文章编号　1674-2915(2013)03-0371-07

自适应光学系统测试中大气湍流的时域模拟

卫沛锋*,刘欣悦,林旭东,张振铎,董　磊
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:建立了大气湍流模拟的时域模型,用于在自适应光学系统的测试中模拟大气湍流的时域变化。讨论了时域模型下随机相位屏平滑帧数和刷新频率与平均风速的关系。结果表明:对表征随机波前的随机相位屏进行时域平滑可使随机波前的变化更符合大气湍流对入射波前连续平滑渐变的影响;随机相位屏的平滑帧数仅与系统口径和大气相干长度相关,而与风速无关;随机相位屏的刷新频率与平均风速成正比,平滑后的刷新频率还与平滑帧数成正比。最后,构造了一套大气湍流模拟装置,应用功率谱分析法对时域模型的有效性进行了验证。

关　键　词:自适应光学;大气湍流;液晶空间光调制器;Zernike 多项式
中图分类号:O439; P425.2　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20130603.0371

Temporal simulation of atmospheric turbulence during adaptive optics system testing

WEI Pei-feng*, LIU Xin-yue, LIN Xu-dong, ZHANG Zhen-duo, DONG Lei
(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)
* *Corresponding author, E-mail: weipeifeng@gmail.com*

Abstract: A temporal model was proposed for simulating the atmospheric turbulence varying with the time in the adaptive optics system testing. The relationship between the number of interpolated frames for the random phase screen, refurbish frequency and the mean wind speed was analyzed. The analysis result demonstrates that it is necessary to smooth the random phase screen for characterizing the temporal gradual variation of the random wavefront in order to make the change of the random wavefront better aligned with the influence of atmospheric turbulence on continuous smoothing gradients of incident wavefront. The interpolated frames of the random phase screen is only related to the aperture diameter and the atmospheric coherence length, but not related to the wind speed, and the refurbish frequency of the random phase screen increases with the mean wind speed, and the refurbish frequency smoothed increases with the number of interpolated frames. A atmospheric

收稿日期:2013-02-11;**修订日期**:2013-04-13
基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(No. 2012AAXXX1003)

turbulence simulator was constructed in laboratory and the analysis of the power spectrum density of experimental result demonstrates that temporal model of the atmospheric turbulence simulation is valid.

Key words: adaptive optics; atmospheric turbulence; liquid crystal spatial light modulator; Zernike polynomial

1 引 言

自适应光学技术能够实时校正大气湍流引起的随机波前畸变,因此该技术在天文观测、激光通讯等领域得到了广泛的应用[1-3]。大气湍流模拟有助于自适应光学系统的设计和性能评估。室外的真实大气湍流无法控制,自适应光学系统的实验成本相对较高,同时实验时间有限。因此,在实验室内方便、准确、可控地实现大气湍流的模拟,对于自适应光学系统的测试显得很有必要。

传统的大气湍流模拟多利用空气或者水形成温度梯度场来产生湍流,此类方法产生的湍流重复性较差、空间频率相对较低,无法实现对大气湍流的定量可重复模拟。目前大气湍流引起的随机波前多通过在液晶空间光调制器(LC-SLM)产生满足 Kolmogrov 湍流理论的随机相位屏来模拟[4-9]。在 LC-SLM 上产生随机相位屏的方法主要分为两类:一类是频率域间接模拟法,通过大气湍流的功率谱密度函数反演得到随机相位屏[6-8];另一类是空间域的直接模拟,利用正交完备的基函数 Zernike 多项式来产生随机相位屏[9-13],但这两类方法产生的随机相位屏都是大气湍流引起的随机波前在空间域上分布的模拟。空域模型产生的随机波前则是满足 Kolmogrov 湍流理论的随机变化,而真实大气湍流引起的随机波前随时间连续平滑渐变。因此,需要考虑大气湍流的时域模拟。Christopher 采用插值法[14]对空域模型的结果进行平滑,以模拟大气湍流在时域上的连续平滑渐变,但未讨论时域模型与对应的大气条件(如风速)之间的关系和平滑帧数的选择等非常重要的问题。

本文主要分析了大气湍流模拟的时域模型,探讨了随机相位屏平滑帧数的选择和刷新频率与平均风速之间的关系。同时,在实验室内构建了一套大气湍流模拟装置,对提出的时域模型进行了验证。

