

# 湍流强度对大气传输光束的相位特性及其相位校正物理极限的影响

韩开 张晓欣 付福兴 贺也洹 张彬

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

**摘要** 运用相位屏近似法计算模拟了激光束通过大气湍流的光场分布。从高频相位比例和相位不连续点数目等角度对畸变光束的相位特性进行了分析,进而利用考虑到变形镜驱动器间交联耦合的高通滤波方法模拟自适应系统对畸变波前的校正作用,建立了畸变光束的相位校正物理极限的预估模型,定量分析了湍流强度和传输距离对校正极限的影响。研究表明:在一定范围内,随着湍流强度的增强及传输距离的增大,畸变波前中高频相位比例明显增加,相位不连续点数目也逐渐增多;激光束通过大气湍流后,其相位校正的效果主要受畸变光束连续相位中的高频相位比例以及相位不连续点数目的共同影响,畸变波前中高频相位比例越大,相位不连续点的数目越多,相位校正效果也越差。

**关键词** 自适应光学;大气湍流;高频相位;相位不连续点;校正效果

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.010101

## Effect of Turbulence Strength on Phase Characteristics and Physical Limit of Phase Correction of Laser Beams in Turbulence

Han Kai Zhang Xiaoxin Fu Fuxing He Yehuan Zhang Bin

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University,

Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** Using phase-screen approximation, the field distribution of laser beams propagating through atmospheric turbulence is calculated and simulated. The wavefront phase of the distorted beam in turbulence is also analyzed in terms of the high-frequency phase proportion and the number of branch points. Furthermore, considering the coupling between deformable mirror actuators, the model for estimating the physical limit of phase correction is built up by using the method of high-pass filtering including a smoothing factor of mirror actuator. The influence of turbulence intensity and propagation distance on the physical limit of phase correction is analyzed quantitatively. The results show that in a certain range, the proportion of high frequency in distorted phase increases obviously and the number of branch points grows gradually with the increase of turbulence intensity and propagation distance; the correction effect of laser beams in turbulence would be influenced mainly by the proportion of high-frequency in distorted phase and the number of branch points, and the greater the proportion of high frequency phase or the more the number of branch points is, the worse the correction effect of adaptive system would be.

**Key words** adaptive optics; atmospheric turbulence; high-frequency phase; phase branch point; correction effect

**OCIS codes** 010.1080; 010.1330; 010.3310

## 1 引言

激光在大气中传输时,由于受到大气湍流效应的影响,致使到达目标的光斑扩展,能量集中度下降,并可能出现一些振幅近似为零的点,在这些点处的相位存在 $2\pi$ 的不确定性,称为相位不连续点<sup>[1,2]</sup>。受湍流扰

**收稿日期**: 2012-09-28; **收到修改稿日期**: 2012-10-06; **网络出版日期**: 2012-11-21

**基金项目**: 中国科学院自适应光学重点实验室基金(LAOF201101)和四川大学优秀青年学者科研基金资助课题。

**作者简介**: 韩开(1988—),男,硕士研究生,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: hankai2000@126.com

**导师简介**: 张彬(1969—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事高功率激光技术、光束传输变换和控制、非线性光学等方面的研究。E-mail: zhangbinff@sohu.com(通信联系人)

动的影响,传输光束波前会发生畸变,进而导致光束质量严重下降,从而使激光的实际应用受到限制<sup>[3,4]</sup>。研究表明<sup>[5]</sup>,大气湍流导致的畸变波前包括两部分:1)连续相位,2)不连续相位。自适应光学技术通过实时探测和校正激光波前受到的大气随机扰动,可以显著改善传输光束的光束质量<sup>[6,7]</sup>。然而,在实际应用中,随着大气湍流强度的增强及传输距离的增大,自适应校正的效果逐渐变差,一方面是由于自适应校正系统中变形镜(DM)对高于其截止频率的畸变波前难以校正<sup>[8]</sup>,另一方面,常规的自适应光学按照最小方差法对波前进行重构,只能复原连续相位,不能完全应用探测器提供的波前信息,因而对光束波前中的不连续相位无能为力<sup>[9]</sup>。因此,有必要对激光束大气湍流相位特性及自适应校正效果的影响因素进行研究和分析。

