

文章编号 1004-924X(2018)03-0548-08

冻结大气湍流下自适应光学系统的预测校正性能

李正汉^{1,2,3}, 李新阳^{1,2*}

- (1. 中国科学院 自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;
2. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对自适应光学系统的校正滞后问题, 提出预测校正方法, 并对预测校正的鲁棒性进行了分析。冻结湍流假设下, Shack-Hartmann 波前传感器的探测斜率一定程度保留了湍流的时域演变模式。利用横向风信息对斜率进行傅里叶平移, 能实现斜率的预测。采用直接斜率法计算变形镜面形, 能实现预测校正。仿真结果表明, 提出的波前预测方法在横向风已知时, 几乎能完全克服延迟导致的性能损失; 当横向风需要估计时, 该方法在风向估计准确的条件下能容忍 1 倍于自身的风速估计误差, 或者在风速估计准确的条件下 60° 的风向估计误差, 均能实现校正性能的提升; 在风速和风向误差同时存在时, 在较大的误差范围内依然能够提升系统的校正能力。

关键词:自适应光学; 预测校正; 冻结大气湍流假设; Shack-Hartmann 波前传感器

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182603.0548

Performance of predictive correction for adaptive optics systems with frozen flow turbulence

LI Zheng-han^{1,2,3}, LI Xin-yang^{1,2*}

- (1. Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: xyli@ioe.ac.cn

Abstract: Accurate prediction of the atmospheric turbulence evolution in the next few sampling cycles can compensate for the time delay in the control systems of adaptive optics (AO) systems. In this paper, a predictive correction method in AO systems is proposed, and its robustness is analyzed. Under the frozen-flow assumption, the translational motion can be identified using the slope measurements of a Shack-Hartmann wavefront sensor (SHWS) in AO systems. Using the transverse wind information, prediction of the future slope can be achieved by Fourier translation. The shape of the deformable mirror (DM) can be calculated by the direct-gradient wavefront reconstruction algorithm. The aberrated wavefront is corrected by the DM. With a known transverse wind, the proposed predictive correction can provide a perfect compensation for the decline of the dynamic

收稿日期: 2017-10-31; 修订日期: 2017-11-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61675205)

performance caused by delays in the control system. With estimated wind parameters, improvement of the correction efficiency can be obtained as long as the wind-velocity estimation error is less than the velocity itself, while the wind direction is estimated accurately, or the direction error is less than 60° while the wind speed is estimated accurately. With a simultaneous wind-velocity and direction error, the correction efficiency can still be improved within a large error range.

Key words: adaptive optics; predictive correction; frozen flow hypothesis; Shack-Hartmann wavefront sensor

1 引言

自适应光学(Adaptive Optics, AO)系统能够补偿由于大气湍流以及光学系统内部扰动造成的随机波前畸变^[1]。实际的 AO 系统存在 2~3 个采样周期的时间延迟,主要来源于 Shack-Hartmann 波前传感器(Shack-Hartmann Wavefront Sensor, SHWS)的数据读出和控制计算。时间延迟造成变形镜(Deformable Mirror, DM)上的补偿波前滞后于畸变波前的变化,这种时域误差严重限制了系统的性能^[2-3]。大气湍流演变规律的建模及未来大气湍流的预测,能有效解决校正滞后问题^[4-5]。

目前,自适应光学预测校正已经有大量研究。1992年, Jorgenson 等利用神经网络较强的非线性拟合能力进行波前预测^[6-8]。Jorgenson 等在开环条件下进行了畸变波前预测,结果表明预测的引入能降低七倍左右的波前校正误差^[6]。国内的史晓雨^[9]和颜召军^[10]等均利用神经网络预测 DM 的控制电压。这一类方法的显著问题在于神经网络的训练需要大量的历史数据,并且不同湍流条件下网络的泛化能力较差。Page K. A. 等利用线性预测器,通过最新测量的几帧斜率数据对未来的斜率进行预测^[11]。颜召军等采用迭代最小二乘法建立预测器,对 DM 电压进行预测^[12-13]。这一类方法的高计算复杂度限制了它在 AO 实时控制中的应用,其原因在于没有充分利用大气湍流的信息。通过对大气参数,如横向风、大气相干长度^[14]等的实时测量能提高系统的校正能力。

