

激光中继镜传输的等效菲涅耳数分析

吴慧云¹, 陈金宝², 李鑫¹, 黄志松¹, 黄书海¹, 赵四清¹, 孙振海¹, 徐卸古¹

(1. 军事医学科学院 科技部, 北京 100071; 2. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 中继镜系统被认为是一种能有效降低大气对激光影响并提升激光打击范围的新型高能激光系统。激光中继镜传输优势评判标准以及应用优势范围分析是中继镜技术研究的重要内容。文章建立了中继镜系统光束传输模型, 详细推导了真空和湍流条件下激光中继镜传输过程的等效菲涅耳数, 分析了光束中继镜传输过程的性能评价因子以及光束传输性能与等效菲涅耳数的关系, 在此基础上分析了激光中继镜传输应用优势范围的求解方法, 并对 Hufnagel-Valley 5/7 湍流模型条件下光源波长 3.8 μm 、高度 30 km 的激光中继镜系统进行了数值模拟。结果显示: 地球大气湍流条件下, 中继镜系统能提升激光对远距离、高空目标的打击效果, 拓展激光的打击范围。

关键词: 中继镜系统; 光束传输; 等效菲涅耳数; 数值模拟

中图分类号: O436; O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3218-05

Analysis of equivalent Fresnel number of beam propagation through relay mirror system

Wu Huiyun¹, Chen Jinbao², Li Xin¹, Huang Zhisong¹, Huang Shuhai¹, Zhao Siqing¹,
Sun Zhenhai¹, Xu Xiegu¹

(1. Department of Science and Technology, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100071, China;

2. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The relay mirror system is a new optical system which can effectively decrease the atmospheric aberrations and enlarger the laser attack scope. The standard used to judge the advantage of beam propagation through a relay mirror system and the method used to calculate its advantageous application scope are key contents in the relay mirror technology. In the present paper, model of beam propagation through a relay mirror system was established, the equivalent Fresnel number of beam propagation through a relay mirror system was ratiocinated in detail, the performance evaluation factor used in the relay mirror system was defined, the relationship between the factor and the equivalent Fresnel number was analyzed, and the method used to calculate the advantageous application scope of a relay mirror system was analyzed. Under the Hufnagel-Valley 5/7 turbulent model, performance of a 30 km relay mirror system with 3.8 μm ground-based laser source was calculated. Results show that the relay mirror system can improve laser attack effect to long-distance and high-altitude targets, and enlarger the laser attack scope.

Key words: relay mirror system; beam propagation; equivalent Fresnel number; numerical simulation

收稿日期: 2013-04-11; 修订日期: 2013-05-14

基金项目: 国家 863 计划(2012AA022007); 国家自然科学基金(61308103)

作者简介: 吴慧云(1984-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事激光技术方面的问题。Email: huiyun-wu@163.com

导师简介: 孙振海(1971-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光生物检测方面的问题。Email: sunzhenh@tom.com

0 引言

激光中继镜技术又称为激光重定向技术,是一项重要的新型激光系统作战概念,近年来备受各方瞩目^[1-6],其基本思想是将激光系统的激光源与光束控制部分分离,通过置于高空或太空的中继镜系统接收激光源向其发射的激光束,经系统校正净化后重新定向发射到目标上。激光中继镜系统采用新的结构模式,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,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”^[8-9]。美国自“星球大战”计划以来,一直致力于中继镜及相关技术的研究并取得了一系列的进展,进行过多次实验并取得成功^[9-11]。如何评判一套中继镜系统对目标打击效果是否具有应用优势,以及中继镜系统的应用优势空间范围计算方法是中继镜技术的重要内容,国内外对上述问题研究的报导甚少。文中从光束传输等效菲涅耳数角度出发,详细推导激光中继镜传输过程的等效菲涅耳数以及激光中继镜传输性能与等效菲涅耳数的关系,在此基础上建立激光中继镜传输具有优势的评判标准,并分析激光中继镜传输应用优势范围的求解方法。

