

用于提高中继镜系统能量耦合效率的光束整形

吴慧云 赵海川 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 光束上行传输能量耦合效率是中继镜系统的关键因素之一,通过利用随机并行梯度下降算法(SPGD)优化出射光束的相位分布实现接收光场的光束整形,提高系统的能量耦合效率。建立了双望远镜系统模型并计算了 0.1~0.5 m 双望远镜系统垂直传输 10 km 和 30 km 的结果。结果表明,通过整形,中继镜系统的上行传输能量耦合效率得到了有效的提高。

关键词 中继镜系统;上行传输;光束整形;能量耦合效率;数值模拟

中图分类号 TJ95; TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0102006

Beam Shaping Used to Improve Power Coupling Efficiency of the Relay Mirror System

Wu Huiyun Zhao Haichuan Wu Wuming Xu Xiaojun Chen Jinbao Zhao Yijun

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

Abstract Power coupling efficiency of beam uplink propagation is a critical factor of the relay mirror system. By optimizing the optical phase at the launching telescope, the intensity distribution at the receiving telescope can be shaped and power coupling efficiency of the two-telescope system can be improved. Model of the two-telescope system is established, results of the 0.1~0.5 m two-telescope system with 10 km and 30 km propagation distance are calculated. The results show that the power coupling efficiency can be significantly improved.

Key words relay mirror system; uplink propagation; beam shaping; power coupling efficiency; simulation

OCIS codes 010.1300; 220.4830; 140.3300; 140.3325

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激光系统作战概念^[1~8]。中继镜系统将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]。光束上行传输能量耦合效率是中继镜系统的关键因素之一。美国波音公司^[11,12]2006年6月在空军星火光学靶场演示实验采用的 ARMS 样

机的能量耦合效率仅为 50%^[11,12]。中继镜系统上行传输过程的能量损耗主要由两方面原因引起:1)接收望远镜次镜对光束的阻挡;2)衍射作用造成光束传播到接收口径之外引起的损耗。上行传输过程中,接收光场的能量分布可以通过控制发射场的相位分布来改变。因此,通过优化出射光束的相位分布可以实现接收光场的光束整形,进而提高系统上行传输过程的能量耦合效率。

2 理论分析

用于中继镜系统光束上行传输与接收的双望远镜系统模型如图 1 所示, z 为传输距离, H 为接收望

收稿日期:2010-03-02;收到修改稿日期:2010-06-10

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

远镜的垂直距离, ζ 为天顶角, U_0 为出射光场, U 为接收光场。光束在湍流大气中传输时, 湍流的影响

作用可以用等效相位屏来计算^[13,14]。结合惠更斯-菲涅耳衍射公式, 接收光场 $U(x, y)$ 可表示为^[15]

$$U(x, y) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \iint U_0(\epsilon, \eta) \exp[j\psi_1(\epsilon, \eta)] \exp[j\psi_2(\epsilon, \eta)] \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x-\epsilon)^2 + (y-\eta)^2]\right\} d\epsilon d\eta, \quad (1)$$

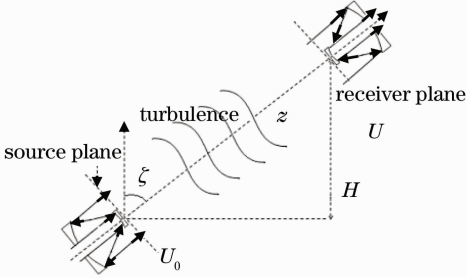


图 1 双望远镜系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-telescope system

式中 $U_0(\epsilon, \eta)$ 为光源光场分布, $\psi_1(\epsilon, \eta)$ 为上行传输过程的湍流相位屏分布, $\psi_2(\epsilon, \eta)$ 为系统相位校正量。中继镜系统上行传输过程的能量耦合效率可表示为

$$\eta = \frac{\int_S I(x, y) dS}{\int_{S_0} I_0(\epsilon, \eta) dS_0}, \quad (2)$$

