

基于变形镜本征模式的空间光学遥感器波前 误差校正方法研究

喻 际 董 冰

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 提出采用基于变形镜(DM)本征模式的自适应光学波前误差校正方法校正高分辨率空间光学遥感器在轨波前误差。该方法利用变形镜各致动器的影响函数得到一组符合导数正交关系的变形镜本征模式,以图像功率谱密度在低频区域的积分和为评价函数,根据本征模式系数与评价函数之间的关系直接求解出各阶模式所需的校正量。利用实测的37单元变形镜的影响函数得到变形镜本征模式,基于该模式对泽尼克像差进行了开环和闭环仿真校正,定量分析了相位偏置和图像频率范围对算法精度的影响。针对遥感器主镜面热变形误差给出了仿真校正结果,分析了图像噪声和不同遥感图像对算法校正精度的影响。仿真结果表明基于变形镜本征模式的自适应光学校正方法可以有效校正波前误差,算法收敛速度快,对图像噪声和内容不敏感,适合用于空间光学遥感器波前误差校正。

关键词 遥感;自适应光学;变形镜本征模式;空间光学遥感器;泽尼克像差;热变形

中图分类号 TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1228001

Deformable Mirror Eigen Modes Based Wavefront Error Correction Method Used for Space Optical Remote Sensor

Yu Ji Dong Bing

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract An adaptive optics wavefront error correction method based on deformable mirror (DM) eigen modes is proposed for high-resolution space optical remote sensors. The influence functions of DM actuators are used to obtain a set of DM eigen modes whose derivatives are orthogonal with each other. The integration of image power spectrum at low spacial frequency area is used as merit function. The required correction amount of each mode is directly solved from the relationship between eigen-mode coefficients and the merit function. The eigen modes are obtained from the 37-channel DM. The correction accuracy of Zernike aberrations is discussed by simulation in open-loop and closed-loop modes. The effect of phase bias and spatial frequency range of image on correction accuracy is analyzed quantitatively. The simulation result of thermal deformations of the primary mirror of optical remote sensor is provided. The influence of image noise and different remote images on the method is discussed. The simulation results show that the method effectively corrects wavefront errors. With the advantage of fast convergence speed and insensitivity to image noise and image content, the DM eigen modes based wavefront error correction method is appropriate for space optical remote sensors.

Key words remote sensing; adaptive optics; deformable mirror eigen modes; space optical remote sensor; Zernike aberration; thermal deformation

OCIS codes 280.4788; 110.1080; 350.4855

收稿日期: 2014-06-13; 收到修改稿日期: 2014-07-14

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20131101120023)、北京理工大学优秀青年教师资助计划跨学科合作项目(2012YG0203)、北京理工大学基础研究基金(20120442005)

作者简介: 喻 际(1990—),女,硕士研究生,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: yuji1128@126.com

导师简介: 董 冰(1983—),男,博士,讲师,硕士生导师,主要从事自适应光学和空间光学方面的研究。

E-mail: bdong@bit.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

高分辨率空间光学遥感器因其大口径、长焦距、可展开等特点,成像性能容易受到内部和外部因素的影响而无法实现高分辨率成像^[1]。对像质退化的遥感图像可以通过主动和被动两种方式进行处理。被动方式即用图像后处理的方法对模糊遥感图像进行复原^[2]。主动方式即通过各种手段在轨校正误差,从根本上解决误差对像质的影响^[3]。主动处理方式在星上直接提升像质,极大地减轻了地面处理系统的负荷,提高了信息获取效率,是高分辨率空间光学遥感器未来的发展方向。自适应光学技术是一种行之有效的主动处理技术,该技术基于对波前误差的探测和校正,能够使光学系统的成像质量达到接近衍射极限的水平。