1 理论分析

1.1 模型建立

中继镜系统结构如图 1 所示,主要由高功率激光器、上行链路合作信标、自适应光学装置、上行发射装置、中继镜平台系统、必要的地面设施和通信线路等部分组成。中继镜系统光束传输过程分为上行链路和下行链路两部分:上行链路中,光束准直上行传输并由接收望远镜耦合接收;下行链路中,系统将相位校正后的上行接收光束作为新光源,聚焦传输到目标上。中继镜系统包含上行链路合作信标和两套自适应光学装置,其中 AO1 位于光源处,与上行链路合作信标配合使用,用于光束上行链路传输过程的湍流预校正;AO2 位于飞行平台上,用于校正上行接收光束的相位。中继镜系统的主要工作过程为:平台系统向光源端发射自适应合作信标,AO1 根据信标信息,控制发射主激光的波前,实现主激光上行传输的相位预校正,主激光上行传输经平台系统接

收、缩束后,传输到 AO2 进行相位校正,校正后的主激光经发射望远镜聚焦到目标上,实现对目标的打击。

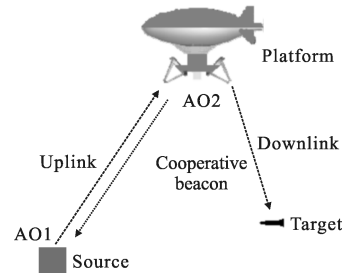


图 1 中继镜系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of a relay mirror system

1.2 等效菲涅耳数分析

1.2.1 真空条件

真空条件下,中继镜系统光束传输模型如图 2 所示。 U_0 为上行出射光场分布, U_1 为上行接收光场分

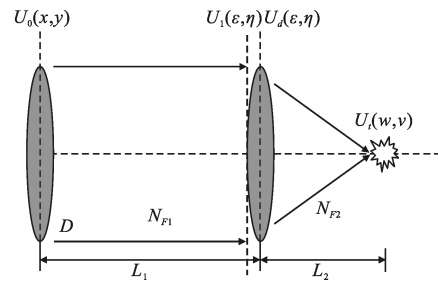


图 2 激光中继镜真空传输模型图

Fig.2 Model of beam vacuum propagation through a relay mirror system

布, U_d 为下行出射光场分布, U_1 为焦面光场分布, L_1 为上行传输距离, L_2 为下行传输距离, D 为望远镜口径(中继镜系统各望远镜相同), $N_{F1}=D^2/4\lambda L_1$ 为上行传输过程的菲涅耳数, $N_{F2}=D^2/4\lambda L_2$ 为下行传输过程的菲涅耳数, P_0 为光源功率。中继镜系统光束传输过程中,各光场分布可表示为:

$$U_1(\rho_1, N_{F1}) = -i2\pi N_{F1} \exp(i2\pi N_{F1} \rho_1^2 / 2) \times \int_0^1 U_0(\rho_0) J_0(2\pi N_{F1} \rho_1 \rho_0) \exp[i\pi N_{F1} \rho_0^2] \rho_0 d\rho_0 \quad (1)$$

$$U_d(\rho_1, N_{F1}) = \begin{cases} U_1(\rho_1, N_{F1}) & \rho_1 \leq 1 \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

$$U_1(\rho_2, N_{F2}) = -i2\pi N_{F2} \exp(i2\pi N_{F2} \rho_2^2 / 2) \times \int_0^1 U_d(\rho_1, N_{F1}) J_0(2\pi N_{F2} \rho_2 \rho_1) \rho_1 d\rho_1 \quad (3)$$

式中: $\rho_0=2\sqrt{x^2+y^2}/D$ 、 $\rho_1=2\sqrt{\epsilon^2+\eta^2}/D$ 和 $\rho_2=2\sqrt{w^2+v^2}/D$

