

激光湍流大气中继传输性能分析

吴慧云¹ 陈金宝² 孙振海^{1*}

(¹军事医学科学院科技部, 北京 100071
²国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 建立了中继镜系统模型,根据中继镜系统两套自适应光学装置不同的工作条件和用途,分析了宜选用的系统类型,结果显示光源处的自适应光学装置宜选用共轭式;飞行平台处的自适应光学装置宜选用优化式。在此基础上,使用 Hafnagel-Valley 5/7 大气湍流模型,建立载荷平台高度 30 km、目标高度 25 km、下行传输瞄准精度 $1 \mu\text{rad}$ 的中继镜系统,分析说明了第二套自适应光学装置存在必要性及其对中继镜系统性能的影响;数值模拟了 0 阶、5 阶、10 阶、20 阶、50 阶校正精度条件下以及理想校正时中继镜系统的光束传输性能。计算结果显示:双自适应光学装置对中继镜系统光束传输性能提升具有重要影响;闭环理想校正时,中继镜系统上行链路能量耦合效率由 58.82% 提升至 81.27%,靶面光斑 0.5 cm 桶中功率比例由 1.07% 提升至 15.85%。

关键词 光束传输;激光技术;中继镜系统;双自适应光学装置;校正精度

中图分类号 TJ95 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0213001

Analysis of Beam Propagation Through a Relay Mirror System in Turbulent Atmosphere

Wu Huiyun¹ Chen Jinbao² Sun Zhenhai¹

(¹Department of Science and Technology, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100071, China
²College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A typical model of the relay mirror system is established, and the appropriate styles of the two adaptive optics installations used in a relay mirror system are analyzed according to the different working conditions and different uses. It is recognized that the adaptive optics installation located at the light source may use the conjugate adaptive optics, the adaptive optics installation located on the platform may use the optimization algorithm based adaptive optics. Based on a laser relay mirror system under the Hufnagel-Valley 5/7 at atmospheric turbulence model condition and with target height of 25 km, platform height of 30 km, and downlink aiming precision of $1 \mu\text{rad}$, necessity of the second adaptive optics installation its influence on the system performance is analyzed. Performances of beam propagation through the relay mirror system with certain correction precisions of 0, 5th, 10th, 20th and 50th order as well as ideal correction condition are simulated, results show that the two adaptive optics installations have a great impact on the system performance improvement, uplink power efficiency can be improved from 58.82% to 81.27% and power proportion in 0.5 cm bucket at the target can be improved from 1.07% to 15.85% under closed-loop mode with ideal adaptive optics precision.

Key words beam propagation; laser technique; relay mirror system; two adaptive optics installations; correction precision

OCIS codes 010.1300; 010.1330; 010.1290

收稿日期: 2012-09-03; 收到修改稿日期: 2012-10-26

基金项目: 国家 863 计划项目(2012AA022007)资助课题。

作者简介: 吴慧云(1984—),男,博士,助理研究员,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: kkwkw012821@163.com

* 通信联系人。E-mail: sunzhenh@tom.com

1 引 言

激光中继镜技术是高能激光技术领域的一种技术,备受研究人员关注^[1~4]。中继镜系统将光源与光束控制部分分离,使光束按“相位预校正-上行传输-截断接收-相位补偿-下行聚焦传输”的过程传输,能降低大气等因素对激光传输的影响,拓宽激光系统的作用范围^[5~9]。双自适应光学装置和上行链路合作信标是中继镜系统的重要组成部分,也是中继镜系统与常规高能激光系统在结构上的主要区别,对中继镜系统的性能具有重要的影响。本文根据中继镜系统两套自适应光学装置不同的工作条件和用途,结合现有自适应光学装置的类型和特点,介绍了两套自适应光学装置宜选用的类型,在此基础上分析了第二套自适应光学装置对中继镜系统性能的影响,并计算特定自适应校正精度条件下的中继镜系统光束传输性能。