本文采用随机相位屏的方法对激光束在大气湍流中的传输光场分布进行模拟,并从高频相位比例以及相位不连续点数目等角度对畸变光束的相位特性进行分析。在此基础上,运用含有变形镜驱动器间平滑因子的高通滤波的方法,模拟分析了光学变形镜对畸变光束的校正作用,并详细讨论了湍流强度和传输距离对大气湍流中畸变光束自适应校正效果的影响。

## 2 自适应相位校正的预估模型

自适应光学技术利用波前传感器和光学变形镜等器件对畸变波前进行探测和补偿,从而实现畸变波前的校正,提高激光的光束质量,校正系统原理光路如图1所示。

激光束在大气传输过程中受到大气湍流扰动的影响,其波前将发生畸变。自适应校正系统利用波前传感器对波前畸变进行实时探测,畸变信号再经波前控制器处理后产生控制信号,以驱动变形镜产生与探测到的畸变波前大小相等、符号相反的波前校正量,从而对受到大气湍流扰动影响的畸变波前进行实时补偿,最后,利用光学聚焦系统对激光束进行聚焦,在其焦面上形成远场分布,以观察校正效果。

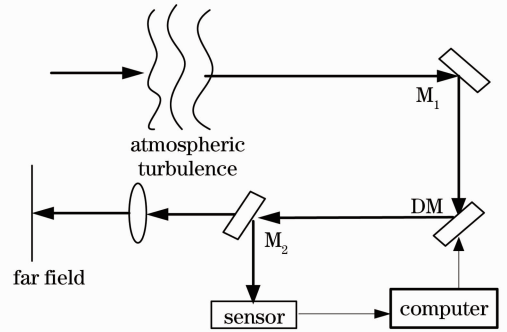


图1 自适应校正系统示意图

Fig.1 Schematic illustration of adaptive correction system

根据广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式,在聚焦透镜的焦平面上,激光束的远场分布可表示为

$$U_2(x_2, y_2) = \left(-\frac{i}{\lambda f}\right) \exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda}(d_1 + f)\right] \iint U_1(x_1, y_1) \exp\left\{\frac{\pi i}{\lambda f} \left[\left(1 - \frac{d_1}{f}\right)(x_2^2 + y_2^2) - 2(x_1 x_2 + y_1 y_2)\right]\right\} dx_1 dy_1, \quad (1)$$

式中  $U_1(x_1, y_1)$  为激光束在变形镜处的光场分布,  $d_1$  为变形镜到聚焦透镜之间的距离,  $f$  为透镜的焦距。

已有的研究表明,在自适应校正过程中,光学变形镜可将光束畸变相位中的低频相位滤除,而让高频成分通过。因此,其校正作用可等效于高通滤波过程,运用高通滤波的方法可模拟畸变光束的相位校正,并对校正的物理极限进行预估。利用传统的“0-1”滤波函数模拟变形镜的校正作用时,理想情况下可将低于截止频率的低频畸变波前完全滤除,而使高于截止频率的高频畸变波前完全保留。然而,考虑到在实际校正过程中,变形镜驱动器单元之间存在交联耦合,故可将描述校正作用的滤波函数表示为<sup>[10,11]</sup>

$$H(\mathbf{v}) = 1 - \exp[-0.693(2d\mathbf{v})^b], \quad (2)$$

式中  $\mathbf{v}$  为频率域的空间频率向量,  $d$  为变形镜驱动器间距,自适应光学系统的空间截止频率  $\nu_0 = 1/(2d)$ <sup>[11]</sup>,上标  $b$  为与变形镜驱动器之间的耦合系数有关的平滑因子。

经过变形镜的相位滤波校正作用后,透镜焦面上的远场光场分布同样可用(1)式表示,只是式中的  $U_1$  变为

$$U'_1(x_1, y_1) = |U_1(x_1, y_1)| \exp[-i\varphi(x_1, y_1, \Delta\nu)], \quad (3)$$