D 分别表示以望远镜半径归一化后的上行出射平面径向坐标、上行接收平面径向坐标和焦平面径向坐标。取光源为平台光束,将公式(1)、公式(2)代入公式(3)得出:

$$U_i(\rho_2, N_{F2}) = -4\pi^2 A_0 N_{F1} N_{F2} \exp(i2\pi N_{F2} \rho_2^2 / 2) \times \int_0^1 \int_0^1 J_0(2\pi N_{F1} \rho_1 \rho_0) J_0(2\pi N_{F2} \rho_2 \rho_1) \times \exp(i2\pi N_{F1} \rho_1^2 / 2) \exp(i\pi N_{F1} \rho_0^2) \rho_0 \rho_1 d\rho_0 d\rho_1 \quad (4)$$

$$U_0(\rho_0) = \begin{cases} A_0 & \rho_0 \leq 1 \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

$$I_{P\text{-relay}} = U_i(\rho_2, N_{F2}) U_i(\rho_2, N_{F2})^* |_{\rho_2 \rightarrow 0} \quad (6)$$

式中: A_0 为光源振幅; $I_{P\text{-relay}}$ 为焦面峰值光强; * 为复共轭。将公式(4)代入公式(5)可得出: 当光源功率确定时, 焦面峰值光强由上行传输过程菲涅耳数 N_{F1} 和下行传输过程菲涅耳数 N_{F2} 决定。

从下行链路光束传输角度出发, 可将上行接收光场视为一个新光源, 新光源聚焦下行传输。新光源功率大小可表示为:

$$P_1 = 2\pi \int_0^1 U_i(\rho_1, N_{F1}) U_i(\rho_1, N_{F1})^* \rho_1 d\rho_1 \quad (7)$$

新光源的光束质量由斯特尔比表征, 定义为二次光源焦斑峰值强度与相同功率理想光源焦斑峰值强度的比值:

$$S_R = \frac{I_{P\text{-relay}}}{I_{P\text{-ideal}}} = \left[\frac{U_i(\rho_2, N_{F2}) U_i(\rho_2, N_{F2})^*}{U_{i\text{-ideal}}(\rho_2, N_{F2}) U_{i\text{-ideal}}(\rho_2, N_{F2})^*} \right] |_{\rho_2 \rightarrow 0} \quad (8)$$

$$U_{i\text{-ideal}}(\rho_2, N_{F2}) = -i2\pi N_{F2} \exp(i2\pi N_{F2} \rho_2^2 / 2) \times \int_0^1 U_{i\text{ideal}}(\rho_1) J_0(2\pi N_{F2} \rho_2 \rho_1) \rho_1 d\rho_1 \quad (9)$$

$$U_{i\text{ideal}}(\rho_1) = \begin{cases} 4P_1 / \pi D & \rho_1 \leq 1 \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $I_{P\text{-ideal}}$ 为理想光源的焦斑峰值强度; $U_{i\text{-ideal}}$ 为理想光源的焦面光场分布; $U_{i\text{ideal}}$ 为相同功率的理想光源光场分布。

引入中继镜系统性能评价因子 Π , 定义为新光源功率比例与新光源光束质量的乘积:

$$\Pi = S_R \times P_1 / P_0 \quad (11)$$

将公式(1)、公式(7)、公式(8)代入公式(11)分析得出: 真空条件下, 中继镜系统性能评价因子 Π 仅由上行传输过程菲涅耳数 N_{F1} 决定。通过计算得出, 真空条件下中继镜系统性能评价因子与上行传输过程菲涅耳数的关系曲线如图 3 所示。

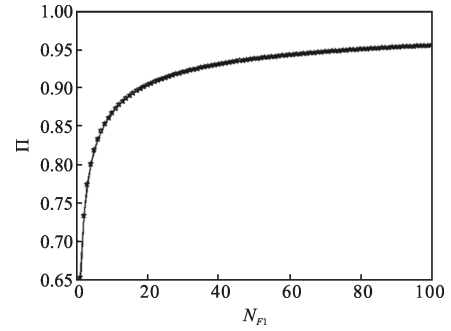


图 3 Π 与 N_{F1} 的关系曲线

Fig.3 Relations between Π and N_{F1}

中继镜系统焦面峰值光强可表示为:

$$I_{P\text{-relay}} = \frac{\pi D^2 P_1}{4\lambda^2 L_2} S_R = \pi^2 A_0^2 \Pi(N_{F1}) N_{F2}^2 \quad (12)$$