2 理论分析

2.1 模型建立

中继镜系统结构组成如图 1 所示,主要由激光器、上行链路合作信标、自适应光学装置、光束上行发射装置、中继镜载荷平台系统、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,光束准直后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。位于光源处的自适应光学装置(AO1)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;位于载荷平台上的自适应光学装置(AO2),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载荷平台系统向光源端发射合作信标,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,主激光上行传输经载荷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。

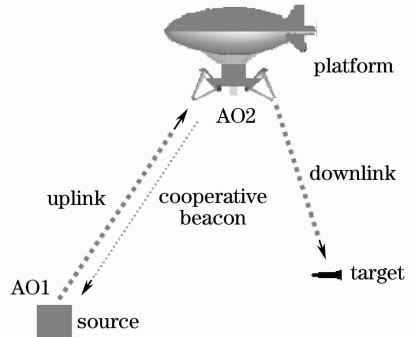


图 1 中继镜系统模型图

Fig. 1 Model of the relay mirror system

2.2 双自适应装置分析

当前广泛应用的自适应光学系统主要分为共轭式自适应光学系统和优化式自适应光学系统,基本原理如图 2 所示。共轭式自适应光学系统主要由波前传感器、波前校正器和波前控制器三部分组成,工作过程中执行“波前测量-波前重构-波前补偿”流程^[9,10]。优化式自适应光学系统主要由性能评价模块(性能评价函数传感器)、波前校正器和算法控制器组成,工作过程中执行“相位校正-性能评价-优化控制”流程^[11,12]。优化式自适应光学系统最大的特点是不需要进行波前测量,系统计算量小、结构紧凑、重量轻、适用于高空应用^[11,12]。上行链路过程中,中继镜系统的主要优势在于能实时获取信标光精确的波前信息,通过变形镜产生畸变波前共轭相位分布,用于上行链路的湍流预校正。因此,AO1 宜选取共轭式自适应光学系统^[13]。AO2 位于飞行平台上,由于飞行平台的载荷能力有限,必须考虑自适应光学系统体积、重量的影响。因此,AO2 宜选用优化式自适应光学系统^[13]。

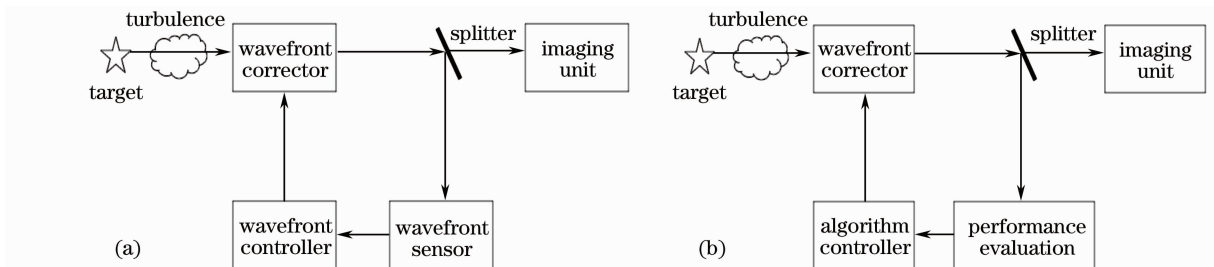


图 2 自适应光学系统原理图。(a)共轭式自适应光学系统;(b)优化式自适应光学系统

Fig. 2 Schematic diagram of the adaptive optical system. (a) Conjugate adaptive optics system;

(b) optimization algorithm based adaptive optics system

2.3 光束传输数学模型

双自适应光学系统光束传输模型如图 3 所示, AO1 为共轭式自适应光学系统, AO2 为优化式自适应光学系统且优化控制算法为随机并行梯度下降算法, $U_0(x, y)$ 为入射光场, $U'_0(x, y)$ 为经 AO1 相位调制后的光场, $U_1(\epsilon, \eta)$ 为 AO2 前端的光场, $U_d(\epsilon, \eta)$ 为经 AO2 相位调制后的出射光场, $\varphi_0(x, y)$ 为上行传输湍流的等效相位屏, $\varphi'_0(x, y)$ 为 AO1 引入的相位调制, $\varphi'_1(\epsilon, \eta)$ 为 AO2 引入的相位调制, $U_t(w, v)$ 为目标靶面光场分布。根据光束传输关系可得^[14,15]:

