始光源相位分布可以调整上行接收光场的强度分布, 降低接收望远镜截断和

内径阻挡造成的能量损耗<sup>[10]</sup>。引入相位优化量  $\psi(\epsilon, \eta)$ , 上行接收光场可表示为

$$U_1(x, y, z) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} U_0(\epsilon, \eta) \exp[j\psi(\epsilon, \eta)] \times \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x - \epsilon)^2 + (y - \eta)^2]\right\} d\epsilon d\eta. \quad (7)$$

以上行链路能量效率为优化评价目标函数, 通过随机并行梯度下降算法可计算得出相位的最优分布, 主要流程如下<sup>[9,10]</sup>:

- 1) 定义光束采样点数  $M$  和优化循环总步数  $m$ , 设定  $\psi_i = 0, i = 1, 2, \dots, M$ 。
- 2) 生成随机微扰信号  $\Delta\psi_i, i = 1, 2, \dots, M$ ,  $|\Delta\psi_i| \approx 0$  且  $\langle \Delta\psi_i \rangle = 0, \langle \Delta\psi_i \Delta\psi_i \rangle = \sigma^2 \delta_{ii}$ 。
- 3) 计算系统加载微扰信号前后的性能差值  $\Delta T = T^+ - T^-$ , 其中  $T^+ = T(\psi_1 + \Delta\psi_1, \psi_2 + \Delta\psi_2, \dots, \psi_M + \Delta\psi_M)$ ,  $T^- = T(\psi_1 - \Delta\psi_1, \psi_2 - \Delta\psi_2, \dots, \psi_M - \Delta\psi_M)$ 。
- 4) 按照公式  $\psi_i^{t+1} = \psi_i^t + \gamma \Delta\psi_i^t \Delta\eta$  更新  $\psi_i$  取值, 其中  $t$  为循环次数,  $\gamma$  为由系统性能决定的固定常数。
- 5) 重复步骤 2) ~ 4) 计算过程, 直至算法结束。

## 2.4 方法的主要思想

将中继镜系统上行链路光束传输的需求和涡旋光束传输特性、相位优化方法结合, 在中继镜系统上行链路合作信标和自适应装置“闭环”工作条件下, 以合适参数的涡旋光束作为中继镜系统光源, 通过优化光源的相位调整上行接收光场强度分布, 提升中继镜系统上行链路能量效率。该方法主要包括两部分内容:

### 1) 选取合适参数的涡旋光源

涡旋光源的光学拓扑荷数根据光束上行传输距离、光束口径、光源性能、接收望远镜次镜的形状和大小等参数共同确定, 其选取标准就是使得上行接收光场中心暗核形状与大小与接收望远镜次镜的形状和大小达到最大限度匹配, 最大限度降低接收望远镜次镜阻挡作用造成的能量损耗。

### 2) 光源相位优化控制

在合适参数的涡旋光源的基础上, 通过随机并行梯度下降算法进一步优化光源相位分布, 降低接收望远镜以外的能量成分和次镜阻挡区域内的能量成分, 提升中继镜系统上行链路能量效率。

## 3 实验装置

实验搭建了中继镜系统光束上行传输缩比实验

装置,通过实验分析利用涡旋光束和相位优化方法对中继系统上行链路能量效率提升效果。实验装置由 Nd:YVO<sub>4</sub> 高斯光源、扩束装置、液晶空间光调制器(LC-SLM)、CCD 相机等部分组成,如图 4 所示。Nd:YVO<sub>4</sub> 高斯光源波长为 1.064 μm,光束口径为 6 mm,强度径向分布如图 5 所示;液晶空间光调制器型号为 Modal P512 LC-SLM,尺寸大小为 7.68 mm×7.68 mm,校正单元阵列数为 512×512,响应频率 67 Hz;CCD 相机探测器型号为 AVT Dolphin F-145B,单元阵列数为 1392×1040,单元像素大小为 6.45 μm×6.45 μm。实验装置以光源口径为 1.2 m,上行传输距离为 30 km,上行接收望远镜外径为 1.2 m,内径为 0.24 m 的中继系统为原型,取该系统光束上行传输过程相同菲涅耳数的缩比模型进行实验,实验中光源口径为 6 mm,光束传输距离为 0.75 m,接收望远镜外径为 6 mm,内径为 1.2 mm。

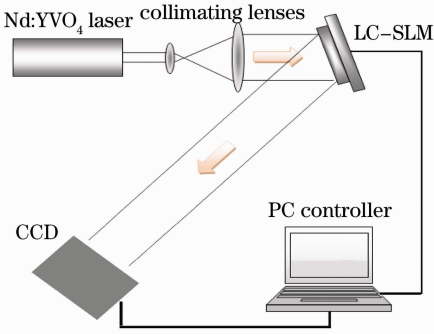


图 4 缩比实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the reduced-scale experimental installation