和传统用于天文望远镜的自适应光学系统不同,空间光学遥感器的自适应光学系统需要以地物扩展目标为信标实施波前传感和校正。可用于地物目标的波前传感方法包括相关哈特曼-夏克法^[4]、相位差异法^[5-6]等。相关哈特曼-夏克法测量精度高、实时性好,但需要在遥感器中加入额外的波前探测光路,增加了系统的复杂性。相位差异法计算复杂并且对噪声比较敏感。为了简化自适应光学系统结构,适合星上应用环境,韩杏子等^[7-8]提出了基于随机并行梯度下降(SPGD)算法的无波前传感器自适应光学技术在轨校正波前误差。无波前传感器自适应光学系统省去了传统的波前传感器,具有结构简单、可靠性高等优点。但SPGD算法的缺点在于需要多次迭代,收敛速度较慢。SPGD算法属于无模型优化算法,为了提高算法收敛速度,Debarre等^[9-11]在研究高分辨率显微成像时提出了一种基于模式的无波前传感器自适应光学校正方法。该方法根据模式系数与评价函数之间的二次曲线关系直接求解出各阶模式所需的校正量,和SPGD算法相比无需多次迭代,校正实时性强。但将该方法用于空间光学遥感器的在轨波前误差校正目前未见相关报道,对算法的参数优化以及噪声对算法精度的影响等问

题还需要进一步研究。

本文在理论推导的基础上,通过实测变形镜的影响函数得到一组符合导数正交关系的变形镜本征模式。基于同轴三反射遥感光学系统建立了自适应光学系统仿真模型,通过仿真研究了算法对Zernike像差的开环和闭环校正精度,定量分析了算法参数对校正精度的影响。针对空间光学遥感器的镜面热变形误差给出了校正结果,分析了图像噪声和不同遥感图像对算法校正精度的影响。

2 基于变形镜本征模式的空间光学遥感器波前误差校正方法

2.1 校正原理

被观察物体经过非相干成像光学系统后,像函数可以看作是物函数和光学系统点扩展函数的卷积:

$$I(\mathbf{r}) = t(\mathbf{r}) * h(\mathbf{r}), \quad (1)$$

式中 $I(\mathbf{r})$ 为像函数, $t(\mathbf{r})$ 为物函数, $h(\mathbf{r})$ 为光学系统的点扩展函数, \mathbf{r} 为出瞳平面上的位置矢量。将像的功率谱密度 $S_I(\mathbf{m}) = |\mathcal{F}\{I(\mathbf{r})\}|^2$ 和物的功率谱密度 $S_T(\mathbf{m}) = |\mathcal{F}\{t(\mathbf{r})\}|^2$ 代入(1)式,得到物与像的功率谱密度关系为

$$S_I(\mathbf{m}) = |H(\mathbf{m})|^2 S_T(\mathbf{m}), \quad (2)$$

式中 \mathbf{m} 是归一化空间频率矢量, $H(\mathbf{m})$ 是光学系统的调制传递函数(MTF)。

文献[9]给出了低频区域内光学系统 MTF 与像差之间的关系:

$$|H(\mathbf{m})|^2 \approx |H_0(\mathbf{m})|^2 - \frac{1}{\pi} \iint_p (\mathbf{m} \cdot \nabla \Phi)^2 ds, \quad (3)$$

式中 $\iint_p ds$ 表示对光瞳面进行面积分, $H_0(\mathbf{m})$ 是无像差时的理想光学传递函数, Φ 是不包含平移和倾斜的系统波前误差函数。

采用图像功率谱密度在低频区域的积分和作为评价函数,有

$$g(M_1, M_2) = \int_0^{2\pi} \int_{M_1}^{M_2} S_I(\mathbf{m}) m dm d\xi = \int_{M_1}^{M_2} \left\{ |H_0(\mathbf{m})|^2 \int_0^{2\pi} S_T(\mathbf{m}) d\xi - \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} S_T(\mathbf{m}) \left[\iint_p (\mathbf{m} \cdot \nabla \Phi)^2 ds \right] d\xi \right\} m dm, \quad (4)$$

式中 M_1 和 M_2 为归一化空间频率范围, ξ 为空间频率方向角, $\mathbf{m} = (m \cos \xi, m \sin \xi)$ 。

由于 $S_T(\mathbf{m})$ 可以看作关于空间频率方向角 ξ 的周期函数,可以对 $S_T(\mathbf{m})$ 做傅里叶级数展开:

$$S_T(\mathbf{m}) = \frac{\alpha_0(m)}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} [\alpha_i(m) \cos(2i\xi) + \beta_i(m) \sin(2i\xi)], \quad (5)$$