式中  $\Delta\nu$  为滤波截止频率,  $\varphi(x_1, y_1, \Delta\nu)$  为滤波后的调制相位。

## 3 数值模拟与分析

### 3.1 大气湍流中光束相位特性分析

采用功率谱反演法产生符合 Kolmogorov 统计规律的大气湍流随机相位屏<sup>[12]</sup>,运用相位屏近似<sup>[13]</sup>来模

拟激光束在大气湍流中的传输过程,其计算模拟方法如下:将传输路径 $z$ 分为 $n$ 段,每一段距离为 $\Delta z = z/n$ 。在每一段距离中,近似将该段大气湍流对传输光束造成的影响用一个相屏来近似,并置于本段的开始,如图2所示。当光束通过相屏时,将该段大气湍流引起的相位扰动叠加到光波波前上,再经过传输距离为 $\Delta z$ 的自由空间传输,即可完成本段的光束传输。如此重复,直到终点为止。

激光束由第 $n$ 个屏传输到第 $n+1$ 个屏的计算公式为

$$U[x, y, (n+1)\Delta z] = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \{ U(x, y, n\Delta z) \exp[i\Delta\phi(x, y)] \} \exp \left[ -i \frac{K_x^2 + K_y^2}{2k} \Delta z \right] \right\}, \quad (4)$$

式中 $K_x$ 、 $K_y$ 为相空间的波数, $\Delta\phi(x, y)$ 为大气湍流引起的相位扰动。计算中采用口径为0.2 m、波长为1.315  $\mu\text{m}$ 、遮拦比为1/3的环状光束,大气湍流的内尺度为0.001 m、外尺度为10 m,计算网格为 $256 \times 256$ ,大气湍流相位屏数为20个。大气相干长度 $r_0$ 被广泛用于描述大气湍流效应的强弱:

$$r_0 = 0.185 \left[ \int_{z_0}^{z_0+z} C_n^2(z') dz' \right]^{3/5}, \quad (5)$$

式中 $z$ 为大气通道的传输距离。本文计算中采用 $D/r_0$ 表征湍流效应的强弱( $D$ 为激光的口径),用 $d/r_0$ 描述自适应光学系统的校正能力( $d$ 为变形镜驱动器之间的间距)<sup>[14]</sup>。

图3给出了初始光束在大气湍流中水平传输一段距离后的畸变相位的功率谱密度(PSD)<sup>[15]</sup>分布,图中psd1表示在相干长度 $r_0 = 0.0738$  m的大气湍流中传输1 km(相应的大气折射率结构常数 $C_n^2 = 8 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ )后的相位PSD分布,psd2为在相干长度 $r_0 = 0.0426$  m的大气湍流中传输1 km(相应的 $C_n^2 = 2 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ )后的相位PSD分布,psd3为在相干长度 $r_0 = 0.0738$  m的大气湍流中传输2 km(相应的 $C_n^2 = 4 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ )后相位的PSD分布。

对比psd1、psd2和psd3曲线可知,在相同传输距离下,随着湍流的增强,畸变波前中的高频相位明显增长,而在同等强度的湍流下,随着传输距离的增大,畸变波前中的高频相位也会有所增加。以截止频率 $\Delta\nu = 0.03 \text{ mm}^{-1}$ 为例,经计算,psd1曲线中高于截止频率的高频成分所占比例为8.26%,psd2中高于截止频率的高频成分所占比例为10.37%,psd3中高于截止频率的高频成分所占比例为8.98%。