2 大气湍流模拟的时域模型

2.1 大气湍流模拟原理

受大气湍流的影响,到达观测系统的入射波前的幅度和相位均发生了变化,但入射波前幅度的变化不影响目标分辨率,因此一般只考虑入射波前的相位变化。液晶空间光调制器通过改变液晶像素上的驱动电压来改变液晶材料的折射率,从而改变入射光光程,实现对入射波前的相位调制。通过产生符合满足 Kolmogorov 湍流理论的随机相位屏来模拟大气湍流对入射波前的影响。计算机将灰度图像形式的随机相位屏加载到 LC-SLM 上,LC-SLM 的驱动电路将灰度图像转化为对应的驱动电压来实现相位调制。相位调制后的波前相对入射波前产生如加载的随机相位屏所示的相位变化。相应的原理如图1所示。

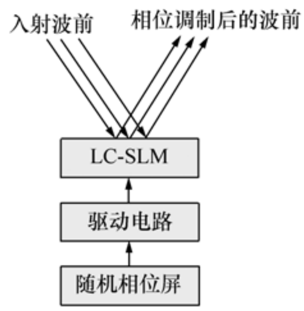


图1 利用 LC-SLM 模拟大气湍流的原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of simulating turbulence using LC-SLM

2.2 大气湍流模拟的空域模型

由于 Zernike 多项式的低阶模式与低阶像差相对应,物理概念清晰,故采用 Zernike 多项式法作为大气湍流模拟的空域模型。受大气湍流影响进入光学系统的随机波前 $\phi(x,y)$ 可以展开为正交的 Zernike 多项式的形式[15]:

$$\phi(r,\theta) = \sum_{i=1}^{i=\infty} a_i \cdot z_i(r,\theta) , \qquad (1)$$

式中:a_i为第 i 项 Zernike 系数,z_i为第 i 项 Zernike 多项式。

采用文献[13]中的 Zernike 多项式法得到满足 Kolmogorov 湍流理论的随机 Zernike 系数,代入式(1),可得满足 Kolmogorov 湍流统计理论的随机相位屏。

2.3　大气湍流模拟的时域模型

图 2 为采用上述的 Zernike 多项式法得到的随机相位屏。从图中可以看出,采用空域模拟的随机相位屏是随机变化的,而在真实的大气湍流影响下,入射的随机波前是连续平滑渐变的,因此需要对空域模型产生的随机相位屏进行时域平滑,以模拟入射的受大气湍流影响的随机波前随时间的变化。Christopher 通过对空域模型产生的随机波前的 Zernike 系数进行插值,然后代入式(1)来模拟随机波前随时间的平滑变化。图 3 为采用 Christopher 的插值法平滑后的随机相位屏。对比图 2 可以看出,平滑后的相位屏相对平滑前明显连续平滑渐变。因此,可以更真实地模拟大气湍流在时域上对观测目标入射波前的影响。

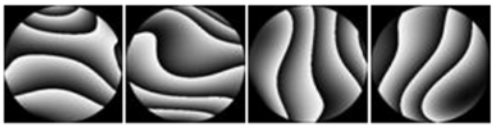


图 2　平滑前的相位屏(从左到右变化)

Fig. 2　Unsmoothed random phase screen

当在 LC-SLM 上进行大气湍流模拟时,如何选择平滑的帧数来模拟大气湍流的连续平滑渐变,如何选择随机相位屏的刷新频率才能表征平均风速等大气气象条件等均需进一步讨论,对此,以下进行了相关分析。

2.3.1　随机相位屏平滑帧数的选择

随机波前是连续平滑渐变的,因此,进行时域平滑就需要确定随机相位屏的平滑帧数。本文选择了大气相干时间作为随机波前变化的最小时域尺度对随机相位屏进行时域平滑。

假设 Kolmogorov 湍流条件下,随机波前的空间结构函数和时间结构函数分别为[15]:

$$D_\phi(r) = 6.88(r/r_0)^{5/3}, \tag{2}$$

$$D_\phi(t) = (t/\tau_0)^{5/3}, \tag{3}$$

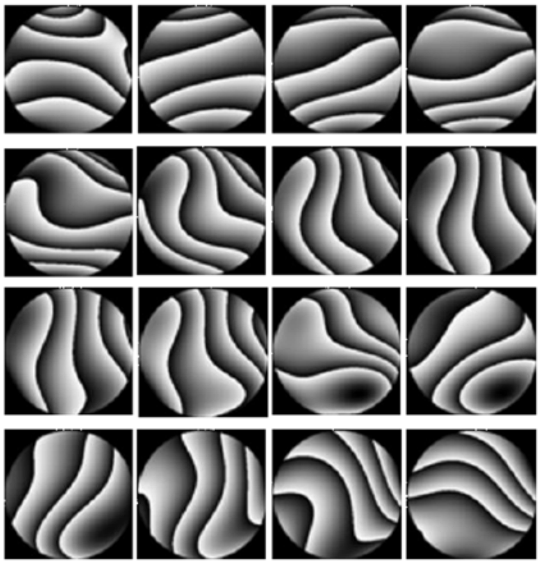


图 3　平滑后的相位屏(从左到右,从上到下变化)