因此, $\int_0^{2\pi} S_T(\mathbf{m}) d\xi = \pi\alpha_0(m)$ 。将波前误差的微分 $\nabla\Phi$ 表示为参量 $|\nabla\Phi|(\cos\chi, \sin\chi)$, χ 是 $\nabla\Phi$ 的辐角, 代入

(4)式中的光瞳积分项, 即

$$\iint_p (\mathbf{m} \cdot \nabla\Phi)^2 ds = \iint_p \{m |\nabla\Phi| [(\cos\xi \cdot \cos\chi) + (\sin\xi \cdot \sin\chi)]\}^2 ds = \frac{m^2}{2} \iint_p |\nabla\Phi|^2 [1 + \cos(2\xi - 2\chi)] ds, \quad (6)$$

将(5)式和(6)式代入(4)式中的第二项, 可以得到

$$\int_0^{2\pi} S_T(\mathbf{m}) \left[\iint_p (\mathbf{m} \cdot \nabla\Phi)^2 ds \right] d\xi = \frac{\pi^2}{2} \iint_p |\nabla\Phi|^2 [\alpha_0(m) + \alpha_1(m)\cos(2\chi) + \beta_1(m)\sin(2\chi)] ds. \quad (7)$$

由(7)式可知, 傅里叶展开式中的 $\alpha_0(m)$ 、 $\alpha_1(m)$ 、 $\beta_1(m)$ 对系统的评价函数有贡献, 一般来说, 如果一幅图像的结构没有明显的周期性, 则可近似认为 $\alpha_1(m) = 0$ 、 $\beta_1(m) = 0$ 。代入(7)式和(4)式中, 可以得到评价函数的近似表示式为

$$g(M_1, M_2) \approx q_0(M_1, M_2) - q_1(M_1, M_2) \frac{1}{\pi} \iint_p |\nabla\Phi|^2 ds, \quad (8)$$

$$\text{式中 } q_0(M_1, M_2) = \pi \int_{M_1}^{M_2} |H_0(\mathbf{m})|^2 \alpha_0(m) m dm, q_1(M_1, M_2) = \frac{\pi}{2} \int_{M_1}^{M_2} \alpha_0(m) m^3 dm.$$

假设波前误差可以用某种模式展开为

$$\Phi = \sum_{i=4}^N a_i \mathbf{Z}_i, \quad (9)$$

式中 \mathbf{Z}_i 是第 i 阶模式, a_i 是第 i 阶模式系数。当模式之间具有导数正交特性, 即满足

$$\iint_p \nabla\mathbf{Z}_i \cdot \nabla\mathbf{Z}_j ds = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}, \quad (10)$$

将(10)式代入(8)式, 则评价函数可化为

$$g(a_i) = q_0 - q_1 \sum_{i=4}^N a_i^2. \quad (11)$$

设光学系统处于初始状态时的评价函数为 g_0 , 当通过变形镜在系统中加入第 i 阶模式的正偏移量 $+b_i$ 时的评价函数为 g_+ , 加入第 i 阶模式的负偏移量 $-b_i$ 时的评价函数为 g_- 。利用(11)式可以得到关于评价函数与各阶模式系数的方程组:

$$\begin{cases} g_0 = q_0 - q_1 \sum_{k \neq i} a_k^2 - q_1 a_i^2 \\ g_+ = q_0 - q_1 \sum_{k \neq i} a_k^2 - q_1 (a_i + b_i)^2 \\ g_- = q_0 - q_1 \sum_{k \neq i} a_k^2 - q_1 (a_i - b_i)^2 \end{cases}, \quad (12)$$

求解该方程组可以得到第 i 阶模式系数的校正量 $a_{i, \text{corr}}$ 为

$$a_{i, \text{corr}} = -a_i = -\frac{b_i(g_+ - g_-)}{2g_+ - 4g_0 + 2g_-}. \quad (13)$$

由(13)式可知, 计算某一阶模式系数时, 只需要测量三次评价函数。由于初始评价函数 g_0 只需要测

量一次, 因此当校正前 N 阶模式系数时, 需要测量 $2N + 1$ 次评价函数。

2.2 变形镜本征模式

运用(13)式求解模式系数时要求添加的偏移量的模式必须满足(10)式表示的导数正交关系。文献[9]采用各阶多项式导数在单位圆上正交的 Lukosz 模式, 但在实际应用中, 由于变形镜的拟合能力有限, 可能无法准确产生 Lukosz 模式, 导致模式系数估计精度下降。