参照真空条件下光束聚焦传输焦面峰值光强与传输过程菲涅耳数关系 $I_P = \pi^2 A_0^2 N_F^2$, 可得: 真空条件下, 激光中继镜传输过程的等效菲涅耳数为 $N_{F\text{-relay}} = N_{F2} \sqrt{\Pi(N_{F1})}$ 。

1.2.2 湍流大气条件

湍流大气条件下, 根据参考文献[2,7]的研究结果, 认为中继镜系统利用上行链路合作信标能实时有效地探测光束上行传输过程中大气引入的畸变, 利用两套高精度自适应系统能有效降低上行链路过程大气对光束的影响。因此, 激光上行链路传输过程中忽略湍流扰动的影响, 仅考虑大气透过率的影响。下行链路传输过程中, 光束的等效发射口径可表示为:

$$D_{\text{eff}}(\vec{L}_2) = \begin{cases} D & r_0(\vec{L}_2) \geq D \\ r_0(\vec{L}_2) & r_0(\vec{L}_2) < D \end{cases} \quad (13)$$

$$r_0(\vec{L}_2) = [1.457 2k^2 L_2 \overline{C_n^2}(\vec{L}_2)]^{-3/5} \quad (14)$$

式中: $r_0(\vec{L}_2)$ 代表光束沿 \vec{L}_2 路径传输过程的大气相干长度; $\overline{C_n^2}(\vec{L}_2)$ 代表传输路径 \vec{L}_2 上的大气折射率结构常数平均值。焦面峰值光强可表示为:

$$I_{P\text{-relay}} = \frac{\pi D_{\text{eff}}^2(\vec{L}_2)}{4\lambda^2 L_2} P_0 T_{\text{relay}} \Pi(N_{F1}) = \pi^2 A_0^2 T_{\text{relay}} \left[\sqrt{\Pi(N_{F1})} N_{F2} \times \frac{D_{\text{eff}}(\vec{L}_2)}{D} \right]^2 \quad (15)$$

$$T_{\text{relay}} = T(\vec{L}_1) \times T(\vec{L}_2) \quad (16)$$

式中: $T(\vec{L}_1)$ 为上行链路传输过程的大气透过率; $T(\vec{L}_2)$

为下行链路传输过程的大气透过率, T_{relay} 为整个传输过程的大气透过率。因此,湍流条件下激光中继镜传输过程的等效菲涅耳数为:

$$N_{F-\text{relay}} = \sqrt{\prod(N_{F1})} N_{F2} \times \frac{D_{\text{eff}}(\vec{L}_2)}{D} = \begin{cases} \sqrt{\prod(N_{F1})} N_{F2} & r_0(\vec{L}_2) \geq D \\ \sqrt{\prod(N_{F1})} N_{F2} \times \frac{r_0(\vec{L}_2)}{D} & r_0(\vec{L}_2) < D \end{cases} \quad (17)$$

1.3 优势评判标准分析

如图 4 所示,激光系统对目标打击时,激光可选择直接聚焦和中继镜传输两种方式。根据公式(12)和(17)得出激光中继镜传输时,目标靶面峰值光强为:

$$I_{P-\text{relay}} = \pi^2 A_0^2 N_{F-\text{relay}}^2 T_{\text{relay}} \quad (18)$$

$$N_{F-\text{relay}} = \begin{cases} \sqrt{\prod(N_{F1})} N_{F2} & \text{vacuum} \\ \sqrt{\prod(N_{F1})} N_{F2} \times \frac{D_{\text{eff}}(\vec{L}_2)}{D} & \text{turbulence} \end{cases} \quad (19)$$

激光聚焦传输时,目标靶面峰值光强可表示为:

$$I_{P-\text{direct}} = \pi^2 A_0^2 N_{F-\text{direct}}^2 T_{\text{direct}} \quad (20)$$

$$N_{F-\text{direct}} = \begin{cases} N_F & \text{vacuum} \\ N_F \times \frac{D_{\text{eff}}(\vec{L})}{D} & \text{turbulence} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $N_F = D^2/4\lambda L$; $T_{\text{direct}} = T(\vec{L})$ 为光束沿 \vec{L} 路径聚焦传输过程的大气透过率; $D_{\text{eff}}(\vec{L})$ 为等效光束口径。由公式(18)和(20)得出,当 $N_{F-\text{relay}}^2 T_{\text{relay}} > N_{F-\text{direct}}^2 T_{\text{direct}}$ 时,激光系统选择中继镜传输具有优势。

