

高斯涡旋光束分析及其在中继镜系统中的应用

吴慧云 黄值河 吴武明 许晓军 陈金宝 赵伊君

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 提出了一种以高斯涡旋光束作为光源,实现中继镜系统上行链路能量损耗有效降低的新方法。计算了以高斯光束为光源的30 km高度中继镜系统上行链路能量损耗情况,结果是,系统上行链路的能量耦合效率为76.48%,接收望远镜次镜阻挡作用造成了主要能量损耗,阻挡损耗的能量占总能量的22.85%。分析了涡旋光束中心暗核大小及形态与光束参数的关系,结果是,暗核的形状由光束相位涡旋量决定,仅当光束相位涡旋量为 2π 整数倍时,暗核为圆形;暗核的口径大小分别随着光束相位涡旋量的增加和光束传输距离的增加而增加。计算了以高斯涡旋光束作为光源的30 km高度中继镜系统上行链路能量损耗情况,结果是,以高斯涡旋光束作为光源时,系统的能量耦合效率可达到97.25%,有效地降低了系统上行链路的能量损耗。

关键词 激光技术;涡旋光束;中继镜系统;能量耦合效率;上行传输

中图分类号 O43; TJ95 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0414002

Analysis of Gaussian-Vortex Beam and Its Application in a Relay Mirror System

Wu Huiyun Huang Zhihe Wu Wuming Xu Xiaojun Chen Jinbao Zhao Yijun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A new method that decreases the power loss in uplink propagation of a relay mirror system by using a Gaussian-vortex beam source is proposed. Performance of a 30 km-altitude relay mirror system that uses a Gaussian beam source is calculated. Results show that power coupling efficiency of uplink propagation in the relay mirror system is 76.48%, beam blocked by secondary mirror of the receiving telescope causes the main power loss and power loss proportion caused by beam blocking is 22.85%. Relation between shape and aperture of the dark area generated at the center of a Gaussian-vortex beam with parameters of the beam are analyzed in detail. Results show that shape of the hollow area is determined by amount of phase vortex of the beam, the hollow area is circular only when amount of phase vortex is times of 2π , aperture of the dark hollow increases with the increase of amount of phase vortex and propagation distance, respectively. Performance of a 30 km-altitude relay mirror system that uses a Gaussian-vortex beam source is calculated. Results show that power coupling efficiency of uplink propagation in the relay mirror system is 97.25%, and power loss in uplink propagation is significantly decreased.

Key words laser technique; vortex beam; relay mirror system; power coupling efficiency; uplink propagation

OCIS codes 010.1300; 220.4830; 140.3300; 140.3325

1 引言

涡旋光束的特性及其应用分析是近年来学术界研究的热门课题^[1~10]。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,而是像旋涡状,具有奇异性^[4~6]。涡旋光束的涡旋中心是一个暗核,在此光强消失,其在传输过程中也保持中心光强为零^[6]。目前,涡旋光束可

以通过多种方法产生,主要包括利用涡旋相位板、全息光栅、低阶高斯模、模式转换器和直接从具有相位转换装置的激光谐振腔中产生等^[3~6]。

激光中继镜技术是高能激光系统发展的一门新技术,也是一项世界瞩目的新型激光系统作战概念^[11~16]。中继镜系统将激光源与光束控制部分分离,能降低大气等因素对激光的影响、拓宽激光系统