式中 $I(x, y) = |U(x, y)|^2$ 为接收光场强度分布, $I_0(\epsilon, \eta) = |U_0(\epsilon, \eta)|^2$ 为光源场强分布, S 和 S_0 分别表示接收望远镜和发射望远镜主次镜之间的环形区域。以系统能量耦合效率为目标函数, 通过随机并行梯度下降算法 (SPGD) 控制优化 $\psi_2(\epsilon, \eta)$ 分布, 可以得出最优相位校正量 $\psi_{opt}(\epsilon, \eta)$ 和系统最高能量耦合效率。SPGD 算法的主要控制流程如下^[16]:

- 1) 定义系统优化评价函数 L , 即能量耦合效率 η ;
- 2) 生成随机相位改变量 $\delta\psi_j, j=1, 2, \dots, M$; 计

算评价函数 $L^+ = L(\psi_1 + \delta\psi_1, \dots, \psi_M + \delta\psi_M)$ 和 $L^- = L(\psi_1 - \delta\psi_1, \dots, \psi_M - \delta\psi_M)$ 以及评价函数变化量 $\delta L = L^+ - L^-$;

3) 按照公式 $\psi_j^{n+1} = \psi_j^n + \gamma \delta\psi_j^n \delta\eta$ 更新相位量, 其中 γ 是特定常数, n 是循环次数, 进行第 $n+1$ 次循环迭代;

4) 转入第 2) 步, 继续循环控制, 直至算法结束获得最优 L_{max} 。

3 模拟计算

3.1 参数设置

设定光源为单振幅空心准直光束, 初始相位为 0, 波长 $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$, 系统发射望远镜和接收望远镜均为内径 0.1 m, 外径 0.5 m 的望远镜, 光束垂直上行传输。大气湍流结构常数分布采用 H-V 5/7 模型描述

$$C_n^2(h) = 8.2 \times 10^{-56} V^2(h) h^{10} \exp\left(\frac{-h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(\frac{-h}{1500}\right) + C_n^2(0) \exp\left(\frac{-h}{100}\right), \quad (3)$$

$V(h) = 5 + 30 \exp\{-[(h - 9400)/4800]^2\}$ (4) 式中 h 为距离地面高度, $V(h)$ 是风速, $C_n^2(0)$ 为地表湍流结构常数, 取为 $4.0 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ 。作为两组例子, 传输距离分别取为 10 km 和 30 km。