根据大气冻结湍流假设^[15-16],望远镜上方大气湍流引起的畸变波前可以看作是多个“冻结层”的线性叠加,各“冻结层”的空间特性并不会在短时间内发生改变,而是在横向风的作用下做平移

运动,SHWS 的输出斜率保留了这种湍流演化模式。本文结合 151 单元 AO 系统,利用横向风信息对探测斜率进行傅里叶平移和边缘处理,实现斜率预测。对预测斜率采用直接斜率法进行波前复原,计算控制电压。DM 根据控制电压产生相应的面形进行预测校正。

2 模型

2.1 预测校正

预测校正结构如图 1 所示。SHWS 探测由于大气湍流等因素造成的畸变波前,并将畸变波前信息以子孔径斜率的形式输出。预测环节对探测斜率进行预测,克服由于测量延迟 t_r 和控制延迟 t_c 共同造成的时间延迟 t_d 。波前复原环节对预测斜率采用直接斜率法进行波前复原,输出控制电压^[17]。DM 根据控制电压产生相应的面形变化进行畸变校正。

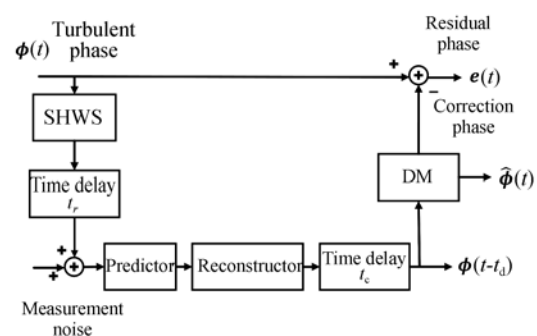


图 1 预测校正结构图

Fig. 1 Predictive correction structure

2.2 波前探测模型

SHWS 利用多个子孔径将畸变波前进行分割,每个子孔径将畸变波前信号转化为斜率信号输出。151 单元 AO 系统的 SHWS 子孔径布局如图 2 所示,对应的 DM 驱动器布局如图 3 所示。在本

文条件下,单位圆对应 1.2 m 口径的望远镜,径向为 14 个子孔径,每个子孔径的尺寸为 8.57 cm,采样频率为 1 kHz。探测过程可以表示为:

$$\hat{s}(z, t) = H\varphi(z, t) + s_n(z, t), \quad (1)$$

其中: $\varphi(z, t)$ 为实际波前, $\hat{s}(z, t)$ 为传感器输出的斜率, $s_n(z, t)$ 为斜率探测噪声,上述变量中 $z = (x, y)$ 表示空间坐标, x, y 分别表示水平分量和垂直分量; t 表示时间; H 为波前斜率探测算子,将波前转换为斜率。探测噪声假定为零均值高斯白噪声(White Gaussian Noise, WGN),且子孔径间独立。