收稿日期: 2010-09-14; 收到修改稿日期: 2010-11-04

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

的作战范围,被认为是机载激光和地基激光的威力倍增器,并冠名为“革命性航空和航天全球激光交战系统”^[12,14]。美国自“星球大战”计划以来,一直对中继镜及相关技术进行研究,进行过多次相关试验并取得了一系列的进展^[12~15]。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。2006年6月,美国空军研究实验室与波音公司在空军星火光学靶场进行验证演示试验,检验系统有效载荷跟踪战术目标的能力。试验获得成功,但试验所采用的中继镜系统样机的能量耦合效率仅为50%^[14,15]。目前,如何有效提高系统上行链路能量耦合效率是中继镜系统的急切问题和重要研究内容^[14,15]。近年来,学者们分别提出了多种方法提高系统上行链路能量耦合效率,如光束整形、相干合成技术等^[16~20]。本文将涡旋光束的特性与中继镜系统的需求结合,提出以高斯涡旋光束作为中继镜系统光源,降低系统能量损耗。该方法的主要思想是:利用高斯涡旋光束的性质,通过设置合理光束参数实现上行接收光束空心暗核形状及口径大小与接收望远镜次镜匹配,降低次镜阻挡造成的能量损耗,从而实现系统能量耦合效率的提升。

2 高斯涡旋光束分析

高斯涡旋光束的相位分布如图1所示,光束光场可表示为

$$U_0(r, \theta) |_{z=0} = A \exp(-r^2/2\omega_0^2) \exp[j\phi(\theta)], \quad (1)$$

$$\phi(\theta) = \frac{\theta}{2\pi} \varphi_0, \quad (2)$$

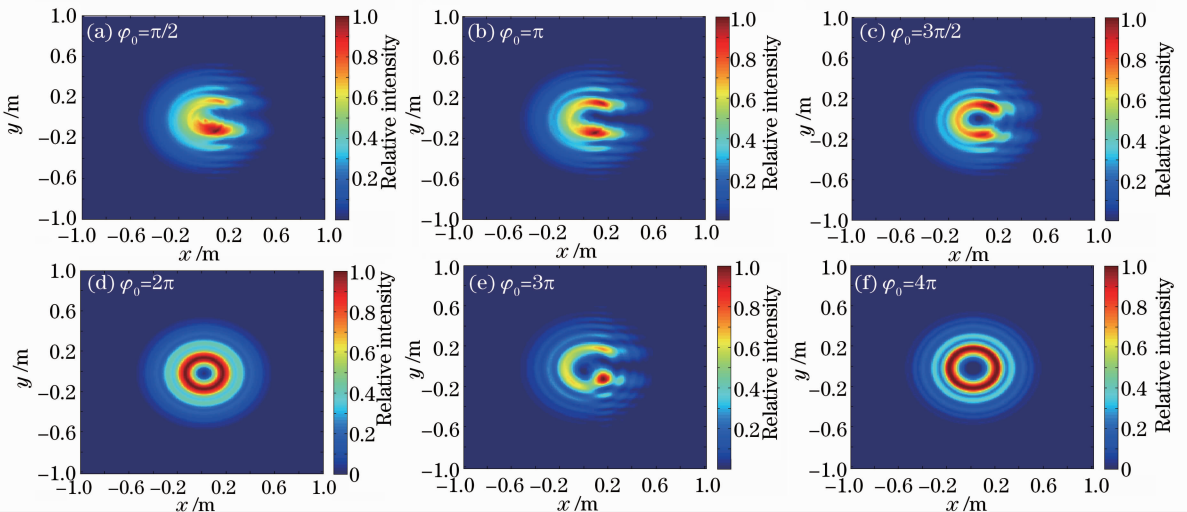


图2 φ_0 不同取值时光场强度分布图

Fig. 2 Intensity distributions of the optical field under different values of φ_0