Fig. 3　Smoothed random phase screen

式中:r_0为大气相干长度,τ_0为大气相干时间。

把式(3)代入式(2)可知:

$$t = 3.181\frac{\tau_0 r}{r_0}. \tag{4}$$

τ_0 由 Roddier 于 1982 年在文献[16]中给定:

$$\tau_0 = 0.314\frac{r_0}{v_0}, \tag{5}$$

式中,v_0 为大气湍流平均风速:$v_0 = \left[\dfrac{\int_0^\infty C_n^2(h)V(h)^{5/3}\mathrm{d}h}{\int_0^\infty C_n^2(h)\mathrm{d}h}\right]^{3/5}$。

将式(5)代入式(4)可知:

$$t = \frac{r}{v_0}, \tag{6}$$

式中,当 r 取系统孔径 D 时,$t_D = \dfrac{D}{v_0}$。根据 Taylor 冻结湍流假设,可以认为,t_D为平均风速为 v_0时入射波前完全掠过口径 D 的光电观测系统所需的时间。当经过时间 t_D后,观测目标受大气湍流影响的随机波前就可以用另一个同样满足 Kolmogorov 湍流统计特性的随机波前来表示。

假定随机波前变化的最小时域尺度为 τ_0,经过时间 τ_0 后,此时随机波前的变化不能用另一个同样满足 Kolmogorov 湍流统计特性的随机波前来表示,需要在两个满足 Kolmogorov 湍流统计特

性的随机波前之间进行平滑来表征随机波前随时间的变化。平滑前后的大气湍流的时域变化尺度之比为：

$$N = \frac{t_D}{\tau_0} = 3.18\frac{D}{r_0}. \tag{7}$$

因此，表征随机波前的两帧随机相位屏之间应插入 $N-1$ 帧来平滑，以更真实准确地模拟大气湍流的时域变化。同时，由式(7)可知，此时随机相位屏的平滑帧数仅与观测系统口径和大气相干长度相关，而与风速无关。

2.3.2 随机相位屏的刷新频率与平均风速的关系

由 Taylor 大气湍流冻结假设可知，大气湍流对入射波前的时域影响与风速相关。LC-SLM 通过刷新加载的随机相位屏来模拟入射波前的时域变化，而随机相位屏刷新频率的快慢表征了大气的平均风速对入射波前的时域影响。因此，实际需要确定的是 LC-SLM 上加载的随机相位屏的刷新频率与平均风速之间的关系。

经过时间 t_D 后，随机波前可用另一个同样满足 Kolmogorov 湍流统计特性的随机波前来表示。此时，LC-SLM 上加载的随机相位屏需要进行刷新以表征新的随机波前，相应的刷新频率为 t_D 的倒数。因此，平滑前的随机相位屏的刷新频率为：

$$f_{\mathrm{unsmoothed}} = \frac{1}{t_D} = \frac{v_0}{D}. \tag{8}$$

经过时间 τ_0 后，随机波前的变化不能用另一个同样满足 Kolmogorov 湍流统计特性的随机波前来表示，需要进行时域平滑来模拟大气湍流的时域变化。此时，随机相位屏的刷新频率为 τ_0 的倒数。因此，平滑后的随机相位屏的刷新频率为：

$$f_{\mathrm{smoothed}} = \frac{1}{\tau_0} = \frac{NV_0}{D}. \tag{9}$$

由式(8)和(9)可以看出，平滑前后随机相位屏的刷新频率均与平均风速 v_0 成正比，且平滑后的刷新频率还与平滑帧数成正比。

3 大气湍流模拟实验

针对上述大气湍流模拟的时域模型，在实验室内构建了一套大气湍流模拟实验装置，光路如图4所示。激光经空间滤波器后形成点光源，再经偏振片后变成与 LC-SLM 透偏方向一致的线偏振光，后经透镜 P1 准直后变为平行光，通过分光棱镜入射到 LC-SLM 上。入射光的波前经 LC-SLM 相位调制后再经分光棱镜入射到透镜 P2 上，然后经过光阑和透镜 L1 再次准直后入射到变形镜上。经变形镜反射后入射到透镜 L2 上，后再入射到分光棱镜上。经分光棱镜反射的光进入 CCD 相机成像，而透过分光棱镜的光经透镜 L3 准直后进入 Shack-Hartmann 波前探测器。自适应光学系统的控制器根据波前探测器测得的波前信息控制变形镜，校正湍流对成像质量的影响。