采用一种基于变形镜致动器影响函数的, 能够反映变形镜自身校正能力的本征模式, 该本征模式在单位圆上也具有导数正交特性, 因此仍可以用(13)式来求解波前误差的模式系数。变形镜本征模式的推导过程如下所述。

设变形镜致动器影响函数矩阵为 ω , 第 i 个致动器的影响函数为 ω_i , 其导数为

$$\nabla\omega_i = \begin{bmatrix} \omega_i^x \\ \omega_i^y \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中 ω_i^x 和 ω_i^y 分别表示 ω_i 在 x, y 两个方向上的导数。

变形镜产生的波前 Φ 与影响函数矩阵 ω 以及控制信号 \mathbf{C} 之间的关系为

$$\Phi = \omega\mathbf{C}, \quad (15)$$

对该等式左右两边同时取微分, 得

$$\nabla\Phi = \nabla\omega\mathbf{C}, \quad (16)$$

对 $\nabla \omega$ 进行奇异值分解可得

$$\nabla \omega = \nabla USV^T, \quad (17)$$

对(17)式两边积分可以解得

$$U = \omega(SV^T)^{-1}, \quad (18)$$

由奇异值分解原理可知, U 即为满足(10)式表述的导数正交关系的变形镜本征模式。变形镜产生的波前为

$$\Phi = USV^T C, \quad (19)$$

式中 $SV^T C$ 为变形镜本征模式系数。

变形镜本征模式由变形镜各致动器的影响函数矩阵推导而来,反映了变形镜本身的校正能力,可以

由变形镜准确产生,避免了采用传统 Lukosz 模式时的模式拟合误差,因而具有较高的波前重构精度,在 3.1 节通过仿真验证了这一结论。得到变形镜本征模式后,按(13)式即可求出各阶本征模式系数的校正量,进而可以求出(9)式描述的波前误差的校正量。

2.3 37 单元薄膜变形镜的本征模式

在干涉仪上实测 OKO 公司 37 单元薄膜变形镜^[12]各致动器的影响函数可以得到影响函数矩阵 ω ,再由(17)、(18)式可以得到 37 个变形镜本征模式,其中前 16 项本征模式如图 1 所示。