3.2 计算结果

1) 上行传输过程的湍流相位屏分布如图 2 所示, 湍流无校正条件下 ($\psi_2 = 0$) 上行接收光场的强度分布如图 3 所示。

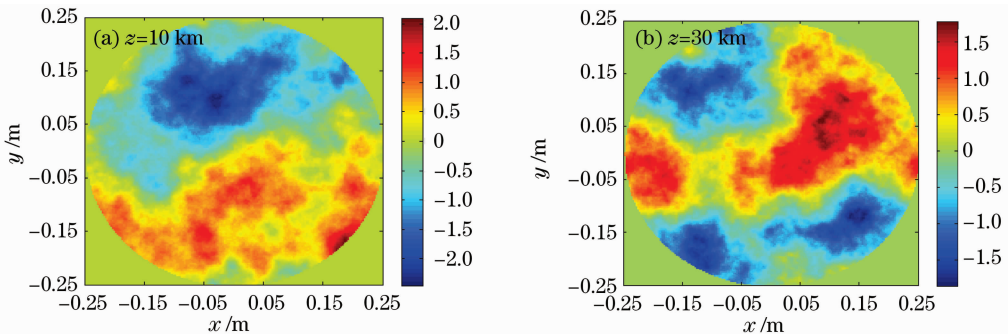


图 2 湍流相位屏分布

Fig. 2 Distribution of phase-screen

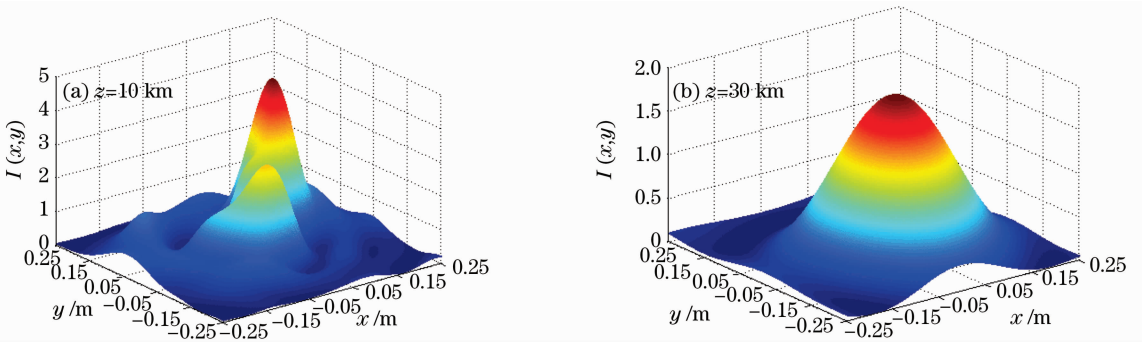


图 3 湍流无校正条件下接收光场的强度分布

Fig. 3 Intensity distribution at the receiving telescope without correction

2) 湍流完全校正条件下 ($\psi_2 = -\psi_1$), 接收光场的强度分布如图 4 所示。

3) 系统优化校正条件下 ($\psi_2 = \psi_{opt}$), 相位校正量分布如图 5 所示, 接收光场的强度分布如图 6 所示。

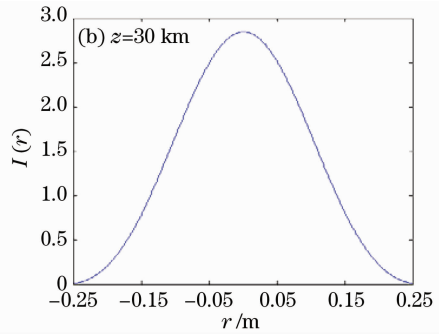
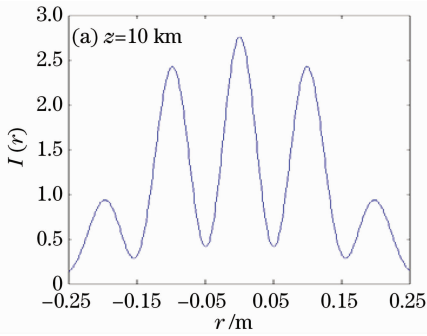


图 4 湍流完全校正条件下接收光场的强度分布

Fig. 4 Intensity distribution at the receiving telescope with completely correction

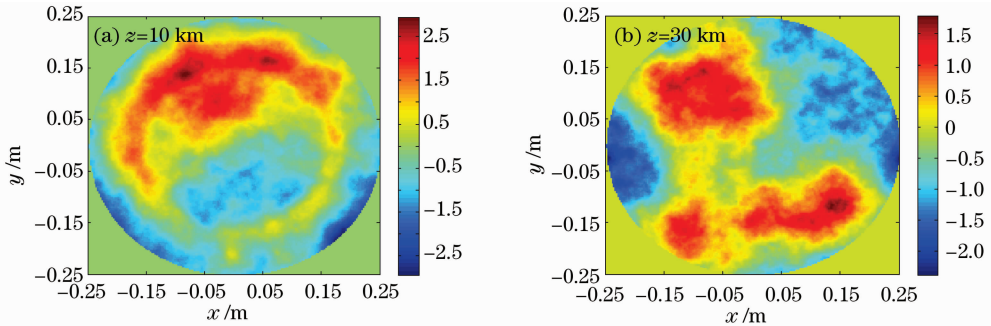


图 5 最优相位校正量分布

Fig. 5 Distribution of the optimal optical phase correction

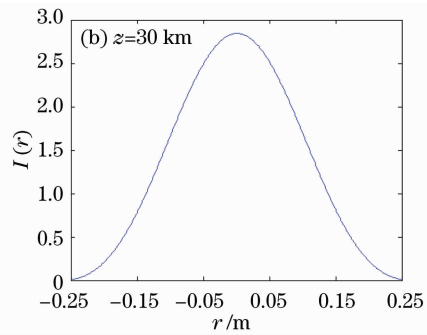
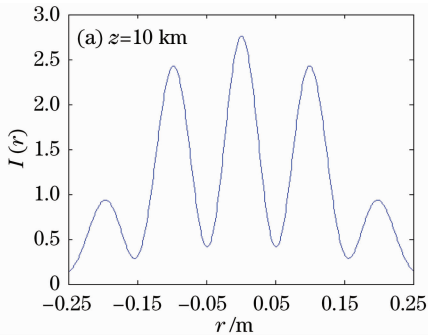