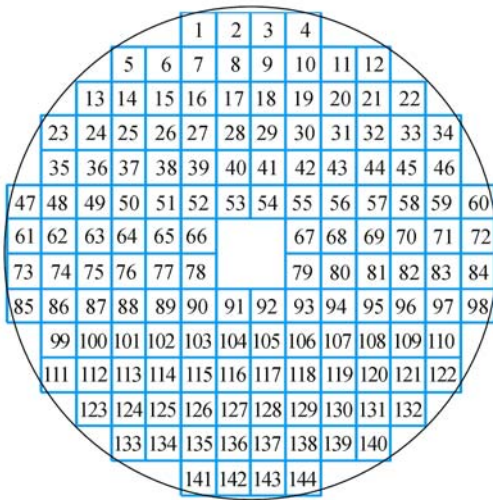


图 2 151 单元 AO 系统 SHWS 子孔径布局

Fig. 2 Layout of SHWS subaperture in 151 units AO system

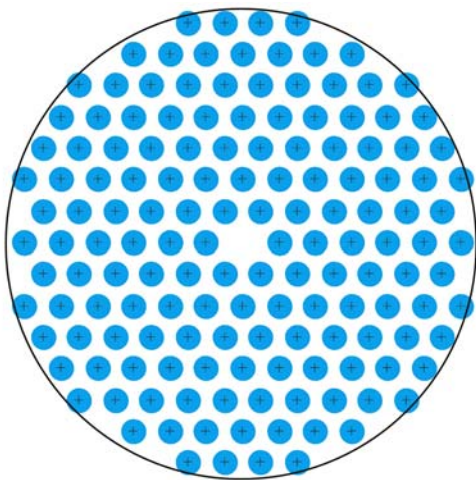


图 3 151 单元 AO 系统 DM 驱动器布局

Fig. 3 Layout of DM actuator in 151 units AO system

2.3 大气冻结湍流假设

大气冻结湍流假设是一个对大气湍流广泛采用的建模方法,也被大量的实际观测和实验所验证^[15,16,18-20]。这些研究表明:冻结湍流假设成立的时间尺度为 10~20 ms,在少数情况下达到 50~100 ms。对于本文涉及的采样频率为 1 000 Hz、系统延迟为 2~3 个采样周期的系统而言,大气冻结湍流假设是合理的。

在大气冻结湍流假设下,湍流中某点的空间特性在系统延迟 t_d 的时间范围内并没有发生变化。这一过程可以表示为:

$$\varphi(z, t) = \varphi(z - \omega t_d, t - t_d), \quad (2)$$

其中 ω 为横向风, $\omega = (u, v)$, 包含水平分量 u 和垂直分量 v 。结合式(1),考虑没有探测噪声的情况,那么斜率数据上也有类似的平移运动:

$$s(z, t) = s(z - \omega t_d, t - t_d). \quad (3)$$

3 预测校正

3.1 预测方法

围绕 SHWS 斜率进行波前预测,这降低了运算的规模,但是也带来了一些挑战。假设换算到望远镜入瞳处的横向风为 12 m/s,系统延迟为 3 个采样周期,那么平移量为 0.42 个子孔径。也就是说,探测斜率的处理小于 1 个子孔径,这对平移方法提出了挑战。采用傅里叶域法能实现小于单个子孔径的斜率平移。

假设探测斜率 $\hat{s}(z, t - t_d)$ 的 x 分量为 $\hat{s}_x(z, t - t_d)$, 预测斜率为 $\hat{s}_x(z, t)$ 。斜率的傅里叶平移操作流程如下:

(1) 将 $\hat{s}_x(z, t)$ 向量按子孔径位置转换为 14×14 的矩阵 \mathbf{G} , 没有斜率的矩阵元素用 0 代替,再将矩阵用 0 元素扩展为 16×16 的矩阵 \mathbf{G}_e ;

(2) 对 \mathbf{G}_e 进行二维离散傅里叶变换,得到 \mathbf{F} ;

(3) \mathbf{F} 乘以平移矩阵 \mathbf{S} , 得到 \mathbf{F}_s :

$$\mathbf{S} = \text{diag}\{\exp(-i2\pi(ut_d + vt_d))\}$$

(4) 对 \mathbf{F}_s 进行二维离散傅里叶逆变换,得到 \mathbf{G}_s ;

(5) 将 \mathbf{G}_s 中子孔径对应位置的元素取出作为预测斜率 $\hat{s}_x(z, t)$ 。

在大气相干长度 r_0 为 15 cm, 横向风为 28.5 m/s 水平向右的条件下,系统延迟 3 ms 时,斜率

平移效果如图 4 所示。

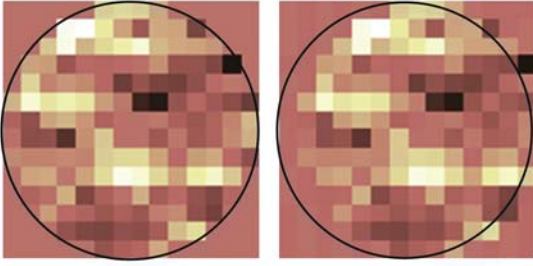


图 4 SHWS 斜率的傅里叶平移
Fig. 4 Fourier translation of SHWS slope

3.2 预测误差

采用预测斜率与实际斜率偏差的绝对值来度量平移方法的性能,以及斜率预测的效果。图 5 给出的是采样频率为 1 kHz,水平向右 12 m/s 风速条件下,系统延迟为 3 个周期时,傅里叶平移的斜率误差与不预测时斜率误差的对比。