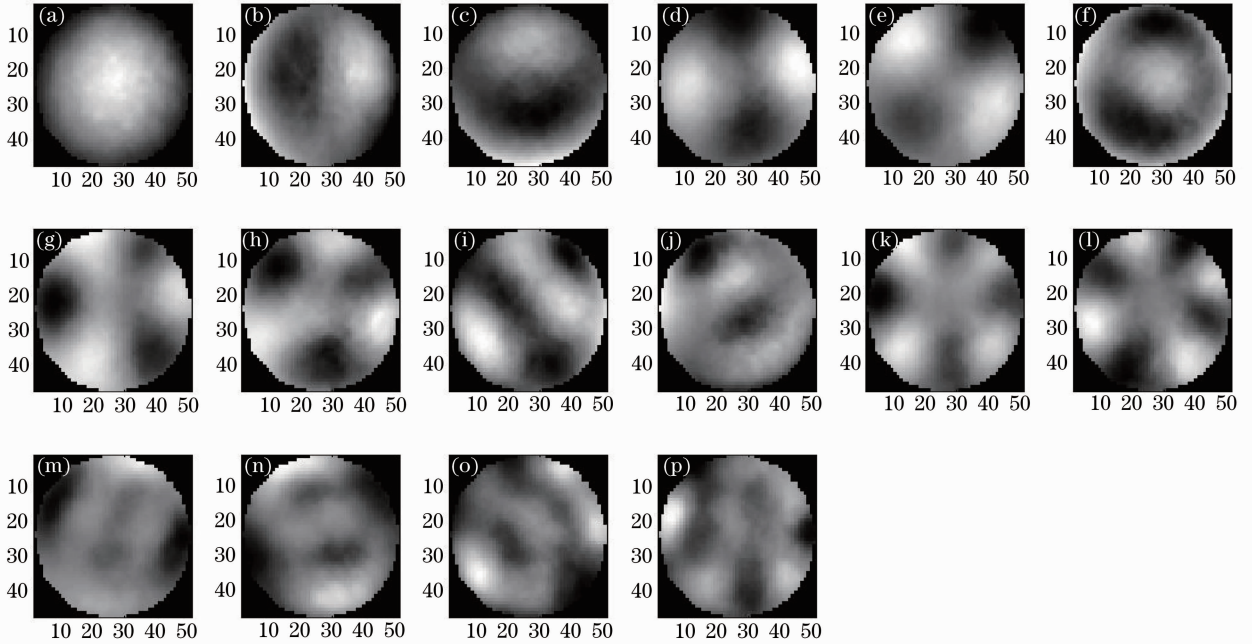


图 1 OKO 37 单元变形镜的 1~16 项本征模式

Fig.1 1~16 eigen modes of the OKO 37-channel DM

3 仿真分析

仿真采用的空间光学遥感器光学系统模型为口径为 5 m 的同轴三反射镜系统^[13],如图 2 所示。变形镜位于和主镜共轭的出瞳面上。变形镜一方面用于引入已知大小的正向和反向相位偏置,另一方面用于校正出瞳波前误差。

下面通过仿真分析基于 37 单元变形镜本征模式的无波前传感器自适应光学校正方法对 Zernike 像差的校正能力。由于空间光学遥感器的像差以低频为主,仿真时选用 4~15 阶 Zernike 多项式拟合波前误差,并对出瞳波前误差为单阶 Zernike 像差和多阶随机 Zernike 像差的情况分别进行了仿真校正。

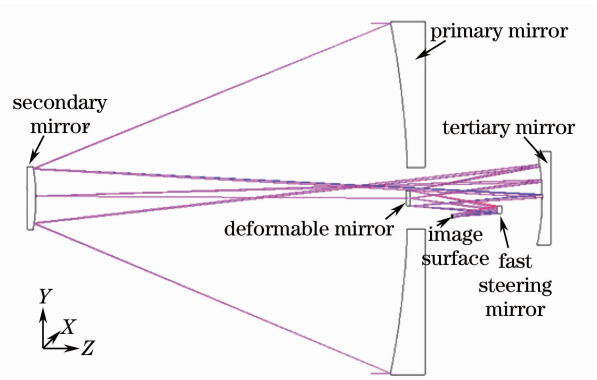


图 2 光学系统模型

Fig.2 Optical system model

3.1 单阶泽尼克像差校正

随机选取一幅遥感图像,在光学系统主镜上依

次添加均方根(RMS)值为 1 rad 的单阶 Zernike 像差,分别用图 1 所示变形镜本征模式和 Lukosz 模式对出瞳波前误差进行校正,结果如图 3 所示。仿真时各阶模式的相位偏置取±0.5 rad,归一化频率范围取 0.01~0.03。由图 3 可知基于变形镜本征模式的算法校正精度高于 Lukosz 模式。校正精度定义为

$$\epsilon = 1 - \frac{\sigma_{err}}{\sigma_0}, \quad (20)$$

式中 σ_{err} 为算法校正后波前的 RMS 值, σ_0 为算法校正前波前的 RMS 值。

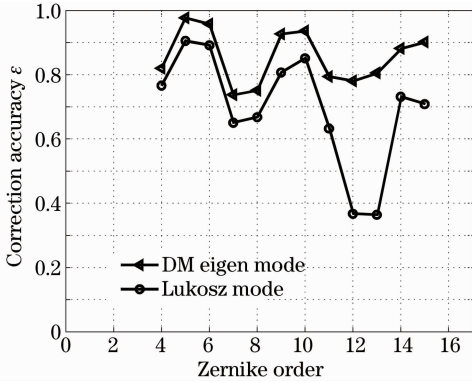


图 3 单项 Zernike 像差校正精度比较

Fig. 3 Comparison of single Zernike aberration correction accuracy

3.2 多阶随机泽尼克像差校正

在实际进行波前误差校正时需要确定两个算法参数:1)引入相位偏置的大小;2)评价函数中图像的频率取值范围。现有文献中对这两个参数的优化问题研究较少,没有定量分析结论。将通过仿真定量分析算法参数和校正精度之间的关系。