图 6 整形后的接收光场能量分布

Fig. 6 Intensity distribution at the receiving telescope after being shaped

4) 不同参数条件下双望远镜系统能量耦合效率如表 1 所示。

表 1 不同条件下双望远镜系统的能量耦合效率

Table 1 Power coupling efficiency of two-telescope system under different working conditions

Propagation distance / Phase		Power coupling
km	correction	efficiency
10	$\psi_2 = 0$	0.7352
	$\psi_2 = -\psi_1$	0.7598
	$\psi_2 = \psi_{opt}$	0.8480
30	$\psi_2 = 0$	0.4740
	$\psi_2 = -\psi_1$	0.5565
	$\psi_2 = \psi_{opt}$	0.6762

4 结 论

通过优化出射光场的相位分布实现中继镜上行传输接收光场的光束整形,降低双望远镜系统的光束能量损耗,提高中继镜系统的上行传输能量耦合效率。在 H-V 5/7 湍流模型条件下,模拟计算了 0.1~0.5 m 双望远镜系统的上行传输结果,结果显示,通过优化整形,中继镜系统的上行传输能量耦合效率得到了有效的提高。

参 考 文 献

- 1 W. Schneider, Jr., Defense science board task force on directed energy weapon systems and technology applications [R]. Washington, DC, 2007, 5~32
- 2 M. Hartman, S. Restaino, J. Baker *et al.*. Eagle/Relay mirror technology development[J]. *SPIE*, 2002, **4724**: 110~117
- 3 S. G. Leonard. Laser options for national missile defense[R]. Air Command and Staff College Air University, Alabama, April 1998, 75~84
- 4 M. Romano, B. 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 2002, 5030-1-11

- 5 S. L. Johnson. Beam Control of Extremely Agile Relaying Laser Source for Bifocal Relay Mirror Spacecraft [D]. Naval Postgraduate School, Monterey, California, September 2006, 1~2
- 6 G. E. Glaros. Broad departmental application of directed energy systems[C]. Directed Energy Weapon SMI Conference, Hatton, London, 2004, 7~28
- 7 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
- 8 E. A. Duff, D. C. Washburn. The magic of relay mirrors[C]. *SPIE*, 2004, **5413**: 139~143
- 9 Wu Huiyun, Wu Wuming, Chen Jinbao *et al.*. Simulation of effect of 100 kW solid-state laser relay mirror system on 1 km altitude target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1967~1970
吴慧云, 吴武明, 陈金宝 等. 100 kW 固体激光中继镜系统对 1 km 高度目标作用效果模拟[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1967~1970
- 10 St. Louis Mo. Boeing demonstrates aerospace relay mirror system. <http://www.spacewar.com/reports/>, 2006-08-18
- 11 J. Simpson. Tactical laser relay mirror demonstration anticipated before 2011[C]. Inside the Air Force, 2007, 18(41): 3
- 12 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
- 13 J. A. Fleck, J. R. Morris. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere[J]. *Appl. Phys.*, 1976, **10**(2): 129~160
- 14 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun *et al.*. Propagation performance of adaptive phase-locked fiber laser array in turbulent atmosphere [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1442~1447
周 朴, 刘泽金, 许晓军 等. 自适应锁相光纤激光阵列的湍流大气传输性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1442~1447
- 15 Ji Jiarong. Higher Optics Course[M]. Beijing: Science Press, 2007. 203~207
季家镛. 高等光学教程[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 203~207
- 16 M. A. Vorontsov, V. P. Sivokon. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(10): 2745~2758