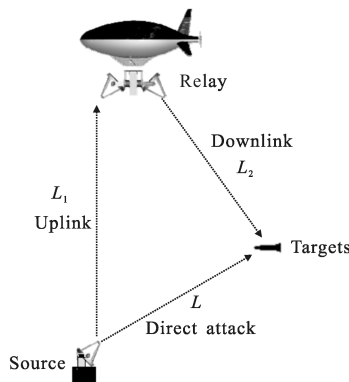


图 4 激光系统模型图

Fig.4 Schematic diagram of a laser system

对硬件参数和大气条件已确定的中继镜系统,将公式(1)、公式(7)、公式(8)、公式(11)、公式(18)、公

式(19)、公式(20)、公式(21)和中继镜传输优势条件 $N_{F-\text{relay}}^2 T_{\text{relay}} > N_{F-\text{direct}}^2 T_{\text{direct}}$ 、光束传输路径关系 $\vec{L} = \vec{L}_1 + \vec{L}_2$ 联立,并结合 MODTRAN 大气透过率计算软件可得出该系统光束中继镜传输的优势应用范围。

2 模拟计算

2.1 参数设置

光源为单位振幅的理想地基平台光束,波长 $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$,激光系统望远镜口径 $D = 1.2 \text{ m}$,中继镜平台位于光源正上方,距离 $L_1 = 30 \text{ km}$ 。激光中继镜传输时,上行链路自适应光学装置 AO1 和 AO2 闭环工作,下行链路无自适应光学装置作用;激光直接聚焦打击目标时,无自适应光学装置作用。大气条件为海洋环境,能见度为 23 km,大气折射率结构常数分布采用 Hufnagel-Valley 5/7 湍流模型描述^[11]:

$$C_n^2(h) = 8.2 \times 10^{-50} V(h)^2 h^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + C_n^2(0) \exp(-h/100) \quad (22)$$

$$V(h) = 5 + 30 \exp\{-[(h-9400)/4800]^2\} \quad (23)$$

式中: h 为距离地面高度, m; $V(h)$ 是风速, m/s; $C_n^2(0)$ 为地表湍流结构常数,取 $4.0 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。

2.2 计算结果

首先,由 MODTRAN 软件计算得出光束上行链路传输的大气透过率为 $T(\vec{L}_1) = 0.9426$ 。将系统参数代入公式(1)并通过一维相位解缠绕计算得出:上行接收光场强度分布如图 5 所示,相位分布如图 6 所示。将结果代入公式(7)、(8)和(11)通过计算得出:二次光源的光束质量 $S_R = 0.8655$,二次光源的性能评价因子 $\Pi = 0.7547$ 。

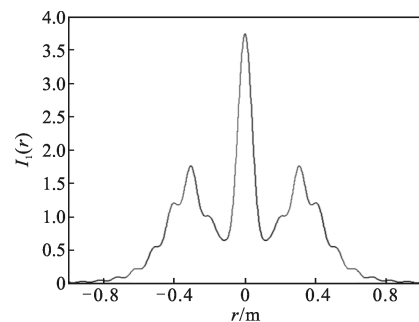


图 5 上行接收光场强度分布

Fig.5 Intensity distribution of the receiving field

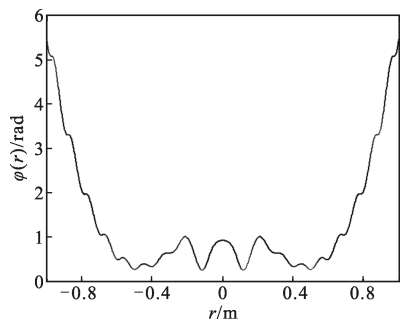


图 6 上行接收光场相位分布

Fig.6 Phase distribution of the receiving field

其次, 将光束传输路径关系、湍流分布空间形态、优势条件与公式(1)、(7)、(8)、(11)、(18)、(19)、(20)、(21) 联立, 并结合 MODTRAN 软件计算得出:H-V 5/7 湍流模型条件下, 激光中继镜传输的应用优势范围剖面图如图 7 所示。