$$U'_0(x, y) = U_0(x, y) \exp[i\varphi'_0(x, y)], \quad (1)$$

$$U_1(\epsilon, \eta) = \frac{\exp(ikL)}{i\lambda L} \iint U'_0(x, y) \exp[i\varphi_0(x, y)] \exp\left\{i\frac{k}{2L}[(\epsilon - x)^2 + (\eta - y)^2]\right\} dx dy, \quad (2)$$

$$U_d(\epsilon, \eta) = U_1(\epsilon, \eta) \exp[i\varphi'_1(\epsilon, \eta)], \quad (3)$$

$$U_t(w, v) = \frac{\exp(ikL_d)}{i\lambda L_d} \exp\left[i\frac{k}{2L_d}(w^2 + v^2)\right] \iint U_d(\epsilon, \eta) \exp\left[-i\frac{k}{L_d}(w\epsilon + v\eta)\right] d\epsilon d\eta, \quad (4)$$

式中 k 为波数, L 为上行传输距离, L_d 为下行传输距离。自适应光学装置引入的相位校正分布可表示为

$$\varphi'_0(x, y) = \sum_{j=1}^{N_1} a_j Z_j(x, y), \quad (5)$$

$$\varphi'_1(\epsilon, \eta) = \sum_{j=1}^{N_2} b_j Z_j(\epsilon, \eta), \quad (6)$$

式中 N_1 和 N_2 分别表示 AO1 和 AO2 校正的泽尼克多项式最高阶数, $\mathbf{a} = \{a_1, \dots, a_{N_1}\}$ 为 AO1 的泽尼克多项式系数向量, $\mathbf{b} = \{b_1, \dots, b_{N_2}\}$ 为 AO2 的泽尼克多项式系数向量, \mathbf{a} 由 AO1 波前传感器测量波前

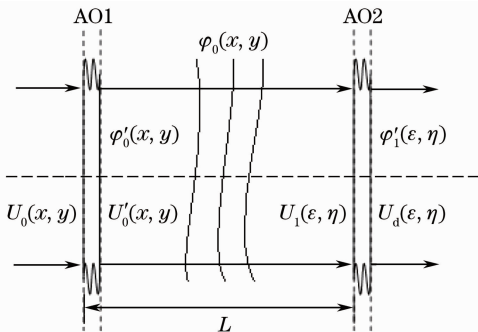


图 3 双自适应光学系统光束传输模型

Fig. 3 Model of beam propagation through the two adaptive optical system

信息并利用泽尼克多项式对波前进行重构获取, \mathbf{b} 由 AO2 根据性能评价函数和优化算法的迭代获取。选取随机并行梯度下降算法作为 AO2 的优化控制算法, 对应的优化过程如下^[16,17]:

1) 定义优化过程评价函数 J , 设定优化过程迭代次数 n ;

2) 生成随机扰动向量 $\delta\mathbf{b} = \{\delta b_1, \delta b_2, \dots, \delta b_{N_2}\}$, 随机扰动 $\{\delta b_i\}$ 满足均值为零、方差相等, 即满足 $\langle \delta b_i \rangle = 0, \langle \delta b_i \delta b_j \rangle = \sigma^2 \delta_{ij}$;

3) 将随机扰动电压 $\delta\mathbf{b}$ 施加到波前校正器的各个驱动器上, 取得评价函数的值 $J^+ = J(\mathbf{b} + \delta\mathbf{b})$, 然后施加反相的扰动电压 $-\delta\mathbf{b}$, 取得负向扰动的评价函数 $J^- = J(\mathbf{b} - \delta\mathbf{b})$, 计算两次扰动过程中评价函数的变化量 $\delta J = J^+ - J^-$;