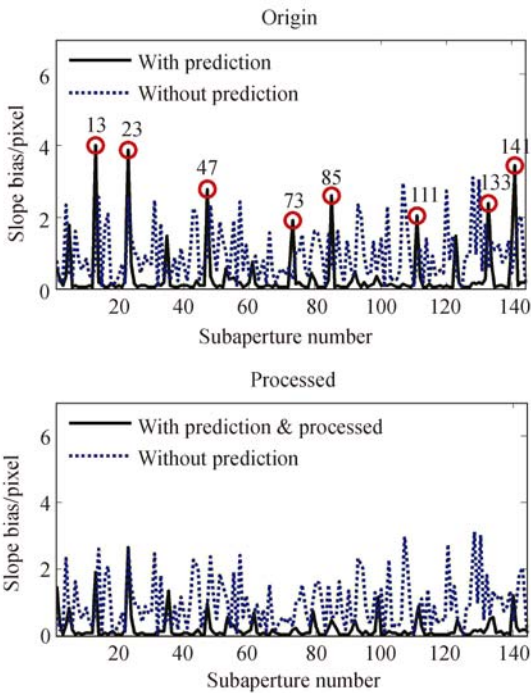


图 5 SHWS 斜率的预测偏差
Fig. 5 Prediction biases of SHWS slope

通过傅里叶平移,大多数子孔径的斜率误差得到了显著降低,但是部分子孔径斜率误差反而增大,如图 5 中标注部分 13 号、23 号、47 号等子孔径,它们均位于孔径边缘。表明傅里叶平移在边缘子孔径出现了较大的偏差。

3.3 边缘误差及处理

斜率预测误差主要来源于边缘子孔径,原因是单纯的傅里叶平移导致空白区域进入靶面。解决方法是对空白区域进行外推,即对傅里叶平移操作步骤 1 中 16×16 矩阵的零元素进行最近邻插值。图 5 对比了外推前后的斜率预测误差,外推后边缘子孔径的大误差被显著抑制。图 6 对比了 400 帧仿真中,各个子孔径预测偏差大于 1 pixel 的帧数,例如 61 号子孔径由 224 帧降到了 162 帧,73 号子孔径由 244 帧降到了 186 帧,可以看到空间插值的外推显著降低了斜率预测的大偏差。

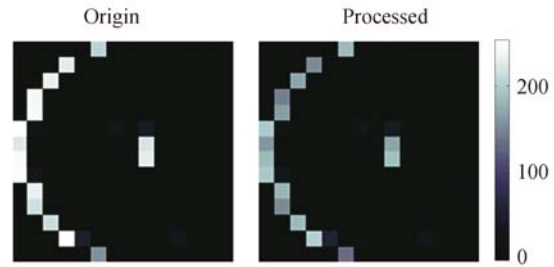


图 6 边缘处理前后子孔径大偏差的帧数统计
Fig. 6 Number of frames for large prediction deviation in sub-aperture before and after processing

4 仿真与性能分析

4.1 仿真条件

对比预测前后的校正残差来分析预测方法的性能更具有说服力。校正所用的 DM 为 151 单元,影响函数为超高斯影响函数:

$$K_i(x, y) = \exp \left[\ln \omega \left\{ \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{d} \right\}^\alpha \right], \quad (4)$$

其中: (x_i, y_i) 为第 i 个驱动器的位置坐标,高斯指数 $\alpha = 2$,驱动器交连值 $\omega = 0.1$ 。其他的仿真参数见表 1。

在表 1 的仿真条件下,利用谱反演生成相位屏,通过傅里叶域的方法模拟横向风作用下的冻结流运动。利用 14×14 的 SHWS 对波前进行探测,然后对斜率测量结果进行处理和预测。最后利用预测斜率,通过直接斜率法计算 DM 面形,并对畸变波面进行校正。

表 1 预测校正的仿真条件

Tab. 1 Simulation conditions for predictive correction

Parameter	Value
Telescope diameter/m	1.2
Obstruction ratio	0.2
Sampling period/ms	1
Layers	1
Wavelength/nm	550
Height/km	0
Wind velocity/(m · s ⁻¹)	30
Wind direction/(°)	45
r_0	15 cm