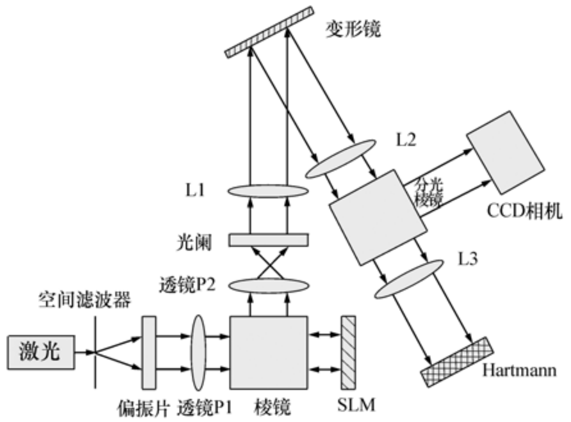


图4 大气湍流模拟的实验光路图

Fig. 4 Path diagram of atmospheric turbulence simulator using LC-SLM

大气湍流模拟实验装置如图5所示。实验选用的 LC-SLM 为 BNS 公司生产的 256×256 的相位型 LC-SLM；变形镜为直径 50 mm 的21单元压电陶瓷变形镜；Shack-Hartmann 波前探测器采样

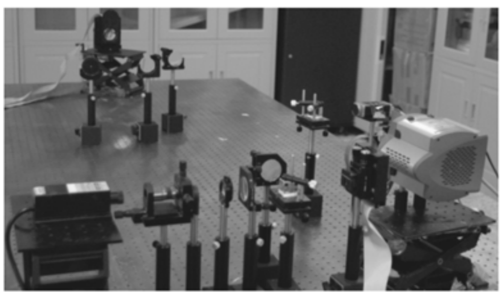


图5 大气湍流模拟实验装置图

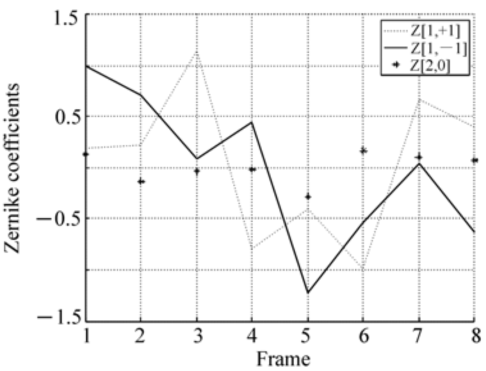
Fig. 5 Schematic diagram of atmospheric turbulence simulator using LC-SLM

时间为 1.98 ms,有效子孔径数为 137。

4　实验结果及分析

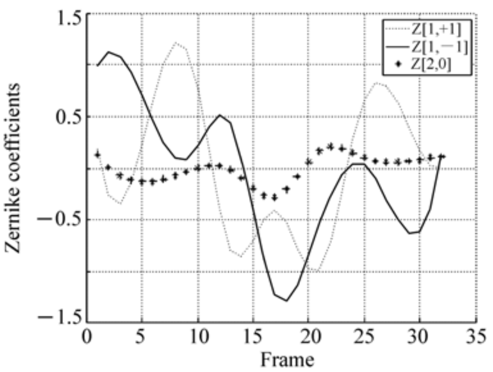
假定观测系统口径 D 为 0.251 2 m,大气相干长度 r_0 为 0.2 m,由式(7)可知 $N = 4$;此时,$f_{\mathrm{unsmoothed}} = 3.98v_0$;$f_{\mathrm{smoothed}} = 15.92v_0$。当平均风速 $v_0 = 1.005$ m/s 时,$f_{\mathrm{unsmoothed}} = 4$ Hz,$f_{\mathrm{smoothed}} = 16$ Hz。格林伍德频率与大气相干时间之间的关系为[17]:$f_G = 0.134/\tau_0$。此时,对应模拟的大气湍流的格林伍德频率为 2.15 Hz。