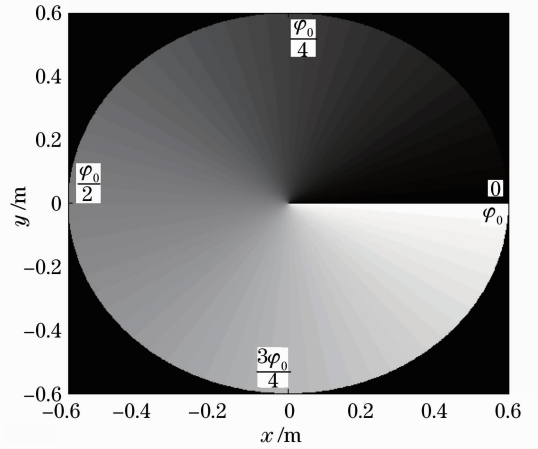


图1 高斯涡旋光束相位分布图

式(1)中 (r, θ) 是二维极坐标, A 为振幅, ω_0 是高斯光束的腰斑半径, φ_0 是光束的相位涡旋量。

由惠更斯-菲涅耳衍射公式, 得出光束传输 $z = L$ 距离后光场分布为

$$U_1(R, \varphi) |_{z=L} = \frac{\exp(jkz) \exp(jkR^2/2z)}{j\lambda z} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} U_0(r, \theta) \times \exp(jkr^2/2z) \exp[-jkRr \cos(\theta - \varphi)/z] r dr d\theta, \quad (3)$$

涡旋光束的重要特性为在传输过程中, 光束中心能产生一个暗核。将分析中心暗核的大小、形态与光束相位涡旋量及传输距离之间的关系。

2.1 相位涡旋量的影响分析

2.1.1 对暗核形状的影响

设定光束为单位强度高斯光束, $\omega_0 = 0.3 \text{ m}$, $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, 光束截断口径为 1.2 m , 传输距离 $L = 30 \text{ km}$, 光束相位涡旋量为变量。根据(3)式, 计算

得出 φ_0 不同取值时, $L=30\text{ km}$ 处光场强度分布如图 2 所示。

由结果得出, 涡旋高斯光束中心暗核的形状由光束相位涡旋量决定, 只有当 $\varphi_0=2n\pi$ 时, 中心暗核为圆形。

2.1.2 对暗核大小的影响

参照高斯光束腰斑半径的定义方法, 定义圆形暗核的口径 $D_{0.1}$ 为: 光场强度达到极值强度 1/10 时对应的口径, 如图 3 所示。

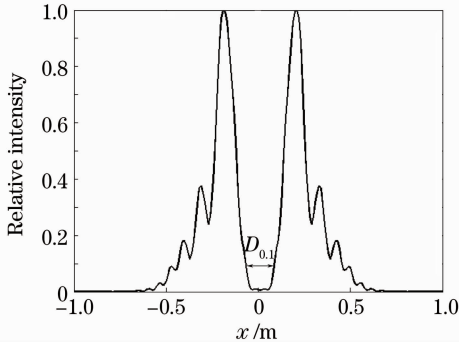


图 3 暗核口径定义示意图

Fig. 3 Definition of the hollow-caliber $D_{0.1}$ at the center of the vortex beam

根据(1)式和圆形暗核的口径 $D_{0.1}$ 的定义, 计算出不同整数倍光学拓扑荷时暗核的口径大小, 如图 4 所示。结果显示, 暗核口径随着相位涡旋量 φ_0 的增加而增加。

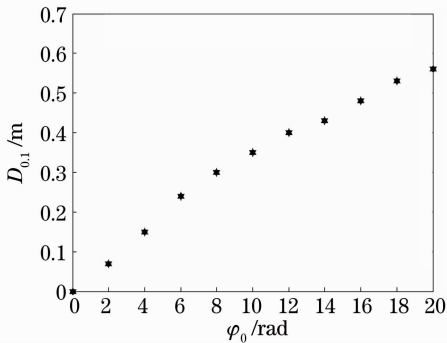


图 4 φ_0 不同取值时暗核的口径大小图

Fig. 4 Values of $D_{0.1}$ under different φ_0

2.2 传输距离的影响分析

设定光束为单位强度涡旋高斯光束, $\omega_0=0.3\text{ m}$, $\lambda=1.064\text{ }\mu\text{m}$, 光束截断口径为 1.2 m , 相位涡旋量 $\varphi_0=10\pi$, 光束传输距离为变量。根据(1)式和圆形暗核的口径 $D_{0.1}$ 的定义, 计算出不同传输距离下暗核的口径大小, 如图 5 所示。结果显示, 光束中心暗核的口径随着传输距离的增加而增大。