4.2 横向风先验

在表 1 的仿真条件下,对探测斜率进行了三种处理,分别是没有预测、利用先验的风速进行预测但不进行边缘处理,以及进行预测并处理边缘。然后利用这些斜率,通过直接斜率法计算变形镜面形用于波面校正。图 7 和图 8 给出了校正残余波面的 RMS。

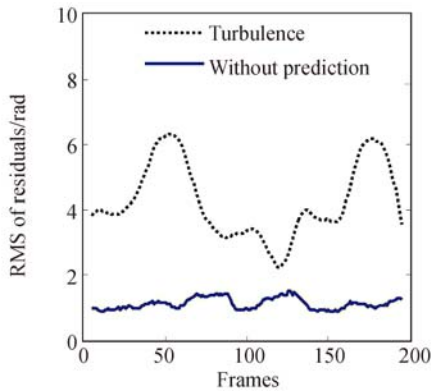


图 7 无预测时校正残差的 RMS

Fig. 7 Residual wavefront RMS without prediction

为了方便说明校正效果,定义校正效率为:

$$\eta = \frac{\sigma_{\text{origin}} - \sigma_{\text{residual}}}{\sigma_{\text{origin}}}, \quad (5)$$

其中: σ_{origin} 为未校正波面的 RMS, σ_{residual} 为校正残余波面的 RMS。 η 越大表明系统的校正能力越强。200 帧仿真的平均 η 作为对比指标,不预测时的平均校正效率为 77.82%,单纯的傅里叶平移后平均校正效率为 86.93%,校正效率提高了

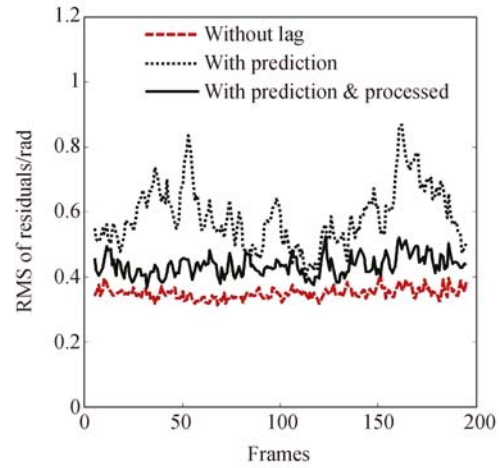


图 8 预测时校正残差的 RMS

Fig. 8 Residual wavefront RMS with prediction

9.11%。边缘处理后平均校正效率为 90.69%,在原来的基础上又提高了 3.76%。当系统不存在延迟时平均校正效率为 92.31%,性能损失来源于 SHWS 有限的空间探测能力和 DM 的拟合误差。边缘处理后平均校正效率与不存在滞后时仅相差 1.62%,几乎完全克服了滞后带来的性能损失。

4.3 预测方法的鲁棒性

系统工作时,横向风的大小和方向并不是先验的,必须进行实时估计。横向风测量可以借助外部设备进行^[21-22],也可以借助 AO 系统的 SHWS 实现^[23-25]。实际的横向风测量不可避免地存在误差,因此必须考虑波前预测方法对横向风估计误差的容忍能力。

考虑 Kolmogorov 湍流,畸变波前的相位结构函数为:

$$[\varphi(z+r) - \varphi(z)]^2 = 6.88 (r/r_0)^{5/3}, \quad (6)$$

其中: r 是两点间的距离, r_0 是大气相干长度。横向风为 w ,系统延迟为 t_d 的条件下,校正滞后造成的校正残余误差 σ_{delay}^2 为:

$$\sigma_{\text{delay}}^2 = 6.88 (\|w t_d\| / r_0)^{5/3}. \quad (7)$$

假设估计的横向风为 \hat{w} ,则风速估计误差 w_e 为:

$$w_e = \hat{w} - w. \quad (8)$$

风速估计误差造成的校正残余误差 σ_{error}^2 为:

$$\sigma_{\text{error}}^2 = 6.88 (\|w_e t_d\| / r_0)^{5/3}, \quad (9)$$

波前预测减少的校正残余误差 σ_{gain}^2 为:

$$\sigma_{\text{gain}}^2 = 6.88 (t_d / r_0)^{5/3} (\|w\|^{5/3} - \|w_e\|^{5/3}). \quad (10)$$