对不同 RMS 值的波前误差,分别随机产生 100 组数据^[14]进行仿真校正并计算出平均校正精度。相位偏置取不同值时的平均校正精度曲线如图 4 所示。由图 4 可知当像差较小(RMS 为 1~3 rad)时,相位偏置的最佳取值约为 0.5 rad,当像差较大(RMS 为 5~7 rad)时,最佳相位偏置取值约为 1.5 rad。同时,大像差条件下的相位偏置在一定范围内取值对精度影响不大。图 5 给出了图像的归一化频率取值范围和平均校正精度的关系曲线,其中图像的归一化频率范围下限取 0.01。从图 5 可以看出,对于 RMS 值分别为 1、3、5 rad 的波前误差,图像频率的范围为 0.01~0.03 时,算法的平均校正精度最高。

图 6 给出了优化参数条件下对不同 RMS 值的随机波前误差进行仿真校正的结果。仿真表明算法

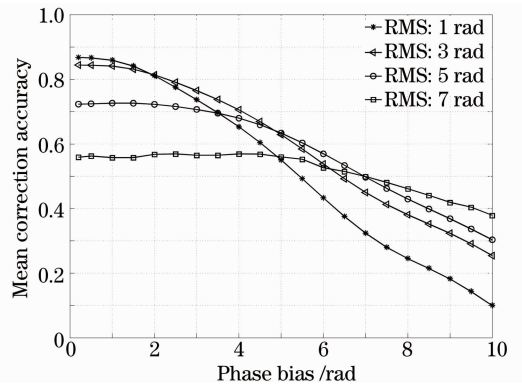


图 4 平均校正精度与相位偏置的关系曲线

Fig. 4 Relationship between phase bias and mean correction accuracy

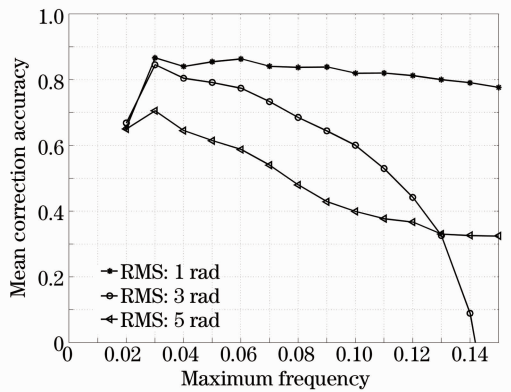


图 5 图像的频率取值范围和平均校正精度的关系
Fig. 5 Relationship between image frequency range and mean correction accuracy

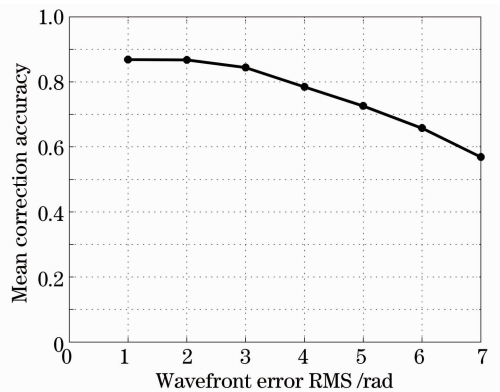


图 6 对多阶随机 Zernike 像差的平均校正精度
Fig. 6 Mean correction accuracy of multiple random Zernike aberrations

对大像差的校正精度逐渐下降,但实际应用时可以采用闭环校正获得最佳的校正结果。对于 RMS 值为 3 rad 和 7 rad 的波前误差进行闭环校正的结果如图 7 所示。波前 RMS 值为 3 rad 时,闭环校正 2 次后平均校正精度收敛于 97%。波前 RMS 值为 7 rad 时,闭环校正 5 次后平均校正精度收敛于 87%。

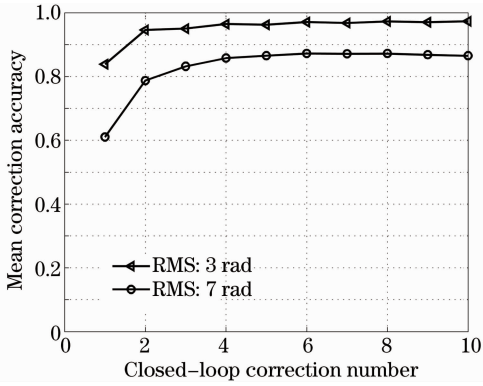


图 7 算法的校正次数与平均校正精度的关系

Fig. 7 Relationship between closed-loop correction number and mean correction accuracy