将平滑前后的随机相位屏加载到 SLM 上,刷新频率分别选定为 4.16 Hz,则此时对应模拟大气湍流的平均风速为 1.005 m/s。平滑前后,前 3 项Zernike 系数随相位屏帧频的变化情况如图 6 所示。对比可以看出,平滑后,前 3 项 Zernike 系数时域变化显得更平滑,更符合真实大气湍流时域变化情况。真实大气湍流为入射随机波前带来的连续平滑渐变,表现在功率谱上就是高频能量的下降。为验证上述时域模型的有效性,对 S-H 波前探测器探测到的波前均方根(Root Mean Square,RMS)进行了功率谱分析,如图 7 所示。从图中可以看出,相位扰动的时间功率谱在平滑前后其高频段均随频率的 −8/3 次方下降,满足 Kolmogorov 湍流理论,但高频段平滑前后区分不大。由相位扰动的时间功率谱[15]可知,高低频的分界频率为 2.820 6 Hz。计算可知,平滑前,高于分界频率的能量占 12.7‰,而平滑后占 8.8‰;高频能量相对下降了 31%。平滑后高频能量的下降说明:对随机相位屏进行时域平滑,可以实现大气湍流时域上的连续平滑渐变模拟。



(a) 平滑前

(a) Before smoothing



(b) 平滑后

(b) After smoothing

图 6　平滑前后,前 3 项 Zernike 系数随相位屏帧频的变化情况

Fig. 6　First three Zernike coefficients varying with the phase screen before and after smoothings

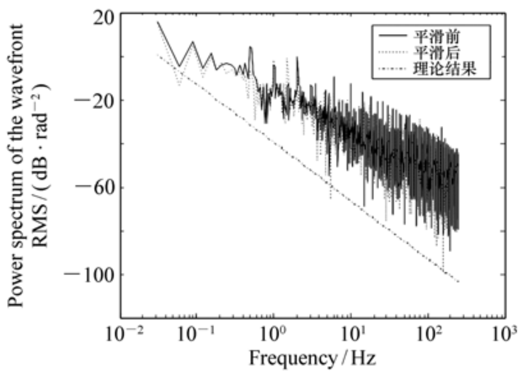


图 7　平滑前后波前 RMS 的功率谱分析

Fig. 7　PSD analysis of RMS of unsmoothed and smoothed wavefronts

5　结　论

本文提出了一种大气湍流模拟的时域模型,以模拟大气湍流的时域变化情况。讨论了时域模型下随机相位屏平滑帧数的选择和刷新频率与平均风速的关系。结果表明:有必要在两帧表征随机波前的随机相位屏之间进行平滑,使随机波前更符合真实大气湍流的时域变化;当假定随机波前变化的时域最小尺度为大气相干时间时,随机相位屏的平滑帧数仅与观测系统口径和大气相干长度相关,而与风速无关;随机相位屏的刷新频率

与平均风速的成正比，且平滑后刷新频率还与平滑帧数成正比。另外，构建了一套大气湍流模拟实验装置，应用功率谱分析的方法对波前均方根进行了分析。实验结果表明：对表征随机波前的随机相位屏进行时域平滑，可以模拟大气湍流引起的随机波前的时域连续平滑渐变。大气湍流的时域模拟可以在实验室内更真实地模拟大气湍流的变化，为自适应光学系统提供更为方便、准确、可控的测试平台。

参考文献：

[1] 曹召良，李小平，宣丽，等. 液晶自适应光学的研究进展[J]. 中国光学，2012，5(1)：12-19.
CAO ZH L，LI X P，XUAN L，*et al.*. Recent progress in liquid crystal adaptive optical techniques[J]. *Chinese Optics*，2012，5(1)：12-19. (inChinese)

[2] 刘超，胡立发，穆全全，等. 校正水平湍流波面的自适应光学系统的带宽需求[J]. 光学 精密工程，2010，18(10)：2137-2142.
LIU CG，HU L F，MU Q Q，*et al.*. Bandwidth requirements of adaptive optical system for horizontal turbulence correction[J]. *Opt. Precision Eng.*，2010，18(10)：2137-2142. (in Chinese)

[3] 王俊波，盛明，谢秀秀，等. 强湍流下并行中继自由空间光通信的中断分析[J]. 光学 精密工程，2012，20(4)：745-751.
WANG J B，SHENG M，XIE X X，*et al.*. Outage analysis for parallel relay free-space optical communication in strong turbulence[J]. *Opt. Precision Eng.*，2012，20(4)：745-751. (in Chinese)

[4] 胡朝晖，姜文汉. 受大气湍流影响的光学波前模拟[J]. 光电工程，1995，22(2)：50-56.
HU ZH H，JIANG W H. Simulation of the optical wavefront distorted by atmospheric turbulence[J]. *Opto-Electronic Eng.*，1995，22(2)：50-56. (in Chinese).

[5] 刘永军，胡立发，曹召良. 液晶大气湍流模拟器[J]. 光子学报，2006，35(12)：1960-1963.
LIU Y J，HU L F，CAO ZH L. Liquid crystal atmosphere turbulence simulator[J]. *Acta Photonica Sinica*，2006，35(12)：1960-1963. (in Chinese)

[6] 王立瑾，李强，魏宏刚，等. 大气湍流随机相位屏的数值模拟和验证[J]. 光电工程，2007，34(3)：1-4.
WANG L J，LI Q，WEI H G，*et al.*. Numerical simulation and validation of phase screen distorted by atmospheric turbulence[J]. *Opto-Electronic Eng.*，2007，34(3)：1-4. (in Chinese).

[7] HERMAN B J，STRUGALA L A. Method for inclusion of low-frequency contribution in numerical representation of atmospheric turbulence[J]. *SPIE*，1990，1221：183-192.

[8] JOHANSSON E M，GAVEL D T. Simulation of stellar speckle imaging[J]. *SPIE*，1994，2200：372-383.

[9] HU L F，XUAN L，CAO ZH L. A liquid crystal atmospheric turbulence simulator[J]. *Optics Express*，2006，14(25)：11911-11918.

[10] 姜宝光，穆全全，曹召良，等. 液晶波前校正器校正水平方向上的大气湍流[J]. 液晶与显示，2009，24(3)：396-398.
JIANG B G，MU Q Q，CAO ZH L，*et al.*. Correction of turbulence in horizontal direction using a liquid crystal wave-front corrector[J]. *Chinese J. Liquid Cyrstals and Displays*，2009，24(3)：396-398. (in Chinese)

[11] 李大禹，胡方发，穆全全，等. GPU计算液晶自适应光学波前重构的并行性研究[J]. 液晶与显示，2007，22(5)：572-575.
LI D Y，HU L F，MU Q Q，*et al.*. Wavefront reconstruction parallel computing of liquid crystal adaptive optics based on GPU[J]. *Chinese J. Liquid Cyrstals and Displays*，2007，22(5)：572-575. (in Chinese).

[12] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am.*，1976，66(3)：207-211.

[13] RODDIER N. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials[J]. *Opt. Eng.*，1995，29(10)：1174-1180.

[14] WILCOX C C，MARTINEZ T Y，SANTIAGO F. Adaptive optical system atmospheric turbulence generator testbed[C]//Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference，Sept. 12-15，2007，Maui，Hawaii，2007：616-624.

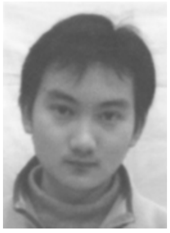
[15] 饶长辉. 非 Kolmogorov 湍流情况下低阶校正自适应光学系统的性能研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2000.
RAO CH H. Performance analysis of low-order correction adaptive optical system for non-Kolmogorov turbulence[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences,2000. (in Chinese).

[16] RODDIER F,GILLI J M,LUND G. On the origin of speckle boiling and its effects in stellar speckle interferometry[J]. *J. Optics*(Paris),1982,13(5):263-271.

[17] FRIED D L. Time-delay-induced mean-square error in adaptive optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*,1990,7(7):1224-1225.

作者简介:

卫沛锋(1984—),男,山西运城人,工学硕士,助理研究员,2006 年、2009 年于西北工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事自适应光学、大气光学方面的研究。E-mail:weipeifeng@ gmail. com



张振铎(1982—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2005 于长春理工大学获学士学位,2010 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事主动光学校正技术方面的研究。E-mail:zhenduo69@ 163. com

刘欣悦(1973—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,1996 年于清华大学获得学士学位,1999 年、2006 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事自适应光学及图像处理与分析方面的研究。E-mail:sirliuxy@ sina. com

董　磊(1982—),男,硕士,助理研究员,2004 年、2007 年于山东大学分别获得学士、硕士学位,主要从事傅里叶光学和激光技术的应用方面的研究。E-mail:nodepression@ 126. com

林旭东(1982—),男,福建莆田人,博士,副研究员,2005 年于长春理工大学获得学士学位,2010 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事自适应波前校正器技术方面的研究。E - mail: linxudong _ 82 @ 126. com