横向风的估计误差主要是风速误差和风向误差。首先分析风速估计误差。假设估计风速 $\hat{\omega}$ 为实际风速 ω 的 k 倍,则风速估计误差为:

$$\tau_{\omega_e} = (k - 1) \tau_{\omega}. \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (10) 得:

$$\sigma_{\text{gain}}^2 = 6.88 (t_d \|\omega\| / r_0)^{5/3} (1 - \|k - 1\|^{5/3}), \quad (12)$$

从式 (12) 可知,能从波前预测中获得性能提升的条件是: $0 \leq k \leq 2$ 。在表 1 的仿真条件下, k 在 $-0.5 \sim 2.5$ 内每隔 0.25 取值,并进行 200 帧仿真,对比了预测前后的平均校正效率,如图 9 所示。

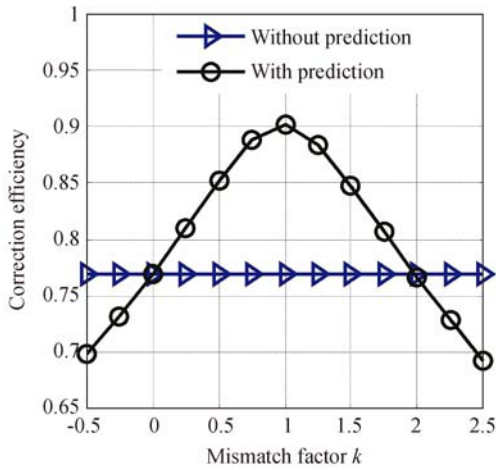


图 9 波前预测对风速的鲁棒性

Fig. 9 Robustness of wavefront prediction with regard to wind velocity

当 $k=1$ 时,也就是估计风速不存在误差时,预测的校正效率达到最高;随着风速估计误差的增大,预测的校正效率降低;当风速估计偏差与风速相等时,预测不再对校正效率有提升;当风速估计误差超过风速本身后,预测的校正效率反而低于不预测,此时预测校正会带来系统性能的降低。这与理论推导的结果是一致的。

其次分析风向估计误差。假设风向估计偏差为 β ,则风速估计误差为:

$$\tau_{\omega_e} = \|\omega\| \sqrt{2 - 2\cos \beta}. \quad (13)$$

则波前预测减少的校正残余误差 σ_{gain}^2 为:

$$\sigma_{\text{gain}}^2 = 6.88 (t_d \|\omega\| / r_0)^{5/3} \cdot [1 - (2 - 2\cos \beta)^{5/6}]. \quad (14)$$

从式 (13) 可知,能从波前预测中获得性能提升的条件是: $-60^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ 。在表 1 的仿真

条件下, β 在 $-80^\circ \sim 80^\circ$ 内每间隔 10° 取值,并进行 200 帧仿真,计算相应的平均校正效率,如图 10 所示。

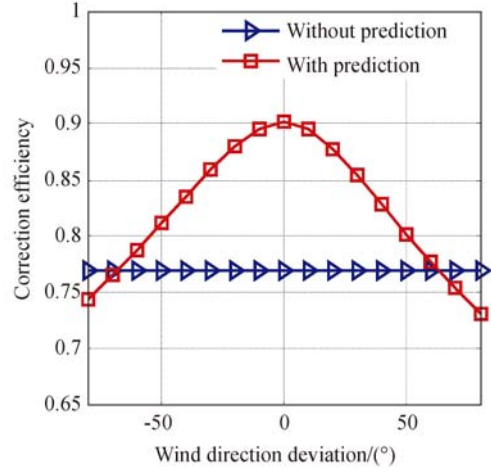


图 10 波前预测对风向的鲁棒性

Fig. 10 Robustness of wavefront prediction with regard to wind direction

当 $\beta=0$ 时,也就是风向估计准确时,预测的校正效率最高;随着风向估计误差的增大,校正效率逐渐降低;当风向估计误差为 60° 时,预测的校正效率与不预测时相同,预测校正失去了作用;在风向估计误差大于 60° 后,预测的校正效率低于不预测,预测会损害系统性能。