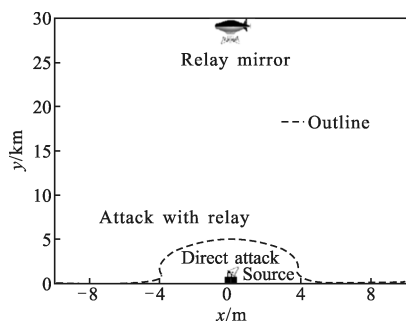


图 7 激光中继镜传输的应用优势范围剖面图

Fig.7 Section plane diagram of advantageous application scope of a relay mirror system

图中虚线代表优势范围轮廓分界线, 在虚线上方的区域中, 满足 $N_{F\text{-relay}}^2 T_{\text{relay}} > N_{F\text{-direct}}^2 T_{\text{direct}}$, 采用中继镜传输方式具有优势; 在虚线下方的区域中, 满足 $N_{F\text{-direct}}^2 T_{\text{direct}} > N_{F\text{-relay}}^2 T_{\text{relay}}$, 采用直接聚焦打击具有优势。图 7 结果显示: 地球大气湍流条件下, 中继镜系统能提升激光对远距离、高空目标的打击效果, 拓展激光的打击范围。

3 结论

针对如何评判激光中继镜传输是否具有优势以及应用优势范围如何求解的问题, 文中详细推导了激光中继镜传输过程的等效菲涅耳数, 分析了激光传输性能与等效菲涅耳数的关系, 在此基础上分析

了激光中继镜传输应用优势范围的求解方法, 并对 Hufnagel-Valley 5/7 湍流模型条件下光源波长 $3.8\mu\text{m}$ 、高度 30 km 的激光中继镜系统进行了模拟计算。文中研究的等效菲涅耳数物理意义深刻, 提出的激光中继镜传输优势评判条件简单有效, 对中继镜系统的设计、系统应用分析等具有指导意义。

参考文献:

- [1] Hartman M, Restaino S, Baker J, et al. EAGLE/relay mirror technology development[C]//SPIE, 2002, 4724: 110-117.
- [2] Leonard Steven G. Laser options for national missile defense [R]. Air Command and Staff College Air University, 1998: 75-84.
- [3] Marcello Romano, Brij N Agrawal. Tracking and pointing of target by a bifocal relay mirror spacecraft using attitude control and fast steering mirrors tilting AIAA guidance[C]// Navigation and Control Conference and Exhibit, 2002: 5030-1-11.
- [4] Johnson Scott L. Beam control of extremely agile relaying laser source for bifocal relay mirror spacecraft [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2006: 1-2.
- [5] Glaros Gregory E. Broad departmental application of directed energy systems [C]//Directed Energy Weapon SMI Conference, 2004: 7-28.
- [6] Ren Guoguang, Huang Jijin. Major progress of U.S. 2005' high-energy laser technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(6): 5-6. (in Chinese)
- [7] Edwards A Duff, Donald C Washburn. The magic of relay mirrors [C]//SPIE, 2004, 5413: 139-43.
- [8] Wu Huiyun, Zhao Haichuan, Wu Wuming, et al. Beam shaping for the uplink beam of the laser relay mirror system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (9): 1686-1690. (in Chinese)
- [9] St. Louis MO. Boeing demonstrates aerospace relay mirror system [EB/OL]. <http://www.spacewar.com/reports/>, 2006-08-18.
- [10] Chen Jinbao, Wu Huiyun, Wu Wuming, et al. Simulation of the effect of slanting propagation relay mirror system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 245-249. (in Chinese)
- [11] Wu Huiyun, Zhao Haichuan, Xu Xiaojun, et al. Beam shaping for uplink transmission of the relay mirror system[J]. *Applied Optics*, 2010, 49: 3245-7.