4) 根据式 $\mathbf{b}^{(t+1)} = \mathbf{b}^{(t)} + \gamma \delta\mathbf{b}^{(t)}$ 更新控制参数, 其中 t 为迭代步数, γ 为迭代步长;

5) 重复步骤 1) ~ 4), 直至 $t = n$, 迭代执行完毕。

3 数值计算

3.1 参数设置

中继镜系统的主要参数设置如下: 光源为理想的 $3.8 \mu\text{m}$ 平台地基激光; 载荷平台位于光源正上方 30 km 处, 目标位于光源正上方 25 km 处, 光束下行传输距离 5 km; 望远镜为外径 1.2 m、内径 0.24 m 的卡塞格林望远镜; AO1 为共轭式自适应光学系统, AO2 为优化式自适应光学系统; AO2 优化计算过程中取优化迭代步数 $n=1000$, 迭代步长 $\gamma=0.1$; 大气折射率结构常数分布由 Hufnagel-Valley 5/7 大气湍流模型描述:

$$C_n^2(h) = 8.2 \times 10^{-56} V(h)^2 h^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + C_n^2(0) \exp(-h/100), \quad (7)$$

$$V(h) = 5 + 30 \exp\{-[(h - 9400)/4800]^2\}, \quad (8)$$

式中 h 为高度(m), $V(h)$ 是风速模型(m/s), $C_n^2(0)$ 为地表折射率结构常数, 取为 $4.0 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。

3.2 AO2 的影响分析

根据系统参数计算分析 AO2 对系统性能的影响, 说明 AO2 存在的必要性。设定系统工作条件为 AO1 开环无校正, 定义目标靶面光斑桶中功率 (PIB) 比例(与初始光源比例)为

$$R_{\text{PIB}}(r) = \frac{\iint_{\sqrt{w^2+v^2} \leq r} U_t(w, v) U_t^*(w, v) dw dv}{P_0}. \quad (9)$$

通过计算得出 AO2 开环无校正和 AO2 闭环理想校正时目标靶面光斑桶中功率比例(与初始光源比例)曲线如图 4 所示。

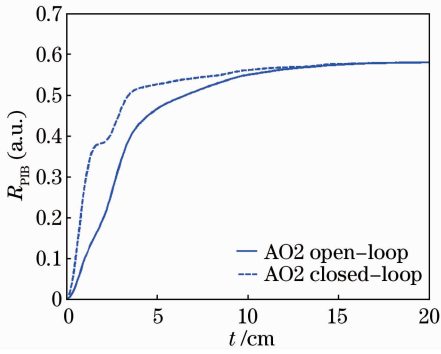


图 4 AO1 开环的靶面光斑桶中功率比例曲线

Fig. 4 PIB curves of AO1 open-loop

设定系统工作条件为 AO1 闭环且校正精度 $N_1=5$,通过计算得出 AO2 开环无校正和 AO2 闭环理想校正时目标靶面光斑桶中功率比例(与初始光源比例)曲线如图 5 所示。计算结果显示 AO2 闭环理想校正时,目标靶面光斑桶中功率比例曲线明显高于 AO2 开环无校正时的目标靶面光斑桶中功率比例曲线,说明在 AO1 开环无校正条件下,AO2 对中继镜系统性能具有重要的影响,具有存在的必要。

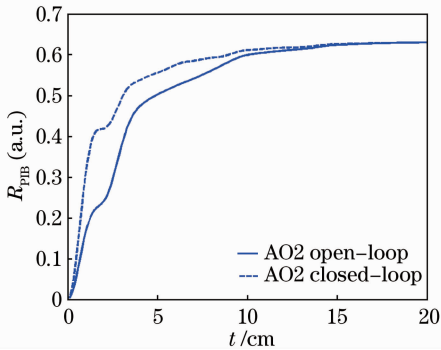


图 5 AO1 闭环的靶面光斑桶中功率比例曲线

Fig. 5 PIB curves of AO1 closed-loop

图 4 和图 5 结果显示,在 AO1 开环和闭环的工作条件下,AO2 闭环理想校正时的目标靶面光斑桶中功率比例曲线均明显高于 AO2 开环无校正时的目标靶面光斑桶中功率比例曲线,说明 AO2 对中继镜系统性能具有重要影响,具有存在的必要。