3.3 遥感器主镜热变形误差校正

引起空间光学遥感器成像质量下降的主要因素

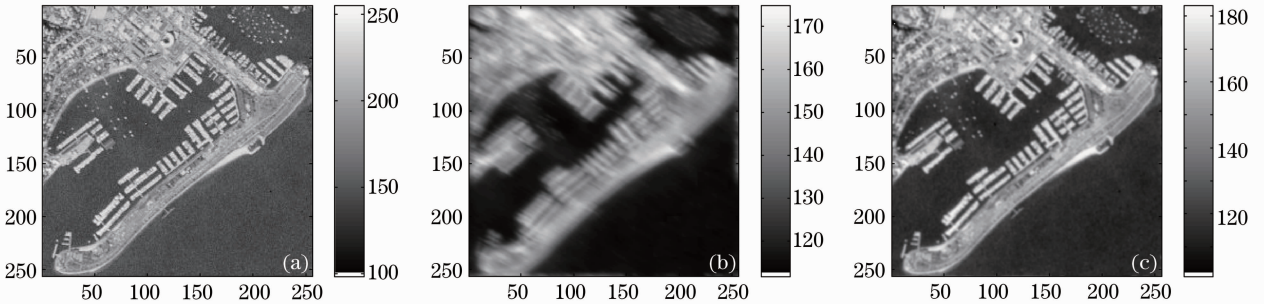


图 8 主镜面热变形误差的校正结果。(a)原始遥感图像；(b)引入热变形误差后的模糊图像；(c)闭环校正 3 次后的图像

Fig. 8 Correction results of thermal deformations of the primary mirror. (a) Initial remote sensing image; (b) blurred image after adding thermal deformation; (c) corrected image after thrice closed-loop corrections

3.4 图像噪声对算法精度的影响

由于实际获得的图像不可避免地含有噪声,下面分析图像噪声对算法精度的影响。定义信噪比为图像起伏的 RMS 值与噪声的 RMS 值之比。对 100 组 RMS 值为 5 rad 的随机波前误差在不同信噪比条件下进行校正,结果如图 9 所示。由图 9 可知当信噪比大于 20 时,噪声对算法精度的影响可以忽略。

3.5 遥感图像对算法精度的影响

下面分析不同遥感图像对算法精度的影响。对 RMS 值为 3 rad 的 100 组随机 Zernike 像差,选取不同场景下的 20 幅遥感图像进行闭环校正,平均校正精度如图 10 所示。算法对不同遥感图像的平均校正精度差别不大,当闭环校正 3 次后校正精度均在 90% 以上。

之一是镜面热变形。通过光机热集成分析可以得到镜面热变形引起的出瞳波前误差^[15]。图 8 给出了算法对遥感器主镜热变形误差的校正结果,其中热变形工况为轴向热梯度,温度变化范围为 5 ℃。采用图像结构相似度(SSIM)作为图像质量的评价标准^[16],SSIM 越接近 1,表示两幅图像结构越相似。SSIM 定义为

$$R_{SSIM}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (21)$$

式中 μ_x, μ_y 为图像的均值, σ_x, σ_y 为两幅图像的方差, σ_{xy} 为 σ_x 和 σ_y 的协方差。 C_1, C_2 为避免分母趋于零的常数,取为零。