以上讨论均是在单一变量的条件下进行的,分别是风向估计准确时风速误差的容忍范围,以及风速估计准确时风向误差的容忍范围。实际运

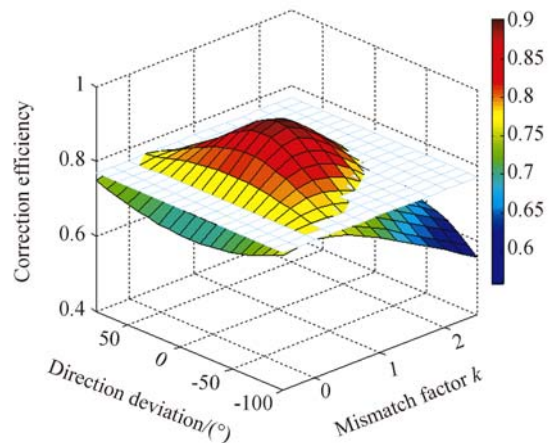


图 11 波前预测对风速和风向的鲁棒性

Fig. 11 Robustness of wavefront prediction with regard to wind velocity and direction

用时,风向误差和风速误差通常同时存在。在表 1 的仿真条件下,本文在风速风向误差同时存在的情况下进行了仿真。 k 在 $-0.5 \sim 2.5$ 内每隔 0.25 取值, β 在 $-100^\circ \sim 80^\circ$ 内每间隔 10° 取值,每种情况进行 200 帧仿真,计算相应的平均校正效率,如图 11 所示。

图 11 中的水平面表示没有预测时的校正效率,高于此平面的区域表示在此风速风向误差范围内预测校正带来的性能提升。本文提出的波前预测方法能够在风速、风向信息不准的条件下依然提高系统的校正能力。这显示出预测方法在面对实际湍流时的应用潜力。

5 结 论

AO 系统在实际工作场景下存在系统延迟,而大气湍流是动态演化的,这导致计算产生的变形镜面形和被校正畸变波前存在时域的不匹

参考文献:

- [1] HARDY J W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes* [M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [2] 李新阳,姜文汉. 自适应光学控制系统的有效带宽分析[J]. 光学学报, 1997, 17(12): 1697-1702.
LI X Y, JIANG W H. Effective bandwidth analysis of adaptive optics control system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(12): 1697-1702. (in Chinese)
- [3] 李新阳,姜文汉. 自适应光学系统的控制残余方差分析[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1328-1334.
LI X Y, JIANG W H. Analysis of the residual servo variance for an adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1328-1334. (in Chinese)
- [4] KULCSÁR C, RAYNAUD H F, PETIT C, *et al.*. Minimum variance prediction and control for adaptive optics [J]. *Automatica*, 2012, 48(9): 1939-1954.
- [5] POYNEER L, VÉRAN J P. Predictive wavefront control for adaptive optics with arbitrary control loop delays[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, 25(7): 1486-1496.
- [6] AITKEN G J M, JORGENSON M B. Wavefront prediction from adaptive astronomical telescopes [J]. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 1992, 86(6): 288.

配。本文提出的波前预测方法能充分利用大气湍流中的横向风信息,通过傅里叶平移和边缘子孔径的外推处理实现波前预测。仿真结果表明,在已知横向风的条件下,提出的预测方法几乎能完全克服滞后导致的性能损失;在横向风未知的条件下,提出的波前预测方法能在风向估计准确的条件下容忍 1 倍于自身的风速估计误差,或者在风速估计准确的条件下容忍 60° 的风向估计误差;在风速和风向误差同时存在时,在较大的误差范围内依然能够提升系统的校正能力。

实际大气湍流中湍流强度和风速风向是随高度变化的。本文是初步工作,仅考虑了近地面的单层湍流,关于更加接近真实湍流的多层情况是后续工作的重点。

致 谢 感谢中国科学院光电技术研究所黄林海副研究员、罗曦副研究员在课题研究和论文写作中给出的十分有益的意见和建议。

- [7] JORGENSON M B, AITKEN G J M. Prediction of atmospherically induced wave-front degradations [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(7): 466-468.
- [8] AITKEN G J M, JORGENSON M B. Neural-network wavefront predictors for adaptive optics [J]. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 1994, 88(4): 255-256.
- [9] 史晓雨,冯勇,陈颖,等. 自适应光学系统变形镜控制电压预测[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1281-1286.
SHI X Y, FENG Y, CHEN Y, *et al.*. Predicting control voltages of deformable mirror in adaptive optical system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1281-1286. (in Chinese)
- [10] 颜召军,李新阳. 基于神经网络的自适应光学系统变形镜控制电压预测方法 [J]. 光学学报, 2010, 30(4): 911-916.
YAN ZH J, LI X Y. Neural network prediction algorithm for control voltage of deformable mirror in adaptive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 911-916. (in Chinese)
- [11] PAGE K A, SCHÖCK M. Analysis of atmospheric turbulence with applications to linear predictions [C]. *Proceedings of European Southern Observatory 2002 ESO Conference and Workshop Proceedings*, ESO, 2002.