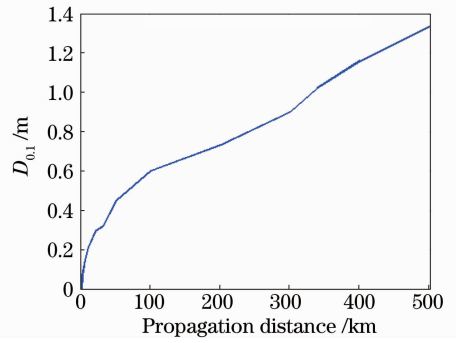


图 5 不同传输距离时暗核的口径大小

Fig. 5 Values of $D_{0.1}$ under different propagation distances

3 中继镜系统能量损耗分析

中继镜系统模型如图 6 所示, 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组成, 其系统的主要工作过程为: 系统向位于高空的中继平台发射激光束, 上行光束经系统接收、校正与净化后作为新光源, 由下行望远镜将光束重定向聚焦到目标上, 实现对目标的打击^[12]。系统通常采用卡塞格林望远镜实现上行光束的接收, 系统上行链路两端有完全合作信标与自适应系统作用, 可以实时探测大气扰动, 大气的影响可以得到有效校正, 忽略透射率的影响, 上行传输过程可以近似为真空传输^[11~13]。

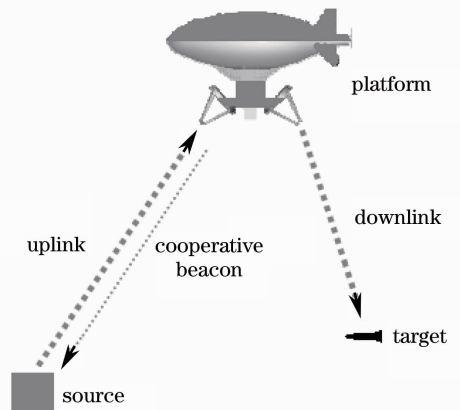


图 6 中继镜系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of a relay mirror system

由惠更斯-菲涅耳衍射公式, 上行接收光场可表示为

$$U_1(x, y) \Big|_{z=L} = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \int \int_{-\infty}^{+\infty} U_0(\epsilon, \eta) \times \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x-\epsilon)^2 + (y-\eta)^2]\right\} d\epsilon d\eta, \quad (4)$$

中继镜系统上行链路能量耦合效率表示为

$$T = \frac{\int I_1(x, y) ds}{P_0}, \quad (5)$$

式中 s 表示接收望远镜的有效环形区域, $I_1(x, y)$ 是接收光场强度分布, P_0 是光源功率。下行传输过程中, 光束聚焦传输, 焦距与传输距离相等, 则理想条件下目标处的峰值功率密度为

$$I_P = \left[\frac{1}{\lambda F} \int |U'(\omega, \nu)| ds' \right]^2, \quad (6)$$

式中 s' 表示下行发射望远镜的有效环形区域, $|U'(\omega, \nu)|$ 为下行聚焦光束的振幅分布。

以 30 km 中继镜系统为例, 分析中继镜系统的能量损耗。参数设定如下: 上行传输距离 $L = 30$ km, 接收望远镜内径为 0.3 m, 外径为 1.2 m, 下行聚焦望远镜与接收望远镜结构相同, 下行聚焦距离为 10 km; 光源为单位强度高斯光束且初始相位为零, $\omega_0 = 0.3$ m, $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 。计算得出上行接收光场强度分布如图 7 所示。卡塞格林望远镜由主镜和次镜组成, 系统有效接收区域为主镜和次镜之间的环形区域, 图中大小白色虚线圈分别代表主镜和次镜的轮廓, 小虚线圈以内区域代表次镜阻挡区域, 大小虚线圈组成的环形区域代表望远镜接收区域。

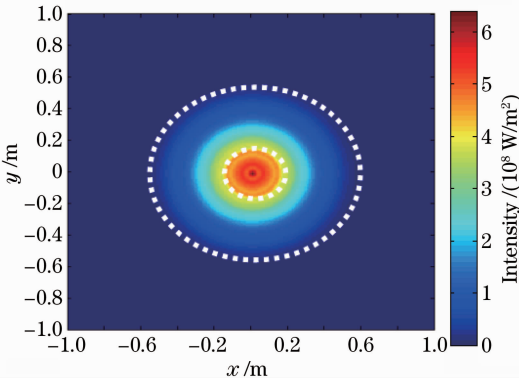


图 7 上行接收光场强度分布图

Fig. 7 Intensity distributions of the uplink received light field

得到的结果是, 系统的上行链路能量耦合效率为 76.48%, 接收望远镜次镜阻挡损耗的能量占总能量的 22.85%; 采用高斯光源时, 中继镜系统上行链路的能量损耗主要是由接收望远镜次镜阻挡作用造成的。

4 高斯涡旋光束在中继镜系统中的应用分析

将中继镜系统的需求和涡旋光束特性结合, 以高斯涡旋光束作为中继镜系统的光源。在该系统

中, 光源的光束相位涡旋量根据中继镜系统的上行传输距离和接收望远镜次镜硬件参数计算得出, 实现上行接收光束中心暗核的形状、大小最大限度与上行接收望远镜次镜的形状、大小的匹配, 有效降低接收望远镜次镜阻挡作用造成的能量损耗。以 30 km 中继镜系统为例, 分析以高斯涡旋光束作为光源的应用优势。系统参数不变, 光源为单位强度高斯涡旋光束且 $\omega_0 = 0.3$ m, $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 。

首先, 根据中继镜系统的上行传输距离和接收望远镜次镜硬件参数计算选取最优的光束相位涡旋量。根据(4)式和(5)式, 计算得出系统上行链路能量耦合效率与光束相位涡旋量的曲线关系如图 8 所示, 光束的最优相位涡旋量为 8π 。

取 $\varphi_0 = 8\pi$, 根据(1)式计算得出上行接收光场强度分布如图 9 所示, 系统的能量耦合效率为 97.25%。

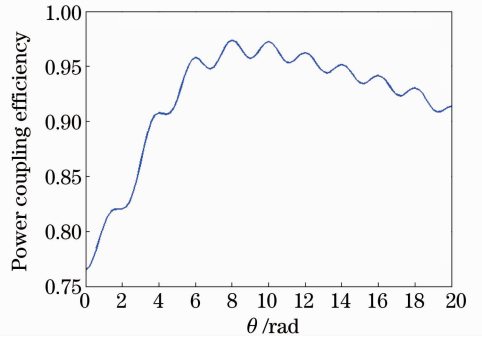


图 8 φ_0 不同取值时系统能量耦合效率曲线图

Fig. 8 Power coupling efficiencies under different values of φ_0

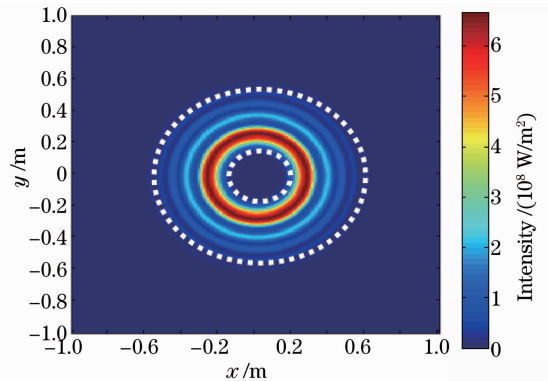


图 9 系统接收光场强度分布图

Fig. 9 Intensity distributions of the received light field

其次, 分析采用不同光源时中继镜系统对目标的打击效果。根据(6)式计算得出: 以高斯涡旋光束作为光源时, 目标处的峰值功率密度为 $1.1348 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$, 高斯光束作为光源时, 目标处的峰值功率密度为 $9.9398 \times 10^{11} \text{ W/m}^2$ 。因此, 采用高斯涡

旋光束作为中继镜系统光源更具有优势。

5 结 论

通过计算以高斯光束作为光源的 30 km 中继镜系统上行传输过程能量损耗情况,得出系统的主要能量损耗是由于接收望远镜次镜阻挡作用造成的。涡旋光束在传输过程中光束中心产生暗核,且暗核的形状及口径大小可通过光束相位涡旋量调节。根据涡旋光束的特性,本文提出以高斯涡旋光束作为中继镜系统的光源,能有效降低系统的能量损耗。高斯涡旋光束的相位涡旋量根据中继镜系统上行传输距离和接收望远镜次镜口径决定。计算结果得出:以高斯涡旋光束作为光源时,30 km 中继镜系统的上行链路能量耦合效率为 97.25%。

参 考 文 献

- 1 Greg Gbur, Robert K. Tyson. Vortex beams propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(1): 225~230
- 2 Alon Bahabad, Ady Arie. Generation of optical vortex beams by nonlinear wave mixing [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(26): 17619~17624
- 3 Ziyang Chen, Jixiong Pu. Stochastic electromagnetic vortex beam and its propagation [J]. *Phys. Lett. A*, 2008, **372**(15): 2734~2740
- 4 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
- 5 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
- 6 Lu Xuanhui, Huang Huiqin, Zhao Chengliang *et al.*. Optical vortex beams and optical vortices [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 51~55
陆璇辉, 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
- 7 Liu Xiaoyun, Tang Hongliang, Li Qian *et al.*. Focusing characteristics of partially coherent electromagnetic vortex beams [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 199~204
刘晓云, 唐宏亮, 李倩等. 部分相干电磁涡旋光束的聚焦特性

- [J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 199~204
- 8 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
- 9 Wang Tao, Pu Jixiong, Chen Ziyang. Propagation of vortex beams in a turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 82~86
王涛, 蒲继雄, 陈子阳. 涡旋光束在湍流大气中的传输特性 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 82~86
- 10 Fu Wenyu, Li Gaoqing, Liu Xiaojun. Propagation of partially coherent vortex beams in the turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 2958~2962
付文羽, 李高清, 刘小军. 部分相干涡旋光束在大气湍流中的远场传输特性 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 2958~2962
- 11 Edwards A. Duff, Donald C. Washburn. The magic of relay mirrors [C]. *SPIE*, 2004, **5413**: 137~144
- 12 Defense Science Board, Department of Defense. Report of the defense board task force on high energy laser weapon system applications [R]. 2001: 56~57
- 13 Steven G. Leonard. Laser options for national missile defense [R]. Alabama, Air Command and Staff College Air University, 1998: 75~84
- 14 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
- 15 J. Simpson. Tactical laser relay mirror demonstration anticipated before 2011 [J]. *Inside The Air Force*, 2007, **18**(41): 3
- 16 Huiyun Wu, Haichuan Zhao, Xiaojun Xu *et al.*. Analysis of the power coupling efficiency of the relay mirror system with the transmitter composed of sub-telescope array [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(16): 3180~3183
- 17 Huiyun Wu, Haotong Ma, Xiaojun Xu *et al.*. Beam shaping for the relay mirror system [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2011, **43**(3): 488~490
- 18 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.*, 2010, **42**(2): 392~396
- 19 Xiuxiang Chu, Guoquan Zhou. Power coupling of a two-Cassegrain telescope system in turbulent atmosphere in a slant path [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(12): 7697~7707
- 20 Huiyun Wu, Haichuan Zhao, Xiaojun Xu *et al.*. Beam shaping for uplink transmission of the relay mirror system [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(17): 3245~3249