3.3 中继镜系统性能分析

3.3.1 计算方法

中继镜系统光束传输性能模拟计算过程主要分为以下三步:

1) 根据系统参数和大气条件,计算上行链路的

大气相干长度 r_0 ,由功率谱反演法计算上行链路湍流的等效相位屏分布 $\varphi_0(x,y)$,将 $\varphi_0(x,y)$ 作为 AO1 的信标波前探测信号;

2) 对 $\varphi_0(x,y)$ 进行泽尼克多项式正交分解,求出 AO1 波前校正量的泽尼克多项式系数向量 $\mathbf{a}=[a_1,a_2,\dots,a_{N_1}]$,将 \mathbf{a} 代入(1)式和(2)式计算上行接收光场 $U_1(\epsilon,\eta)$;

3) 以 AO2 相位校正量的泽尼克多项式系数向量 $\mathbf{b}=\{b_1,\dots,b_{N_2}\}$ 为变量,由随机并行梯度下降算法进行优化,计算 AO2 波前最优相位校正量泽尼克多项式系数向量 \mathbf{b}_{\max} ,进而计算得出目标靶面光场分布 $U_t(w,v)$ 。

3.3.2 计算结果

设定 AO1 和 AO2 校正精度相同且均为 N 阶,中继镜系统对目标的瞄准精度为 $1 \mu\text{rad}$ 。中继镜系统下行传输距离为 5 km,根据系统对目标的瞄准精度可得出系统的作用覆盖区域为以目标靶面中心点为圆心、半径为 0.5 cm 的圆形,因此取目标靶面光斑 0.5 cm 桶中功率比例(与初始光源比例)为 AO2 优化过程的性能评价函数。

根据系统参数和大气条件计算得出上行链路的大气相干长度 $r_0=0.31 \text{ m}$,进一步由功率谱反演法计算得出上行链路湍流的等效相位屏分布如图 6 所示。

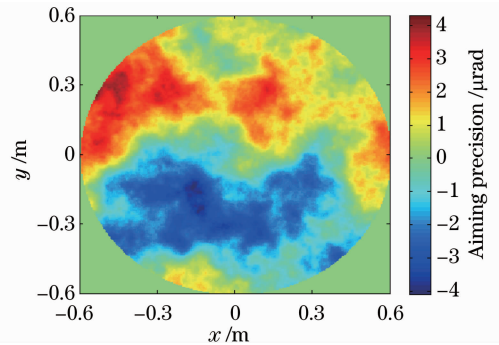


图 6 上行链路湍流相位屏分布

Fig. 6 Distribution of the uplink turbulence phase-screen

设 AO1 和 AO2 的校正精度相同,并分别取 0 阶、5 阶、10 阶、20 阶、50 阶校正精度以及理想校正,通过计算得出上行接收光场相对强度分布如图 7 所示,目标靶面光斑桶中功率比例曲线如图 8 所示。

分别以上行链路能量耦合效率和目标靶面光斑 0.5 cm 桶中功率比例作为中继镜系统性能评价要素对计算结果进行分析,得出不同校正精度条件下中继镜系统的光束传输性能见表 1。

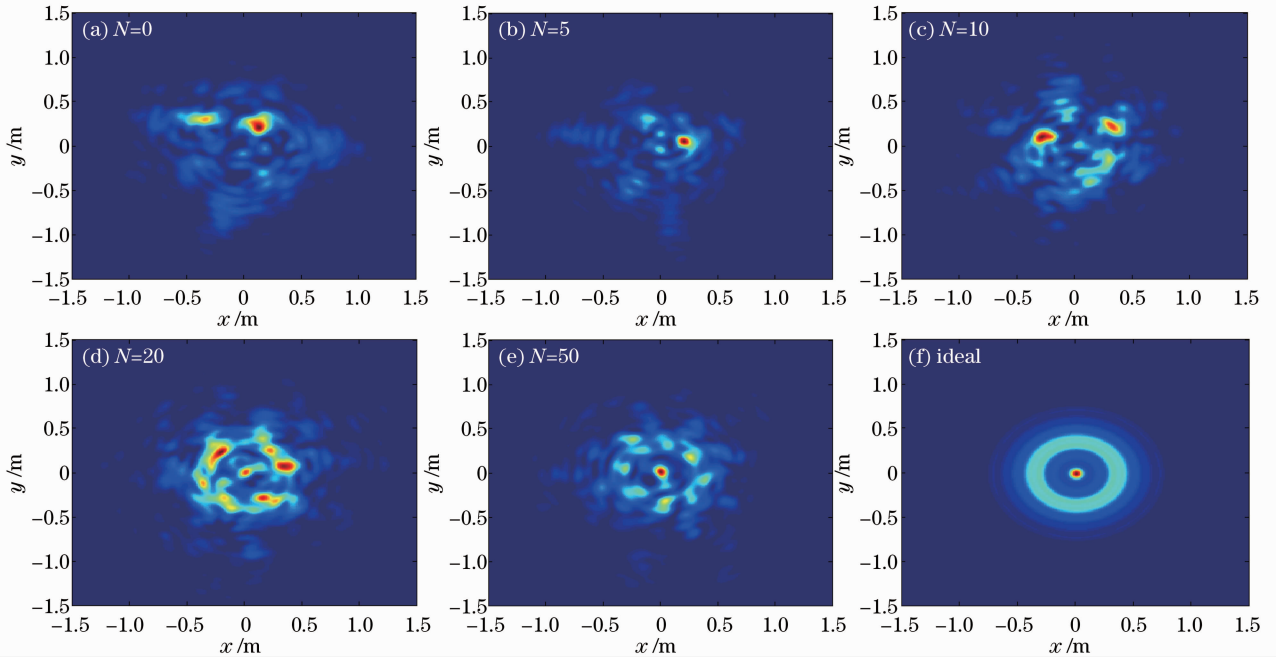


图 7 上行接收光场相对强度分布

Fig. 7 Intensity distribution of the uplink received light field

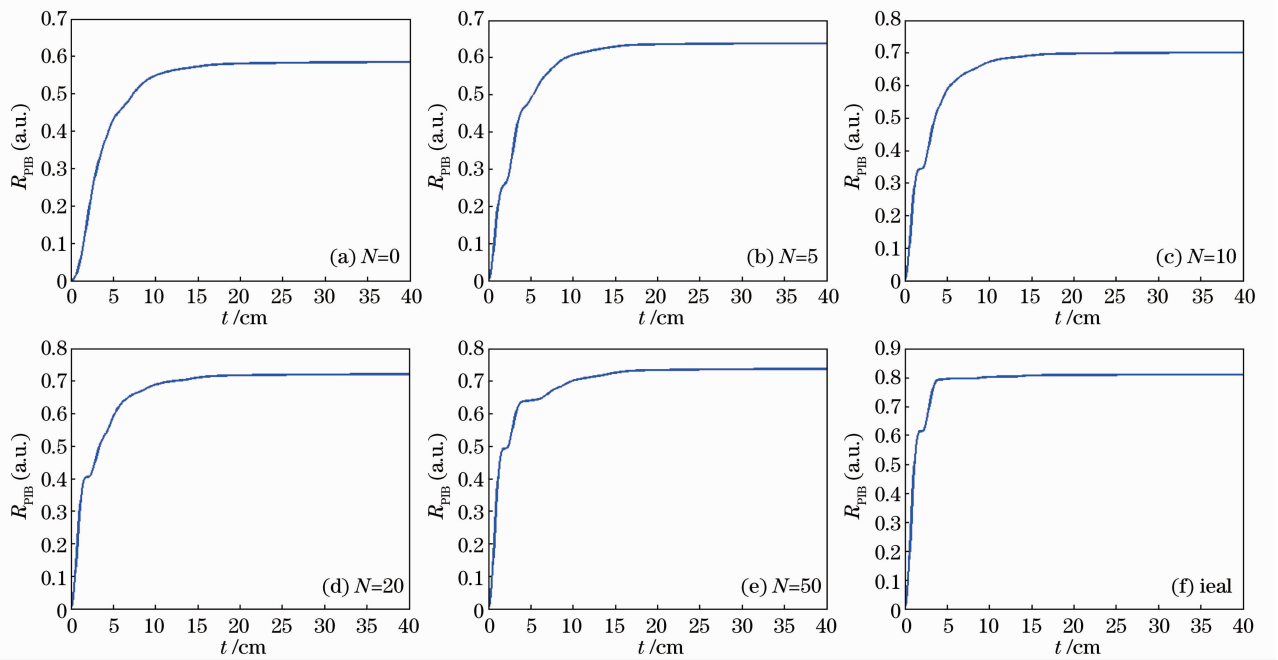


图 8 不同精度条件下目标靶面光斑桶中功率比例曲线

Fig. 8 Curves of power proportion in bucket at the target under different certain correction precisions

表 1 中继镜系统光束传输性能

Table 1 Performance of beam propagation through the relay mirror system

Correction precision	Uplink power efficiency /%	Power proportion in bucket at $r=0.5 \text{ cm}$ /%
Ideal	81.27	15.85
$N=50$	74.06	12.61
$N=20$	72.40	10.24
$N=10$	70.44	9.26
$N=5$	64.09	6.28
$N=0$	58.82	1.07

