

基于相干合成的中继镜系统光束上行传输分析

吴慧云¹ 吴武明¹ 熊程平² 许晓军¹ 陈金宝¹ 赵伊君¹

(¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)
(² 中国人民解放军 92016 部队, 广东 广州 510380)

摘要 建立了以相干光束阵列作为光源的中继镜系统模型, 光源相位分布由随机并行梯度下降算法优化控制; 定义了上行接收光束强度分布不均匀影响因子并分析了上行传输过程的评价函数; 在 H-V5/7 模型大气湍流条件下分别计算了以相干光束阵列作为光源和以平台截断光束作为光源的中继镜系统的上行传输效能。结果显示, 利用随机并行梯度算法控制多光束相干合成实现中继镜系统光束上行传输, 系统上行传输能量耦合效率和上行接收光束强度均匀性均得到了有效的提高。对 10 km 上行传输过程, 系统评价函数由 0.6730 提升至 0.8838; 对 30 km 上行传输过程, 系统评价函数由 0.4266 提升至 0.8560。

关键词 激光光学; 中继镜系统; 上行传输; 相干合成; 数值模拟

中图分类号 TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0302013

Analysis of Uplink Propagation in Relay Mirror System Based on Coherent Beams Combination

Wu Huiyun¹ Wu Wuming¹ Xiong Chengping² Xu Xiaojun¹ Chen Jinbao¹ Zhao Yijun¹

(¹ College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)
(² 92016 Department of Chinese People's Liberation Army, Guangzhou, Guangdong 510380, China)

Abstract Model of a relay mirror system with source composed of coherent beam array is established. Phase distribution of the source is optimized by using the stochastic parallel gradient descent algorithm. The influence factor induced by the intensity non-uniformity of receiving beam is defined and the evaluation function of uplink propagation process is theoretically analyzed. Under H-V5/7 turbulent model, performances of uplink propagation in the relay mirror systems with coherent beam array source and flat beam source are calculated. Results show that power coupling efficiency of uplink propagation and intensity uniformity of received beam are both effectively improved by using the coherent multi-beams array controlled by the stochastic parallel gradient descent algorithm. The evaluation function of 10 km uplink propagation is improved from 0.6730 to 0.8838 and the evaluation function of 30 km uplink propagation is improved from 0.4266 to 0.8560.

Key words laser optics; relay mirror system; uplink propagation; coherent combination; simulation

OCIS codes 010.0010; 010.1320; 220.0220; 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高能激光系统技术^[1~8]。中继镜系统将光源与光束控制分离, 能有效降低大气对激光的影响, 拓宽激光系统的作用范围, 因此被冠名为“革命性航空和航天全球激光交战系统”^[1~3]。美国自“星球大战”计划以来一直致力于该技术的研发并进行了一系列实验, 军队转型办公室已把中继镜技术作为美

军的转型技术, 中继镜技术的发展必将影响到未来一代的高能激光系统^[3~10]。中继镜系统通常采用双望远镜系统实现光束上行传输, 在上行传输过程中, 衍射作用造成光束中心能量聚集, 大气湍流导致光斑扩展以及由于接收望远镜次镜阻挡作用和主镜接收口尺寸有限性造成了严重的能量损耗^[10]。采用多光束相干合成技术是提高中继镜系统上行传输能量耦合效率的有效途径, 通过优化控制多光束相

收稿日期: 2010-04-01; 收到修改稿日期: 2010-11-29

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

干发射,不仅可以降低系统能量损耗,还可以减少大气对激光的影响^[11]。本文建立了基于相干合成的中继镜系统模型,详细分析了光束上行传输理论,在H-V5/7湍流模型大气条件下计算了系统上行传输效能,并与相同条件下以平台截断光束作为光源的中继镜系统的上行传输效能进行比较,说明了基于相干合成的中继镜系统的优势。

2 理论分析

2.1 中继镜系统分析

中继镜技术的示意图如图1所示,中继镜系统的主要工作过程为:通过置于高空或太空中的中继镜平台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。

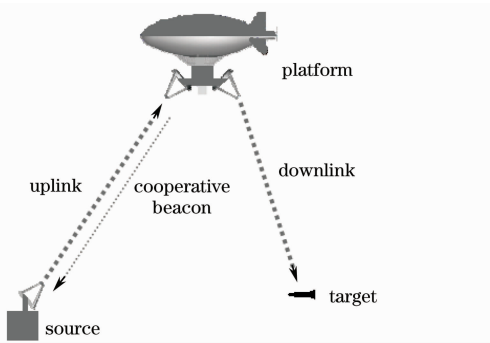


图1 中继镜技术示意图

Fig.1 Schematic diagram of relay mirror technology

目标处的峰值功率密度可表示为

$$I_p = \frac{\pi D^2 P}{4\lambda^2 z'^2} T_1 T_2 T_3 T_4, \quad (1)$$

式中 D 为下行聚焦望远镜口径大小, P 为二次发射光源的功率, λ 为激光波长, z' 为下行传输的距离, T_1 为下行传输过程中热晕引入的斯特雷尔(Strehl)比, T_2 为下行传输过程中大气能量透射率, T_3 为湍流影响引入的斯特雷尔比, T_4 为二次发射光源强度分布不均引入的影响因子, 定义为理想条件下光束聚焦到目标处的峰值强度 I_0 与相同功率强度均匀光束聚焦到目标处的峰值强度 I'_0 之比

$$T_4 = \frac{I_0}{I'_0}, \quad (2)$$

对中继镜系统, 聚焦下行的二次发射光源可表示为

$$U(p, q) = |U(p, q)| \exp\left[-ik \frac{(p-p_0)^2 + (q-q_0)^2}{2F}\right], \quad (3)$$

式中 (p, q) 为二维坐标变量, (p_0, q_0) 为目标点坐标, F 为下行聚焦距离。由衍射公式推导可得焦点处光场强度为

$$I_0 = \left[\frac{1}{\lambda F} \iint_s |U(p, q)| dpdq \right]^2, \quad (4)$$

对应的相同功率均匀光源焦点处光场强度为

$$I'_0 = \left[\frac{s_0}{\lambda F} |U'(p, q)| \right]^2, \quad (5)$$

式中 s_0 代表光源面积大小,

$$|U'(p, q)| = \sqrt{\frac{\iint_s |U(p, q)|^2 dpdq}{s_0}}$$

为相同功率强度均匀光源的振幅。由定义可得

$$T_4 = \frac{\left[\iint_s |U(p, q)| dpdq \right]^2}{s_0 \times \iint_s |U(p, q)|^2 dpdq}. \quad (6)$$

2.2 上行传输分析

常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2所示, z 为传输距离, H 为接收望远镜的高度, ζ 是天顶角, U_0 为出射光场, U 为接收光场。采用多光束相干合成实现光束上行传输过程示意图如图3所示。

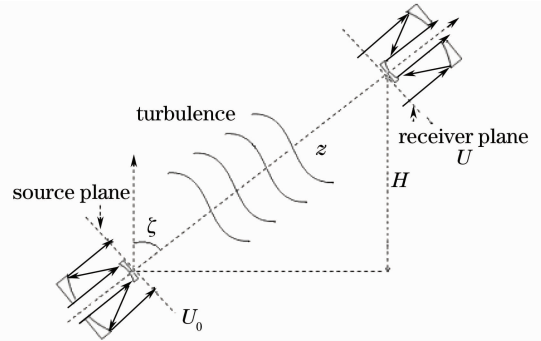


图2 双望远镜结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of a two-telescope system

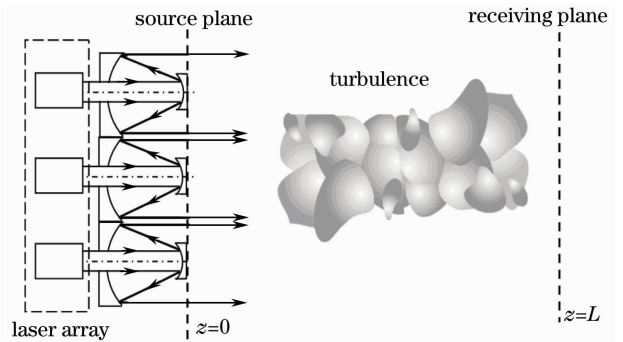


图3 多光束相干合成实现上行传输过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of uplink propagation based on coherent beams combination

在出射平面上[坐标为 (x, y)]放置 N 个以一定方式排列的激光器, 各个激光器发射出来的激光

是完全相干的基模高斯光束。在接收平面上坐标取为 (p, q) ，出射光场可表示为

$$U_0(x, y, 0) = \sum_i^N U_i(x, y, 0), \quad (7)$$

式中 $U_i(x, y, 0)$ 表示第 i 个单位振幅的高斯光束。假定每个高斯光束的束腰均为 ω_0 ，各自中心位置坐

标为 $(a_i, b_i, 0)$ ，因此单个光束可以表示为

$$U_i(x, y, 0) = \exp\left[-\frac{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2}{\omega_0^2}\right] \exp(\psi_i), \quad (8)$$

利用广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式，可得接收平面的平均光强为^[11~13]

$$\langle I(p, q, z) \rangle = \frac{k^2}{(2\pi z)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, 0) U^*(\xi, \eta, 0) \times \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(p-x)^2 + (q-y)^2 - (p-\xi)^2 - (q-\eta)^2]\right\} \langle \exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(\xi, \eta, p, q)] \rangle dx dy d\xi d\eta, \quad (9)$$

$$\text{式中 } \langle \exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(\xi, \eta, p, q)] \rangle = \exp\left\{-\frac{1}{r_0^2}[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]\right\}, \quad (10)$$

$$r_0 = (0.545 C_n^2 k^2 z)^{-3/5}. \quad (11)$$

通过计算可得

$$\langle I(p, q, z) \rangle = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Gamma_{ij}(p, q, z), \quad (12)$$

$$\Gamma_{ij}(p, q, z) = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \exp\left\{-\frac{2}{\omega^2}\left[\left(p - \frac{a_i + a_j}{2}\right)^2 + \left(q - \frac{b_i + b_j}{2}\right)^2\right]\right\} \times \exp\left\{\frac{ik\omega_0^2 \tau_1}{2\omega^2 z}[(a_i - a_j)(a_i + a_j - 2p) + (b_i - b_j)(b_i + b_j - 2q)]\right\} \exp(\psi_i - \psi_j) \times \exp\left\{-\frac{\tau_2}{2\omega^2}[(a_i - a_j)^2 + (b_i - b_j)^2] + \frac{2}{\omega^2}\left[\left(\frac{a_i - a_j}{2}\right)^2 + \left(\frac{b_i - b_j}{2}\right)^2\right]\right\}, \quad (13)$$

$$\text{式中 } \omega = \sqrt{1 + \tau_1 + \tau_2} \omega_0, \tau_1 = 4z^2 / (k^2 \omega_0^4), \tau_2 = 8z^2 / (k^2 \omega_0^2 r_0^2).$$

2.3 优化控制算法分析

2.3.1 评价函数

中继镜系统平台接收的上行光束在系统相位校正后，需要进一步下行聚焦传输，光束的能量分布不均匀对目标的作用效果会产生影响，因此，在优化控制过程中取控制评价函数 L 为能量耦合效率 η 与二次光源强度分布不均匀影响因子 T_4 的乘积：

$$L = \eta \times T_4, \quad (14)$$

$$\text{式中 } \eta = \iint_s I(p, q) dp dq / \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(p, q) dp dq, \quad (15)$$

将(14), (15)式代入(1)式可得

$$I_p = \frac{\pi D^2 P_0}{4\lambda^2 z^2} T_1 T_2 T_3 \times L, \quad (16)$$

式中 P_0 为初始光源的总功率。

2.3.2 控制算法及流程

随机并行梯度下降 (SPGD) 算法具有收敛速度快、可利用超大规模集成电路硬件实现等优势，在自适应光学、相干合成技术等领域具有广泛的应用^[12, 14]。继镜系统中采用 SPGD 算法优化各子光

源的相位活塞项，优化过程的主要控制流程如下：

- 1) 定义优化评价函数 L ；
- 2) 随机生成相位改变量 $\delta\psi_1, \delta\psi_2, \dots, \delta\psi_M, j = 1, 2, \dots, M$ ；
- 3) 计算 $L^+ = L(\psi_1 + \delta\psi_1, \dots, \psi_M + \delta\psi_M)$, $L^- = L(\psi_1 - \delta\psi_1, \dots, \psi_M - \delta\psi_M)$ 和 $\delta L = L^+ - L^-$ ；
- 4) 按照公式 $\psi_j^{n+1} = \psi_j^n + \gamma \delta\psi_j^n / \delta\eta$ 调整相位量进行第 $n+1$ 次循环迭代， γ 是特定常数， n 是循环次数；
- 5) 转入第 2) 步，继续进行相位调整，直至结束获得最优 L_{\max} 。

3 模型计算

3.1 参数条件

大气湍流结构常数分布采用 H-V5/7 模型描述为

$$C_n^2(h) = 8.2 \times 10^{-56} V(h)^2 h^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + C_n^2(0) \exp(-h/100), \quad (17)$$

式中 $V(h) = 5 + 30\exp\{-[(h - 9400)/4800]^2\}$ 为风速, h 为距离地面高度, $C_n^2(0)$ 为地表湍流折射率结构常数, 取 $4.0 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。系统中望远镜为外径 1.0 m, 内径 0.2 m 的卡塞格林望远镜, 光束垂直上行传输 ($\zeta = 0$), 相干光源为高斯光束, $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$, $\omega_0 = 0.15 \text{ m}$, $N = 6$, 排布方式如图 4 所示, 双望远镜结构中中继镜系统的光源为平台截断光束, 功率与相干光源相同。作为两组例子, 分别取上行传输距离为 10 km 和 30 km。

3.2 计算结果

通过计算, 得出以下结果:

1) 采用双望远镜结构实现上行传输时, 湍流相位屏分布如图 5 所示, 上行接收光束强度分布如图 6 所示。

2) 采用多光束相干合成实现上行传输时, 优化后的上行接收光场强度分布如图 7 所示。

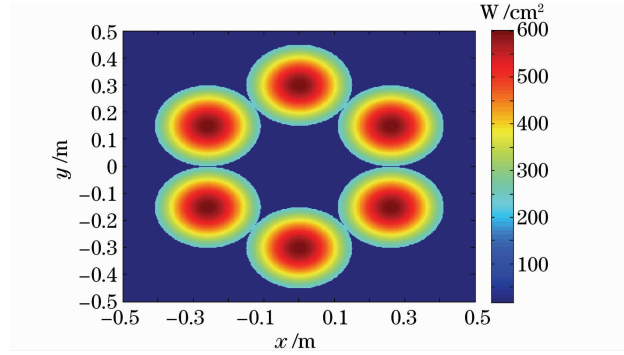


图 4 多光束相干光源的强度分布

Fig. 4 Intensity distribution of source composed of coherent multi-beams

3) 作为比较, 再计算以能量耦合效率 η 为控制评价函数优化后的接收光场强度分布, 结果如图 8 所示。

4) 各种条件下中继镜系统的上行传输效能如表 1 所示。

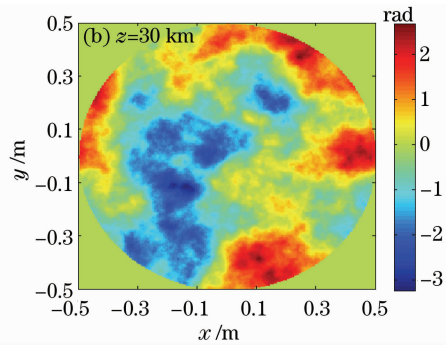
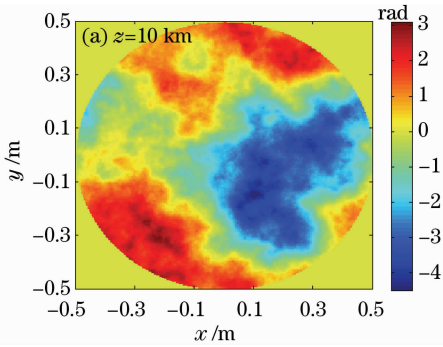


图 5 湍流相位屏分布

Fig. 5 Distribution of phase-screen

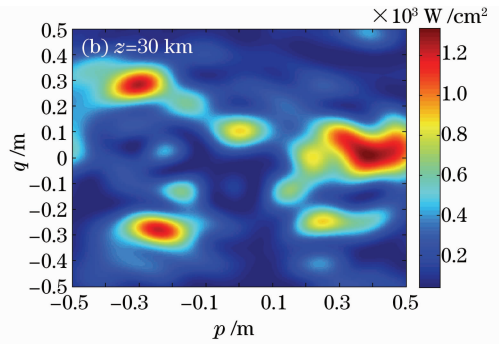
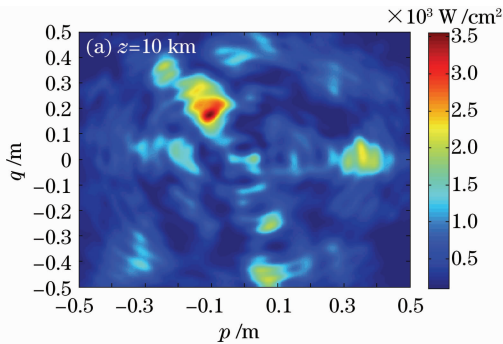


图 6 接收光束的强度分布

Fig. 6 Intensity distribution of receiving beam

4 结 论

分析了基于光束相干合成的中继镜系统上行传输性能, 计算结果显示: 在 H-V5/7 湍流模型条件下, 利用 SPGD 算法控制多光束相干合成实现光束

上行传输能有效地提高中继镜系统上行传输效能: 对 10 km 距离上行传输过程, 效能评价函数由 0.6730 提高至 0.8838; 对 30 km 距离上行传输过程, 效能评价函数由 0.4266 提高至 0.8560。中继

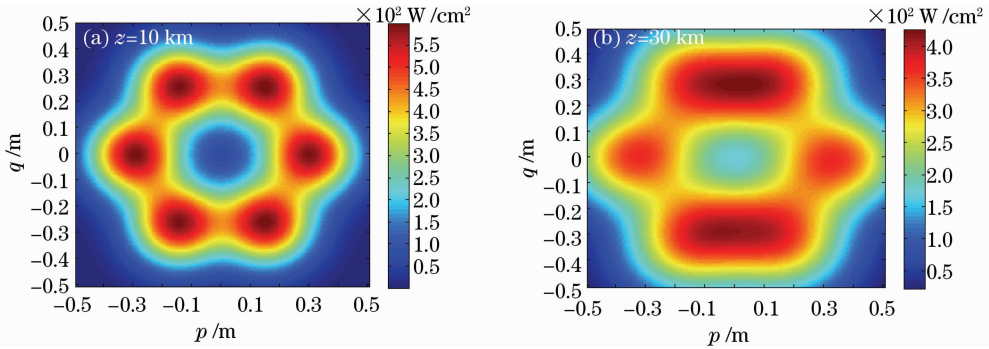


图 7 优化后的接收光束强度分布

Fig. 7 Intensity distribution of receiving beam after optimization

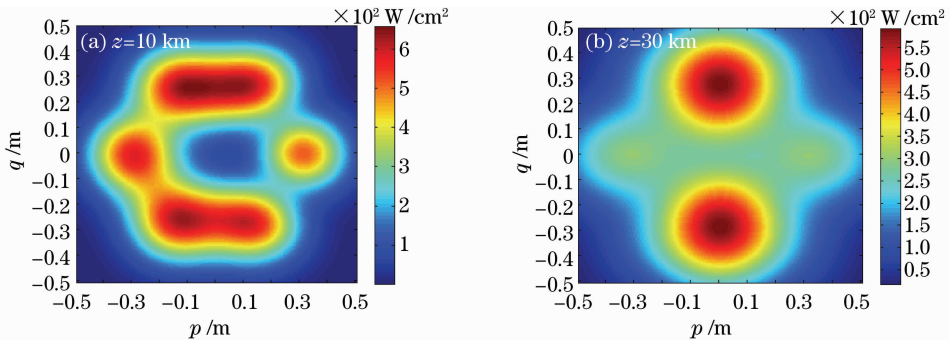


图 8 以能量耦合效率为控制评价函数的接收光束强度分布

Fig. 8 Intensity distribution of received beam using power coupling efficiency as the evaluation function

表 1 不同条件下系统的上行传输效能

Table 1 Performances of uplink propagations under different conditions

Conditions	z /km	η	T_4	$\eta \times T_4$
Uplink propagation based on two-Cassegrain-telescopes system	10	0.7601	0.8854	0.6730
	30	0.6030	0.7075	0.4266
Uplink propagation based on coherent beams combination with the evaluation function $L = \eta \times T_4$	10	0.9559	0.9246	0.8838
	30	0.8780	0.9749	0.8560
Uplink propagation based on coherent beams combination with the evaluation function $L = \eta$	10	0.9567	0.9147	0.8751
	30	0.8871	0.9513	0.8438

镜平台接收的上行光束经相位校正后,将作为新光源下行聚焦传输,因此在上行传输优化过程中评价函数取能量耦合效率 η 与接收光场强度分布不均匀影响因子 T_4 的乘积,当系统以能量耦合效率($L = \eta$)作为评价函数时,计算结果略低于整体优化结果,但幅度不大,可作为近似最优解。

参 考 文 献

1 Edwards A. Duff, Donald C. Washburn. The magic of relay mirrors [C]. *SPIE*, 2004, **5413**: 139~143
 2 M. Hartman, S. Restaino, J. Baker *et al.*. Eagle/relay mirror technology development [C]. *SPIE*, 2002, **4724**: 110~117
 3 Scott L. Johnson. Beam Control of Extremely Agile Relaying Laser Source for Bifocal Relay Mirror Spacecraft [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2006. 1~2
 4 Steven G. Leonard. Laser options for national missile defense [R]. Alabama: Air Command and Staff College Air University, 1998, 75~84

5 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, CA, 2002, 5030-1-11
 6 Gregory E. Glaros. Broad departmental application of directed energy systems [C]. Directed Energy Weapon SMI Conference, 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 St. Louis MO. Boeing demonstrates aerospace relay mirror system. <http://www.spacewar.com/reports/>, 2006-08-18
 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 功率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 J. Simpson. Tactical laser relay mirror demonstration anticipated before 2011[R]. Inside the Air Force, 2007, **18**(41): 3
- 11 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
- 12 Zhou Pu. Study on Coherent Beams Combination Technology of Fiber Lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009, 36~52
 周 朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009, 36~52
- 13 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
- 14 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