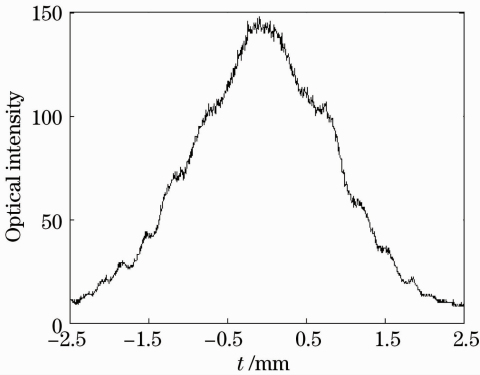


图 5 高斯光源强度径向分布图

Fig. 5 Intensity distribution of the Gaussian source

实验通过具有螺旋相位分布的液晶空间光调制器反射调制 Nd:YVO<sub>4</sub> 高斯光束的方法产生涡旋光束,并通过液晶空间光调制器优化涡旋光束的相位分布,光束准直上行传输后由 CCD 相机探测上行接

收光场的强度分布。液晶空间光调制器的相位分布包含两部分:

$$\varphi(r, \theta) = \phi(r, \theta) + \psi(r, \theta), \quad (8)$$

式中  $\phi(r, \theta)$  为涡旋光束初始相位分布,  $\psi(r, \theta)$  为优化过程引入的光源相位优化分布。

## 4 缩比实验

### 4.1 涡旋光源参数选取

根据实验硬件参数并将(5)、(6)式代入(1)和(2)式计算得出实验中涡旋光束的最优光学拓扑荷数  $n$  为 3,液晶空间光调制器加载的相位分布  $\phi(r, \theta)$  如图 6 所示。

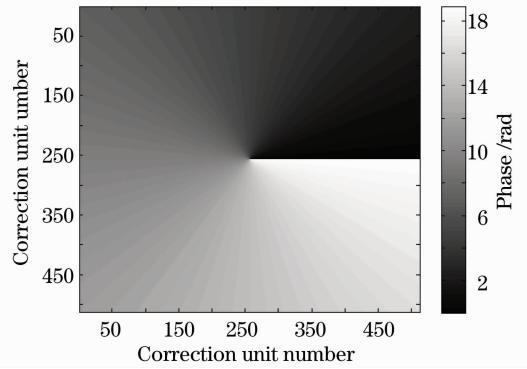


图 6 液晶空间光调制器相位分布图

Fig. 6 Phase distribution of the LC-SLM

### 4.2 涡旋光源相位优化量

取  $M=64$ ,  $\gamma=0.15$ ,  $m=1000$ ,将涡旋光源参数和实验硬件参数代入(7)式,按照随机并行梯度下降算法流程通过计算得出涡旋光源的最佳相位优化量  $\psi(r, \theta)$  如图 7 所示。

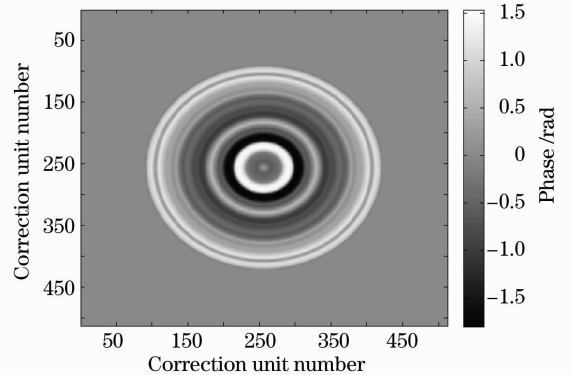


图 7 涡旋光源的最佳相位优化量

Fig. 7 Optimal phase of the vortex source

### 4.3 实验结果

加载液晶空间光调制器相位控制信号  $\varphi(r, \theta)$ ,通过实验得出接收光场强度分布如图 8 所示。对实验结果进行处理得出,接收光场落在口径 1.2~6.0 mm

环形接收区域内的能量比例为91.59%。

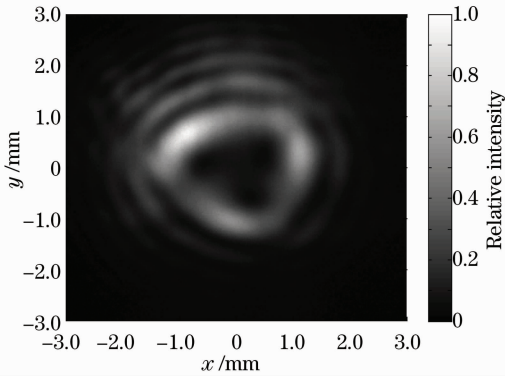


图8 涡旋光源和相位优化条件下的接收光场强度分布  
Fig. 8 Intensity distribution of the received beam with the vortex source and phase optimization

作为比较,探测了相同条件下 Nd:YVO<sub>4</sub> 高斯光源中继镜系统光束上行传输光场强度分布,结果如图9所示。对实验结果进行处理得出,接收光场落在口径 1.2~6.0 mm 环形接收区域内的能量比例为 71.89%。