计算结果显示,双自适应光学装置对中继镜系统光束传输性能提升具有重要影响,且校正精度越高提升效果越好。双自适应光学装置开环工作时,上行链路能量耦合效率为 58.82%,靶面光斑 0.5 cm桶中功率比例为 1.07%;闭环理想校正时,上行链路能量耦合效率为 81.27%,靶面光斑 0.5 cm桶中功率比例 15.85%。

3.4 中继镜系统优势分析

在理想校正条件下,计算了激光直接对 25 km 目标的作用结果,并与中继镜系统对目标的作用效果进行对比,目标靶面光斑桶中功率比例曲线如图 9 所示。

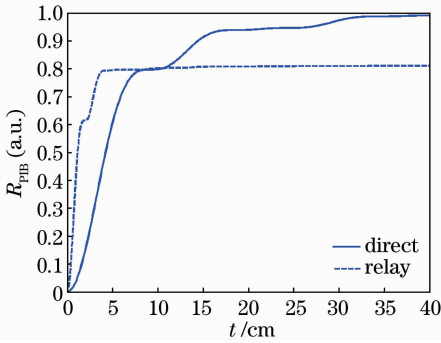


图 9 目标靶面光斑桶中功率比例曲线

Fig. 9 Curves of power preportion in bucket at the target

计算结果显示:中继镜系统目标靶面光斑桶中功率比例曲线随着桶半径的增加迅速增加,桶半径增加至 3.6 cm 时,桶中功率比例保持稳定值 51.27%;激光直接作用时的目标靶面光斑桶中功率比例曲线随着桶半径的增而增加,逐渐趋近于 1,在一定范围内($r < 8.4$ cm)中继镜系统目标靶面光斑桶中功率比例大于激光直接作用时的目标靶面光斑桶中功率比例。上述现象主要原因包括:1) 中继镜系统上行传输过程中具有一定的能量损耗,其目标靶面光斑桶中功率比例的最高值为上行链路能量耦合效率,而激光直接作用时无能量损耗,其目标靶面光斑桶中功率比例的最高值为 1;2) 中继镜系统下行传输过程距离短,目标靶面光斑口径小,而激光直接作用时传输距离相对较远,目标靶面光斑口径相对较大,因而中继镜系统目标靶面光斑桶中功率比例曲线到达稳定值的桶口径较小。