加入热变形后模糊的图像与原始图像的结构相似度为 0.82,而采用算法闭环校正后的图像与原始图像的结构相似度达 0.97。

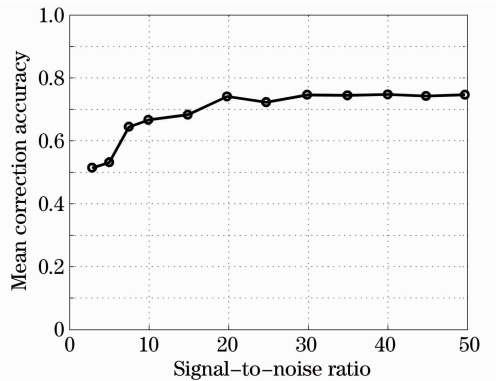


图 9 不同图像信噪比条件的平均校正精度

Fig. 9 Mean correction accuracy with different image signal-to-noise ratios

4 结 论

利用实测的 37 单元变形镜致动器的影响函数

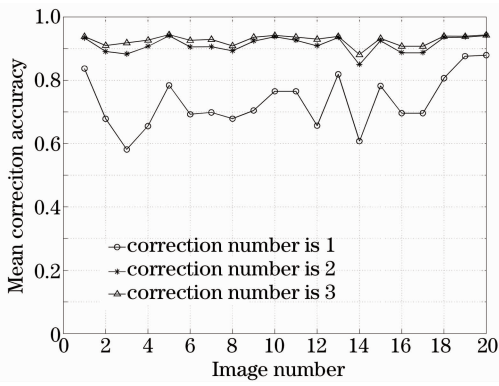


图 10 不同遥感图像的闭环平均校正精度

Fig. 10 Mean correction accuracy of different remote sensor images in closed-loop

得到了一组符合导数正交关系的变形镜本征模式。仿真表明基于变形镜本征模式的无波前传感器自适应光学校正方法可以有效校正 Zernike 波前误差和传感器镜面热变形误差,算法闭环收敛速度快,对图像内容和信噪比不敏感。仿真初步验证了该方法用于高分辨率空间光学传感器波前误差校正的可行性。下一步需要搭建完整的实验系统对算法进行深入的研究。

对于大视场空间光学传感器,将变形镜放在主镜共轭位置进行补偿存在校正视场范围有限的问题。所讨论的基于变形镜本征模式的波前误差校正方法理论上可以对不同视场(对应不同的图像范围)的波前误差分别进行测量和校正,对于宽视场自适应光学校正问题还需要进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Yu Xin, Zhang Xiaofang, Hu Xinqi. Study on space adaptive optics [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011, 32(5): 19-28.
- 2 Huang Jianming, Shen Mangzuo. Multiframe blind deconvolution restoration of atmospheric turbulence-degraded images based on noise characteristic [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 28(9): 1686-1690.
- 3 Guo Ling ling, Wu Zepeng, Zhang Liguu, *et al.*. Multichannel blind deconvolution-based on-orbit estimation of point spread function for space optical remote sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0428001.

- 郭玲玲, 吴泽鹏, 张立国, 等. 基于多通道盲反卷积的空间光学传感器在轨点扩展函数估算[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0428001.
- 4 Zeng Renchang, Liu Xiaohua, Hu Xinqi, *et al.*. Frequency-domain iterative algorithm for extended scene Shack-Hartmann wavefront sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0701006.
- 5 Wang Xin, Zhao Dazun, Mao Heng, *et al.*. The development of phase diversity [J]. Optical Technique, 2009, 35(3): 454-460.
- 6 Li Fei, Rao Changhui. Study on phase diversity wavefront sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0804001.
- 7 Han Xingzi, Hu Xinqi, Yu Xin. Precisely integrated wavefront sensorless calibration of high resolution space remote optical system with large position errors [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0626003.
- 8 Yu Xin, Han Xingzi, Hu Xinqi. Wavefront sensorless adaptive optics correction for high-resolution space remote sensing system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900118.
- 9 D Debarre, M J Booth, T Wilson. Image based adaptive optics through optimisation of low spatial frequencies [J]. Opt Express, 2007, 15(13): 8176-8190.
- 10 M J Booth, D Debarre, T Wilson. Image-based wavefront sensorless adaptive optics [C]. SPIE, 2007, 6711: 671102.
- 11 B R Wang, M J Booth. Optimum deformable mirror modes for sensorless adaptive optics [J]. Opt Commun, 2009, 282(23): 4467-4474.
- 12 M Loktev, O soloviev, G Vdovin. Adaptive Optics Product Guide [M]. Delft: OKO Technologies, 2003.
- 13 Dong Bing, Yu Xin. On-orbit position error correction of segmented primary mirror of high-resolution space telescope [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 55-59.
- 14 N A Roddier. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials [J]. Opt Eng, 1990, 29(10): 1174-1180.
- 15 Dong Bing, Yu Xin, Zhang Xiaofang, *et al.*. Thermal-structural-optical integrated analysis of segmented space telescope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009(2): 326-329.
- 16 Z Wang, A C Bovik, S H Rahim, *et al.*. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

栏目编辑: 苏 岑