随着大气湍流强度的增加和传输距离的增大,大气湍流导致的畸变光场中会出现相位不连续点。图4给出了相位不连续点数目随着湍流强度参数 $D/r_0$ 的变化。

分析图4可知,当传输距离一定时,随着湍流强度的

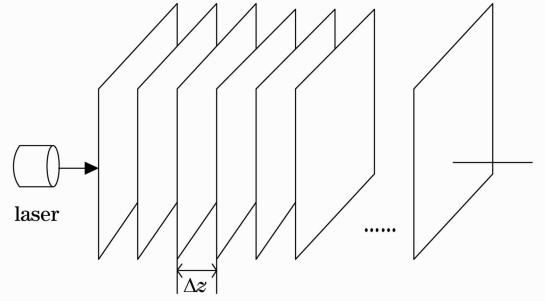


图2 湍流屏模拟示意图

Fig. 2 Schematic illustration of turbulence-screen simulation

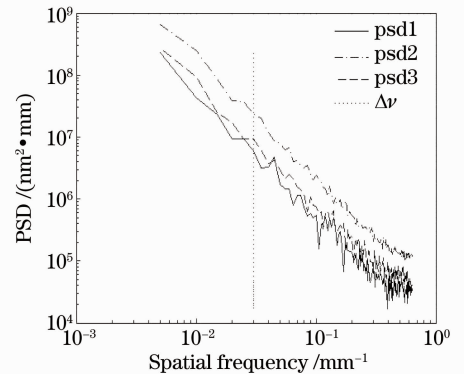


图3 不同湍流强度和传输距离下畸变相位的PSD比较  
Fig. 3 Comparison of PSD curves of distorted phases for different turbulence intensities and propagation distances

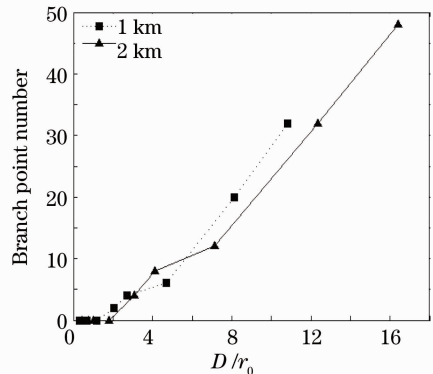


图4 相位不连续点数目随湍流强度参数 $D/r_0$ 的变化  
Fig. 4 Variation of the branch point number with  $D/r_0$

增强,相位不连续点数目逐渐增多。在强湍流下,相位不连续点数目随湍流强度的增强近似呈线性趋势增长,且传输距离越长,湍流强度对相位不连续点数的影响也越大。这是因为湍流越强,湍流介质作用下衍射光波产生干涉相消的地方也越多。然而,在弱湍流下,相位不连续点数目很少甚至没有,且随着传输距离的变化,相位不连续点的数目变化幅度也较小。

### 3.2 影响自适应校正效果因素分析

图 5(a)给出了初始环状光束在相干长度  $r_0=0.0738$  m 的大气湍流中水平传输 1 km 后的远场光强分布。采用考虑到变形镜驱动器间交联耦合的高通滤波方法来模拟变形镜对经过大气湍流后光束畸变波前的校正作用,校正后的远场光强分布如图 5(b)所示。计算所用参数为:采样网格  $256 \times 256$ ,变形镜的驱动器间距  $d=16.4$  mm<sup>[16]</sup>(对应的截止频率为  $0.03$  mm<sup>-1</sup>),滤波函数的平滑因子  $b=0.12$ 。

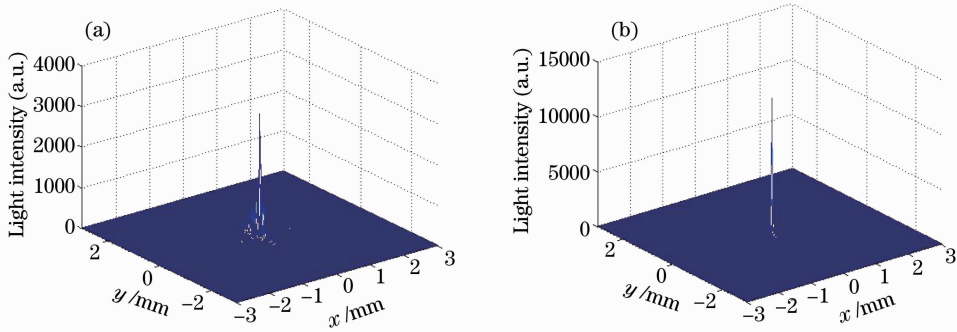


图 5 远场光强分布。(a) 校正前;(b)校正后

Fig. 5 Intensity distributions in far field. (a) Before correction; (b) after correction

对比图 5 可知,未校正时的远场能量较为分散,存在明显的散斑,且峰值强度较低;经过自适应相位校正后,光斑尺寸明显减小,远场能量更为集中,峰值光强也得到提高,光束质量显著改善。

#### 3.2.1 湍流强度对校正效果的影响

保持湍流空间传输距离 1 km 不变,当相干长度  $r_0$  变为 0.0426 m 时,对经过大气湍流后的畸变波前进行校正,校正前后的远场光强分布如图 6 所示。

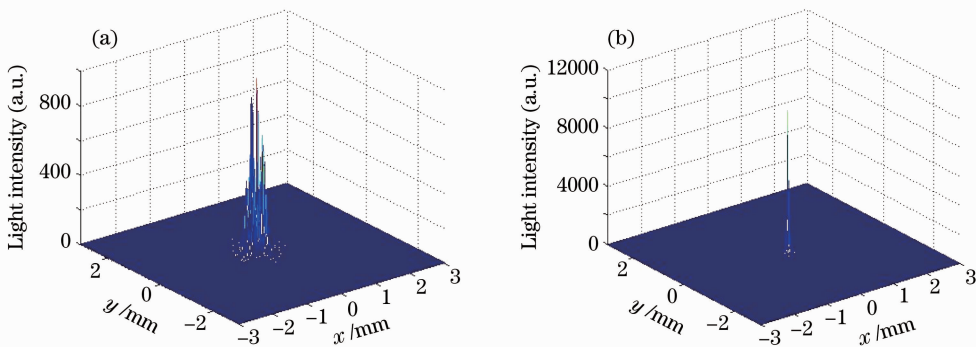


图 6  $r_0=0.0426$  m 时远场光强分布。(a) 校正前;(b)校正后

Fig. 6 Intensity distributions in far field when  $r_0$  is 0.0426 m. (a) Before correction; (b) after correction

分析图 6 可知,当湍流强度增大时,未经校正的远场峰值强度明显降低,远场能量更为分散,且利用相同的自适应系统进行相位校正后,其远场光强峰值也较湍流强度更弱的情况有所降低,校正效果变差。校正效果可通过光束质量  $\beta$  因子<sup>[17]</sup>定量描述, $\beta$ 因子定义为实际光束的远场光斑半径与理想光束的远场光斑半径的比值,对于中心遮挡为  $1/3$  的环状光束,其一倍衍射极限半径内包含总能量的 65.4%,则  $\beta$  因子可表示为

$$\beta = \frac{r}{1.0977\lambda f/D}, \quad (6)$$

式中  $D$  为衍射孔径的直径, $f$  为透镜焦距, $\lambda$  为光波长。

经计算,当  $r_0=0.0738$  m 时,校正前后光束质量  $\beta$  因子的值分别为 4.46 和 2.13,而当  $r_0$  变为 0.0426 m

时,校正前后  $\beta$  因子分别为 7.31 和 4.06,说明随着大气湍流强度的增强,经大气湍流扰动后的激光束的畸变程度加剧,光束质量变差,其自适应校正的效果也明显变差。

### 3.2.2 传输距离对校正效果的影响

保持大气相干长度  $r_0=0.0738$  m 不变,当湍流空间传输距离为 2 km 时,对经过大气湍流后的畸变波前进行校正,校正前后的远场光强分布如图 7 所示。

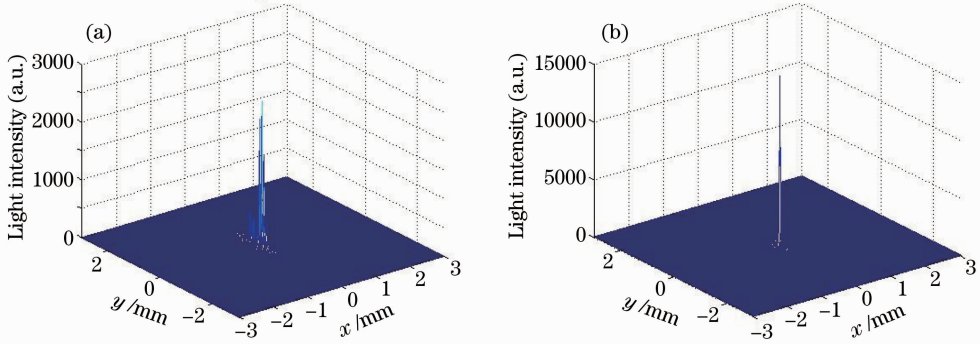


图 7 湍流空间传输 2 km 时远场光强分布。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 7 Intensity distributions in far field when the propagation distance is 2 km. (a) Before correction; (b) after correction

比较图 5 和图 7 可知,尽管在大气相干长度相同的情况下,随着湍流空间传输距离的增加,相位校正前的远场峰值强度会有所降低,而校正后的光束质量仍然得到了明显的改善。经计算可知,当湍流空间传输距离为 2 km 时,校正前的远场光束  $\beta$  值为 4.62,校正后的  $\beta$  值为 2.24。与湍流空间传输距离为 1 km 时相比,校正前、后的  $\beta$  值均有所增大,这是由于随着传输距离的增加,虽然在相同湍流强度条件下湍流引起的光束质量退化程度接近,但由于传输距离增大,衍射引起的光束扩展会明显增大,从而导致远场能量集中度降低,进而对相位校正效果造成一定的影响。

图 8 给出了发射口径一定时,激光束经大气湍流空间校正前、后  $\beta$  值随湍流强度的变化关系。

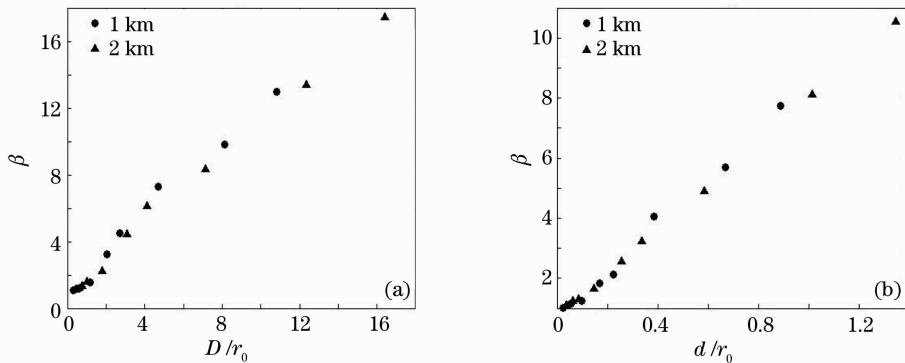


图 8 湍流强度对光束质量的影响。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 8 Effect of turbulence strength on  $\beta$ . (a) Before correction; (b) after correction

分析图 8 可知,随着湍流强度的增强,校正前、后的  $\beta$  值将经历一个从缓慢增加到近似线性增大的变化过程,并且当湍流很弱时,传输距离的大小对校正效果没有明显的影响。然而,当湍流增强时,传输距离对校正前后  $\beta$  值的影响越来越大。此时,传输距离越长,到达目标处的光束质量越差,自适应校正的效果也逐渐变差。这是因为自适应校正的效果受畸变光束中连续相位(特别是高频成分)及相位不连续点数目共同影响,随着湍流强度的增强及传输距离的增大,畸变波前中高频相位比例明显增加,相位不连续点数目也有所增长,从而使自适应校正的效果变差。



## 4 结 论

采用相位屏的方法模拟大气湍流对传输光束的影响,从高频相位比例和相位不连续点数目等角度对大气湍流中畸变光束的相位特性进行了分析,并运用含有变形镜驱动器间平滑因子的高通滤波方法模拟变形镜对畸变波前的校正作用,建立了畸变光束自适应校正极限的预估模型,详细讨论了湍流强度和传输距离对校正极限的影响。研究表明,在一定范围内,随着湍流强度的增强及传输距离的增大,光束畸变波前中高频相位比例明显增加,相位不连续点数目也逐渐增多;畸变光束中的高频相位比例及相位不连续点数目的共同作用影响大气湍流中畸变相位的自适应校正效果,高频相位比例越大,相位不连续点的数目越多,自适应校正效果也越差。本文结论可为大气湍流中自适应校正效果的影响因素及其校正局限性原因的探究提供参考。

## 参 考 文 献

- 1 D. L. Fried. Branch point problem in adaptive optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(10): 2759~2768
- 2 Fan Chengyu, Wang Yingjian, Gong Zhiben. Detection of branch point in light phase [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1388~1391  
范承玉, 王英俭, 龚知本. 光波相位不连续点的探测[J]. 光学学报, 2001, **21**(11): 1388~1391
- 3 Li Xiaofeng. The Principle and Technology of the Satellite-to-Ground Laser Communication Links [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 138~149  
李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007. 138~149
- 4 Gong Zhiben. Some research progress on high-energy laser propagation in atmosphere [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1998, **15**(2): 114~133  
龚知本. 激光大气传输研究若干问题进展[J]. 量子电子学报, 1998, **15**(2): 114~133
- 5 Ge Xiaolu, Fan Chengyu, Wang Yingjian. Variation of phase branch point number with turbulence strength in laser propagation through atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 1~6  
葛筱璐, 范承玉, 王英俭. 相位不连续点数目随湍流强度的变化[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 1~6
- 6 Jiang Wenhan, Li Huagui. Hartmann-Shack wave-front sensing and wave-front control algorithm [C]. *SPIE*, 1990, **1271**: 82~93
- 7 O. Albert, L. Sherman, G. Mourou *et al.*. Smart microscope: an adaptive optics learning system for aberration correction in multiphoton confocal microscopy [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 52~54
- 8 Fu Fuxing, Zhang Bin. Analysis on effect of wave-front phase distortion correction [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(1): 1~6  
付福兴, 张 彬. 畸变波前相位校正效果分析[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(1): 1~6
- 9 Fan Chengyu, Wang Yingjian, Gong Zhiben. Effect of branch points on adaptive optics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(5): 435~438  
范承玉, 王英俭, 龚知本. 相位不连续点对自适应光学的影响[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(5): 435~438
- 10 R. K. Tyson, D. M. Byrne. The effect of wavefront sensor characteristics and spatiotemporal coupling on the correcting capability of a deformable mirror [C]. *SPIE*, 1980, **228**: 21~25
- 11 Zhang Deliang, Jiang Wenhan, Wu Xubing *et al.*. Compensation effect of an adaptive optics system for atmosphere induced wavefront perturbation II. analysis of the results for light propagation in horizontal atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1372~1379  
张德良, 姜文汉, 吴旭斌 等. 自适应光学对大气扰动波前的补偿效果研究 II. 水平大气传输时的结果分析[J]. 光学学报, 1998, **18**(10): 1372~1379
- 12 B. J. Herman, L. A. Strugala. Method for inclusion of low-frequency contributions in numerical representation of atmospheric turbulence [C]. *SPIE*, 1990, **1221**: 183~192
- 13 Hua Zhili, Li Hongping. Atmospheric turbulence phase screen simulation based on random unit expansion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 05010011  
华志励, 李洪平. 基于随机数据元扩张的大气湍流相位屏数值模拟[J]. 光学学报, 2012, **32**(5): 05010011
- 14 Wang Jianye, Rao Ruizhong, Liu Xiaochun. Comparison of experimental study of atmospheric coherence length [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 64~66  
汪建业, 饶瑞中, 刘晓春. 大气相干长度的对比实验研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 64~66

- 15 Fu Fuxing, Zhang Bin. Recovery of high frequency phase of laser beam with wavefront distortion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 04020091  
付福兴, 张 彬. 激光束畸变波前高频相位的恢复[J]. 中国激光, 2011, **38**(4): 04020091
- 16 Jiang Wenhan, Wang Chunhong, Ling Ning *et al.*. 61 element adaptive optical system [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1998, **15**(2): 193~199  
姜文汉, 王春红, 凌 宁 等. 61单元自适应光学系统[J]. 量子电子学报, 1998, **15**(2): 193~199
- 17 He Yuanxing, Li Xinyang. Analysis of influence of CCD's nonlinear response characterization on measurement results of focal spot and beam quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 04080011  
贺元兴, 李新阳. CCD光电响应非线性特性对激光远场焦斑测量及光束质量计算的影响[J]. 中国激光, 2012, **39**(4): 04080011