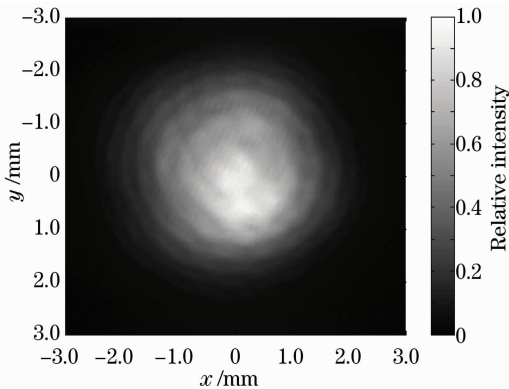


图9 高斯光源条件下的接收光场强度分布  
Fig. 9 Intensity distribution of the received beam with the Gaussian source

## 5 结 论

建立了中继镜系统上行链路光束传输模型,分析了中继镜系统上行链路能量损耗的主要原因,将中继镜系统需求与涡旋光束传输特性、相位优化的作用相结合,提出利用涡旋光源和相位优化提升中继镜上行链路能量效率的方法。以光源口径为 1.2 m,上行传输距离为 30 km,上行接收望远镜外径为 1.2 m,内径为 0.24 m 的中继镜系统为原型,搭建了相同菲涅耳数的中继镜系统光束上行传输过程缩比实验装置,通过实验分析利用涡旋光源和相位优化提升了中继镜系统上行链路能量效率。实验结果表明:通过涡旋光源和相位优化,上行链路能量效率为 91.59%;以高斯

光源上行传输时,上行链路能量效率仅为 71.89%。实验结果证明利用涡旋光源和相位优化能显著提升中继镜系统上行链路能量效率。

## 参 考 文 献

- Edwards A. Duff, Donald C. Washburn. The magic of relay mirrors [C]. *SPIE*, 2004, **5413**: 139~143
- Steven G. Leonard. Laser options for national missile defense: air command and staff college air university[C]. Alabama, 1998: 75~84
- Gregory E. Glaros. Broad departmental application of directed energy systems[C]. Directed Energy Weapon SMI Conference, The Hatton, London, 2004: 7~28
- M. Hartman, S. Restaino, J. Baker *et al.*. EAGLE/Relay mirror technology development [C]. *SPIE*, 2002, **4724**: 110~117
- Chu Xiuxiang. Study on the Propagation and Transform of Laser Beams through a Relay Mirror System[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. 1~36
- 储修祥. 中继镜系统激光传输与变换的理论研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2009. 1~36
- Ren Guoguang. Current situation and development trend of high energy laser weapon [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(9): 67~69
- 任国光. 高能激光武器的现状与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(9): 67~69
- J. Simpson. Tactical laser relay mirror demonstration anticipated before 2011[J]. *Inside the Air Force*, 2007, **18**(41): 3~5
- Justin Mansell. Beam shaping for relay mirrors[C/OL]. www.activeopticalsystems.com/Beam Shaping for Relay Mirrors. pdf : 1~31
- Zhou Pu, Xu Xiaojun, Liu Zejin *et al.*. Improving the power coupling efficiency in relay mirror system using multiple laser array and SPGD algorithm[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2009, **42**(2): 392~396
- Huiyun Wu, Haichuan Zhao, Xiaojun Xu *et al.*. Beam shaping for uplink transmission of the relay mirror system[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(14): 3245~3249
- Wu Huiyun, Huang Zhihe, Wu Wuming *et al.*. Analysis of the Gaussian-vortex beam and its application in a relay mirror system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0414002
- 吴慧云, 黄值河, 吴武明等. 高斯涡旋光束分析及其在中继镜系统中的应用[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0414002
- Li Xuanhui, Huang Huiqin, Zhao Chengliang *et al.*. Optical vortex beams and optical vortices[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 51~55
- 陆曦辉, 黄慧琴, 赵承良等. 涡旋光束和光学涡旋[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(1): 51~55
- Wang Tao, Pu Jixiong. Theoretical and experimental study on vortex beam transmitted through a single-slit [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2902~2907
- 王涛, 蒲继雄. 涡旋光束单缝衍射的理论和实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2902~2907
- Alon Bahabad, Ady Arie. Generation of optical vortex beams by nonlinear wave mixing [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(26): 17619~17624
- Shu-Chun Chu, Takayuki Ohtomo, Kenju Otsuka. Generation of doughnut like vortex beam with tunable orbital angular momentum from lasers with controlled Hermite-Gaussian modes [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(14): 2583~2591
- V. V. G. Krishna Inavalli, Nirmal K. Viswanathan. Switchable vector vortex beam generation using an optical fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(6): 861~864
- Li Yangyue, Liu Hui, Pu Jixiong. Analysis of diffraction characteristics of vortex beam through the circular aperture [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2010, **27**(4): 393~395
- 李阳月, 刘辉, 蒲继雄. 涡旋光束经过环形孔径的衍射特性研究[J]. *量子电子学报*, 2010, **27**(4): 393~395

栏目编辑: 胡冰