4 结 论

根据中继镜系统双自适应光学装置和上行链路合作信标的结构特点,开展了双自适应光学装置对

中继镜系统光束传输性能影响的理论分析和数值模拟,主要结论包括:1) 位于光源处的自适应光学装置 AO1 宜选用共轭式自适应光学系统,位于飞行平台的自适应光学装置 AO2 宜选用优化式自适应光学系统;2) AO2 对中继镜系统光束传输性能具有重要影响,其存在是必要的;3) 双自适应光学装置对中继镜系统光束传输性能提升具有重要影响,且校正精度越高提升效果越好。计算结果为中继镜系统的设计和论证分析提供了有效参考。

参 考 文 献

- 1 M. Hartman, S. Restaino, J. Baker *et al.*. EAGLE/relay mirror technology development[C]. *SPIE*, 2002, **4724**: 108~115
- 2 Steven G. Leonard. Laser Options for National Missile Defense [R]. Air Command and Staff College Air University, Alabama, April 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 [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Monterey, 2002. 5030-1-11
- 4 Gregory E. Glaros. Broad departmental application of directed energy systems[C]. Directed Energy Weapon SMI Conference, The Hatton, London, 2004. 7~28
- 5 Ren Guoguang, Huang Jijin. Major progress of U. S. 2005' high-energy laser technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(6): 5~6
- 任国光, 黄吉金. 美国高能激光技术 2005 年主要进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(6): 5~6
- 6 Edwards A. Duff, Donald C. Washburn. The magic of relay mirrors[C]. *SPIE*, 2004, **5413**: 137~144
- 7 St. Louis MO. Boeing Demonstrates Aerospace Relay Mirror System[R/OL]. [2006-08-18]. <http://www.spacewar.com/reports/>
- 8 Ren Guoguang. Current situation and development trend of high energy laser weapon [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(9): 62~69
- 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): 67~68
- 9 Zhou Renzhong, Yan Jixiang. Adaptive Optics Theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 22~123
- 周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 22~123
- 10 Zhou Renzhong. Adaptive Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996. 5~253
- 周仁忠. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996. 5~253
- 11 Yang Huizhen, Cai Dongmei, Chen Bo *et al.*. Analysis of adaptive optics techniques without a wave-front sensor and its application in atmospheric laser communications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 680~684
- 杨慧珍, 蔡冬梅, 陈波等. 无波前传感自适应光学技术及其在大气光通信中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 680~684
- 12 Wang Xiaolin. Study on Optimization Algorithm Based Adaptive Optics in Laser Phased Array [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. 5~64
- 王小林. 激光相控阵中的优化式自适应光学研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011. 5~64
- 13 Wu Huiyun. Study on Beam Propagation and Control Optimization in a Relay Mirror System[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. 50~61

- 吴慧云. 中继镜系统光束传输与控制优化研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012. 50~61
- 14 Zhang Shuai, Qiao Na, Zhang Bin *et al.*. Propagation properties of annular beams in atmospheric turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3103~3109
张 帅, 乔 娜, 张 彬 等. 环状光束在大气湍流中的传输特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3103~3109
- 15 Xu Jianwu, Wang Hongxing, Sun Xiaoming *et al.*. Method of establishing channel model in multiple-beam transmission and reception FSO systems[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0305009
徐建武, 王红星, 孙晓明 等. 一种多光束发射和接收 FSO 系统的信道建模方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0305009
- 16 Wu Wuming, Ni Yu, Ren Yajie *et al.*. Research progress of scintillations for laser array beams in atmospheric turbulence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(7): 070008
吴武明, 宁 禹, 任亚杰 等. 阵列光束在湍流大气中传输的光强闪烁研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(7): 070008
- 17 Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin *et al.*. Propagation efficiency of various combined beams in turbulence atmosphere[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 733~738
周 朴, 马阎星, 王小林 等. 不同类型合成光束在湍流大气中的传输效率[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 733~738

栏目编辑:李文喆