- [12] 颜召军, 李新阳, 饶长辉. 一种自适应光学闭环系统预测控制算法的仿真研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0101003.
YAN ZH J, LI X Y, RAO CH H. Numerical simulation of a prediction control algorithm for close-loop adaptive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0101003. (in Chinese)
- [13] 颜召军, 李新阳, 饶长辉. 自适应光学闭环系统实时多路自适应控制算法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0301002.
YAN ZH J, LI X Y, RAO CH H. Multi-channel adaptive control algorithm for closed-loop adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0301002. (in Chinese)
- [14] 卫沛锋, 林旭东, 王亮, 等. 大气相干长度的瞬时测量[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1840-1845.
WEI P F, LIN X D, WANG L, *et al.*. Simultaneous measurement of atmospheric coherence length [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 1840-1845. (in Chinese)
- [15] SCHÖCK M, SPILLAR E J. Method for a quantitative investigation of the frozen flow hypothesis [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, 17(9): 1650-1658.
- [16] POYNEER L, VAN DAM M, VÉRAN J P. Experimental verification of the frozen flow atmospheric turbulence assumption with use of astronomical adaptive optics telemetry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, 26(4): 833-846.
- [17] 李新阳, 王春红, 鲜浩, 等. 直接斜率波前复原算法的控制效果分析[J]. 光电工程, 1998, 25(6): 9-14.
LI X Y, WANG CH H, XIAN H, *et al.*. Control effect analysis for a direct gradient wavefront reconstruction algorithm[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, 25(6): 9-14. (in Chinese)
- [18] GENDRON E, LÉNA P. Single layer atmospheric turbulence demonstrated by adaptive optics observations [J]. *Astrophysics and Space Science*, 1996, 239(2): 221-228.
- [19] KERN B, LAURENCE T A, MARTIN C, *et al.*. Temporal coherence of individual turbulent patterns in atmospheric seeing[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(27): 4879-4885.
- [20] CACCIA J L, AZOUIT M, VERNIN J. Wind and C₂N profiling by single-star scintillation analysis [J]. *Applied Optics*, 1987, 26(7): 1288-1294.
- [21] GENTRY B M, CHEN H L, LI S X. Wind measurements with 355-nm molecular Doppler lidar[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(17): 1231-1233.
- [22] OYA S, TAKABE M, ARUGA T. Application of an exclusively binarized correlation-calculation method to wind velocity measurement by use of stellar scintillation patterns[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(24): 4041-4049.
- [23] SCHÖCK M, SPILLAR E J. Measuring wind speeds and turbulence with a wavefront sensor [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(3): 150-152.
- [24] JOHNSON L C, GAVEL D T, WIBERG D M. Bulk wind estimation and prediction for adaptive optics control systems[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(8): 1566-1577.
- [25] 苑克斌, 朱文越, 黄印博, 等. Shack-Hartmann传感器用于湍流大气横向风速的测量[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 303-307.
YUAN K E, ZHU W Y, HUANG Y B, *et al.*. Measurement of path-averaged transverse wind speed with a Shack-Hartmann wave-front sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 303-307. (in Chinese)

作者简介:



李正汉(1993—),男,湖北武汉人,博士研究生,主要从事自适应光学系统信号处理方面的研究。E-mail: lizh_ioe@163.com

导师简介:



李新阳(1971—),男,四川资阳人,研究员,博士生导师,1993年于上海交通大学获得学士学位,1997年、2000年于中国科学院光电技术研究所分别获得硕士、博士学位,现为中国科学院自适应光学重点实验室副主任,主要从事自适应光学及其应用中的信号处理和自动控制技术等方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn