

# 高分辨率空间光学遥感器波像差的无波前传感器自适应光学校正

俞 信<sup>1</sup> 韩杏子<sup>1,2\*</sup> 胡新奇<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081 )  
(<sup>2</sup>航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

**摘要** 高分辨率空间光学遥感器在轨工作时, 由于受到各种因素的影响, 无法清晰成像, 目前多采用自适应光学方法与技术进行校正。传统自适应光学系统体积较大, 结构复杂, 难以应用于高分辨率空间光学系统的在轨校正。无波前传感器自适应光学系统去除了传统自适应光学中的波前传感器, 大大简化了系统结构, 具有体积小、易于实现等优势, 特别适用于高分辨率空间光学遥感器的在轨校正。提出了一种利用无波前传感器自适应光学解决高分辨率空间光学遥感器大口径面形误差校正以及宽视场校正等方法。通过对典型的三反射式空间光学遥感器进行仿真研究, 验证了利用无波前传感器方法校正大口径主镜面形误差的有效性。搭建了宽视场校正原理性实验平台, 通过实验验证了宽视场无波前传感器校正方法的有效性。

**关键词** 光学器件; 高分辨率空间光学遥感器; 自适应光学; 无波前传感器; 宽视场校正

**中图分类号** TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900118

## Wavefront Sensorless Adaptive Optics Correction for High-Resolution Space Remote Sensing System

Yu Xin<sup>1</sup> Han Xingzi<sup>1,2</sup> Hu Xinqi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Optoelectronics of Beijing Technology of Institute, Beijing 100081, China )  
(<sup>2</sup> DFH Satellite Limited Company, Beijing 100094, China)

**Abstract** Due to the influence of various factors, high-resolution space optical remote sensing system cannot get clear image in orbit. For the calibration of wavefront errors, normally methods and techniques of adaptive optics have been used. Conventional adaptive optics systems are large and complex, but they are not ideal for correction for high-resolution space optical system in orbit. Wavefront sensorless adaptive optics system do not need wavefront sensor, greatly simplifying the system structure, thus are smaller and easier to be implemented, especially suitable for correction for high-resolution space optical remote sensing systems in orbit. The use of wavefront sensorless adaptive optics system is proposed to resolve the key problems such as surface errors correction of primary mirror using MEMS deformable mirror with a large correction channel and the wide-field correction and so on. Through computer simulation studies for a typical three-mirror reflective optical remote sensing system, the validity of wavefront sensorless solutions to the correction for surface errors of primary mirror with large aperture is verified. Besides, a wide-field correction experiment platform has been built, and the validity of wavefront sensorless wide-field correction method has been verified by experiment.

**Key words** optical devices; high-resolution space remote sensing system; adaptive optics; wavefront sensorless; wide-field correction

**OCIS codes** 280.4788; 250.4390

收稿日期: 2011-07-07; 收到修改稿日期: 2011-07-28

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724006)资助课题。

作者简介: 俞 信(1941—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事自适应光学及空间光学等方面的研究。

E-mail: yuxin@bit.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: xingerdu@sohu.com

## 1 引言

高分辨率空间光学遥感器向着大口径、长焦距、轻量化的方向发展。由于空间在轨环境的特殊性,系统会受到重力、热环境、光学系统误差等因素的影响,不能清晰成像。其中,在轨位置误差、大口径主镜镜面变形以及宽视场波前误差校正是高分辨率空间光学遥感器需要解决的3个关键问题。目前通常采用传统自适应光学技术进行校正,利用波前传感器探测波前畸变信息,重构出波前误差,通过波前校正器进行校正<sup>[1]</sup>。这种方法需要使用波前传感器,结构复杂,体积庞大,使得高分辨率空间光学遥感器的在轨校正复杂而困难。

无波前传感器自适应光学不需要使用波前传感器,只需利用成像探测器获得的像质信息建立系统像质评价函数,对校正器进行迭代优化,从而实现波前误差的校正。该方法具有结构简单、体积小、易于实现等优势,得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。无波前传感器自适应光学方法就其特性而言,特别适合于高分辨率空间光学遥感器的在轨测控校正,但是迄今为止尚无此方面应用报道。

作者在文献[3]中提出并详细研究了采用无波前传感器方法进行高分辨率空间光学遥感器的在轨位置误差校正,大大提高了可校正的在轨位置误差范围,同时可以达到很高的校正精度,校正后系统出瞳波像差均方根(RMS)值主要分布在 $0.015\lambda$ 附近。

本文提出利用无波前传感器自适应光学技术解决高分辨率空间光学遥感器中大口径主镜面形误差的大通道数微电子机械系统(MEMS)变形镜校正以及宽视场波前误差校正等问题,并且进行了数值仿真及实验验证。

## 2 无波前传感器方法原理

无波前传感器自适应光学是一种对系统性能指标直接进行优化的自适应光学控制技术,主要包括像质传感器、波前控制器和波前校正器3个部分。其核心思想是用像质传感器上获得的标量像质评价函数 $J$ 来表征自适应光学系统的性能,理想情况下 $J$ 在系统工作范围内存在一个唯一的极值。对波前校正器施加微小扰动,通过波前控制器,寻求使 $J$ 向着极值方向变化的校正器控制状态,认为当 $J$ 取到极值时,系统性能达到最优,原理如图1所示。

### 2.1 随机并行梯度下降算法原理

目前国内外常用的无波前传感算法包括随机并行梯度下降(SPGD)<sup>[4]</sup>、遗传算法(GA)<sup>[5]</sup>、模拟退

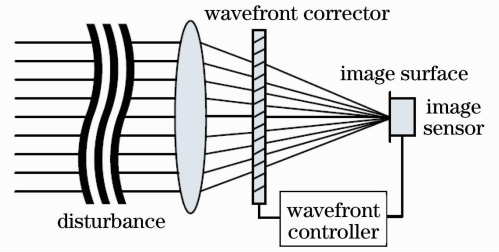


图1 无波前传感器自适应光学系统

Fig. 1 Wavefront sensorless adaptive optics system  
火(SA)<sup>[6]</sup>等。其中随机并行梯度下降算法因其实现容易、所有控制通道并行运算、收敛速度快等优点得到了广泛应用。

SPGD算法是一种基于系统性能指标直接优化的算法,以像清晰度函数作为评价依据,不断对控制参量进行优化,从而实现误差校正,满足系统像质要求。

设目标函数 $J$ 为控制矢量 $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_N)$ 的函数,即 $J(\mathbf{u}) = J(u_1, u_2, u_3, \dots, u_N)$ , $N$ 为控制矢量的个数。为了确定多元函数 $J(\mathbf{u})$ 达到极值时的控制矢量 $\mathbf{u}$ ,首先给定 $\mathbf{u}$ 一个初始值 $\mathbf{u}^0$ ,然后从 $\mathbf{u}^0$ 出发,沿着 $J(\mathbf{u})$ 减小(变大)的方向逐步修正 $\mathbf{u}$ 值的大小<sup>[7]</sup>。这里以双边扰动SPGD方法为例,具体过程为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_l^+ = \mathbf{u}_l^{(m)} + \delta\mathbf{u}_l/2 \\ \mathbf{u}_l^- = \mathbf{u}_l^{(m)} - \delta\mathbf{u}_l/2 \\ \delta J^+ = J(\mathbf{u}_l^+) - J(\mathbf{u}_l) \\ \delta J^- = J(\mathbf{u}_l^-) - J(\mathbf{u}_l) \\ \delta J = \delta J^+ - \delta J^- \\ \mathbf{u}_l^{(m+1)} = \mathbf{u}_l^{(m)} - \gamma\delta J\delta\mathbf{u}_l^{(m)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{u}_l^{(m)}$ 为第 $m$ 次迭代时第 $l$ 个控制单元的电压, $\delta\mathbf{u}_l$ 为第 $l$ 个控制单元施加的扰动电压, $J(\mathbf{u}_l)$ 为控制矢量为 $\mathbf{u}_l$ 时的评价函数值, $\gamma$ 为增益系数。

SPGD算法同时对所有控制参数施加随机扰动,大大提高了优化速度,其优化时间为普通梯度下降算法的 $1/\sqrt{N}$ ( $N$ 为控制矢量的个数)。

### 2.2 像质评价函数与波前误差之间关系

对于无波前传感器自适应光学中的优化指标像质评价函数与波前误差之间的量值关系问题,已有小波差范围内像质评价函数(斯特雷尔比)与波前误差(RMS)之间关系的研究报道<sup>[8]</sup>,但是在大波差范围内,由于理论的复杂性,没有深入研究。

本文对大波差范围内像质评价函数与波前误差之间的量值关系进行了仿真研究。以一个无穷远点光源为例,通过对其发出的光波施加扰动,根据菲涅

耳-基尔霍夫衍射理论,计算成像面上受到扰动后的像质评价函数,得出了二者之间的统计关系。这里

的像质评价函数选择点目标中性能较优的光斑平均半径<sup>[9]</sup>,公式为

$$J = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\Delta x_{i,j})^2 (q_{i,j}/q_{\text{total}}) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\Delta y_{i,j})^2 (q_{i,j}/q_{\text{total}})}, \quad (2)$$

$(x, y)$  为像面归一化坐标,式中  $\Delta x_{i,j}, \Delta y_{i,j}$  分别为像面某点到中心点在  $x$  和  $y$  方向的距离,  $q_{i,j}/q_{\text{total}}$  为该点对应的权重,这里选取归一化的点扩展函数值。

波前误差选择较有代表性的 RMS 值为

$$R_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [W(i,j) - \bar{W}]^2}{P}}, \quad (3)$$

式中  $W(i, j)$  为  $(i, j)$  点处的波前误差,  $\bar{W}$  为波前误差的平均值,  $m, n$  分别为  $i, j$  方向的采样点数,  $P = m \times n$  为总采样点数。

随机生成前 10 阶泽尼克(Zernike)多项式系数,产生波前误差 RMS 值在  $0 \sim 5\lambda$  之间分布的波像差,计算该波像差引起的出瞳处波像差 RMS 值。通过对 2000 组随机数据,利用最小二乘法进行多项式拟合,得到像质评价函数  $J$  与波前误差 RMS 之间近似满足四次多项式关系,拟合曲线如图 2 所示,其中拟合方差定义为  $\sigma_{\text{var}} = S(J_{\text{fit}} - J_{\text{real}})$ ,  $S$  代表方差运算,  $J_{\text{fit}}$  表示根据拟合曲线计算所得像质评价函数  $J$  的值,  $J_{\text{real}}$  表示原始数据中像质评价函数  $J$  的值。

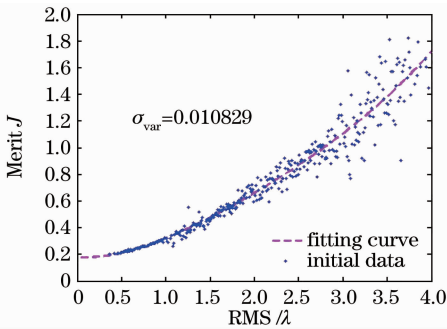


图 2 像质评价函数  $J$  与波前误差 RMS 拟合关系曲线

Fig. 2 Fitting curve between image merit  $J$  and wavefront error RMS

拟合得到的像质评价函数  $J$  与波像差 RMS 之间满足的四次多项式为

$$J = 0.1766 - 0.0285R_{\text{RMS}} + 0.2204R_{\text{RMS}}^2 - 0.0562R_{\text{RMS}}^3 + 0.0068R_{\text{RMS}}^4. \quad (4)$$

可见,像质评价函数  $J$  (平均半径)与波前误差 RMS 之间存在着四次多项式的统计关系,当波前误差 RMS 较小时,像质评价函数  $J$  起伏较小,拟合曲线与原始数据吻合较好,随着波前误差 RMS 的逐渐

增大,像质评价函数  $J$  起伏加剧,偏离拟合曲线的程度也越强烈。

### 3 大口径主镜面形误差的大通道数 MEMS 变形镜校正

高分辨率空间光学传感器通常采用轻型材料大口径主镜以实现高分辨率的目标,例如,詹姆斯韦伯太空望远镜口径达到  $6.5 \text{ m}$ <sup>[10]</sup>。美国国家航空和宇宙航行局(NASA)研制的先进技术大口径太空望远镜(ATLAST)设计口径达  $9.2 \text{ m}$ <sup>[11]</sup>。大口径轻量化主镜除了存在一定的加工误差外,入轨以后,由于空间的微重力环境以及空间热环境的影响,也使镜面发生形变<sup>[12]</sup>,这些误差引起的大口径主镜镜面形变是高分辨率空间光学传感器的主要误差来源之一,会严重影响成像质量,需要进行在轨校正。

目前主要通过波前传感装置测量波前误差,利用主镜背面分布的大量面形致动器进行校正,或者通过主镜背面面形致动器与出瞳处变形镜共同进行校正。例如美国的哈勃太空望远镜(HST),通过主镜背面分布的 24 个面形致动器,外带一个主镜共轭位置的校正器共同完成主镜面形误差的校正<sup>[13]</sup>。这种方案使得主镜的结构非常复杂,而且需要使用波前传感器,系统复杂。

大口径主镜面形误差校正中另一个关键技术问题是,在单位长度被校正面形误差空间周期相同的情况下,变形镜校正通道数与口径平方成正比,即变形镜校正通道数随着口径的增大而急剧增加,例如双子行星相机(GPI)8 m 大口径望远镜要求的变形镜通道数即达 2000<sup>[14]</sup>。对于如此大通道数变形镜自适应光学系统的控制校正,传统的波前测量方法系统复杂,数据处理量大。另外,传统压电式变形镜体积较大,造价昂贵,电源复杂庞大,不适用于变形镜通道数较大的自适应光学系统。利用 MEMS 工艺制造的变形镜,采用硅片微制造加工工艺,大大减小了致动器间隔,可以满足大通道数的需求,正在被许多国家所研究。

本文提出一种基于模式系数 SPGD 方法直接

利用位于主镜共轭位置的大通道数 MEMS 变形镜来对主镜面形误差进行无波前传感器校正的方案。该方案具有以下特点:1)不再使用哈特曼-夏克(H-S)、干涉仪等波前测量装置,系统简单,容易实现;2)直接利用大通道数 MEMS 变形镜进行校正,不需要主镜背后的面形致动器,大大简化了主镜结构;3)针对传统 SPGD 方法在变形镜通道数较大时寻优失败的问题,采用基于模式系数的 SPGD 方法解决了大通道数 MEMS 变形镜的优化控制问题,控制参数不再是大通道数的变形镜控制单元,而是优化模式的系数,大大减小了优化参数数目,提高了优化的可行性及效率。

### 3.1 高分辨率空间光学遥感器仿真模型

三反射式消像散光学系统因其结构紧凑、消像差能力强等原因,越来越多地应用于空间遥感器中<sup>[15]</sup>,已成为当前高分辨率空间光学遥感研究的前沿和热点。为了避免反射镜的二次遮拦,多采用偏视场使用的同轴三反射式光学系统。本文以一个典型的偏视场使用同轴三反射式空间光学系统为例,研究高分辨率空间光学遥感器在轨无波前传感器校正,仿真模型如图 3 所示。

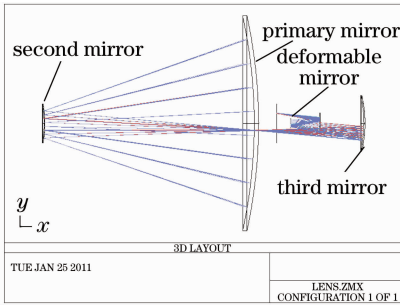


图 3 高分辨率空间光学遥感器仿真模型

Fig. 3 Simulation model of high resolution space optical remote sensor

系统主要由主镜、二镜、三镜三个非球面镜组成,在主镜共轭位置处布置了一个变形镜作为校正器。主镜口径 2.5 m,焦距 21.6 m。系统结构紧凑,具有较强的消像差能力。

### 3.2 基于 Zernike 模式 SPGD 算法原理

一般对于波前误差的描述,最常用的是圆域正交 Zernike 多项式

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^n a_i Z_i(x, y), \quad (5)$$

式中  $Z_i$  为第  $i$  阶 Zernike 多项式,  $a_i$  为第  $i$  阶 Zernike 多项式系数,  $n$  为所用 Zernike 多项式阶数。

使用变形镜来拟合 Zernike 多项式描述的波前

可得<sup>[16]</sup>

$$\sum_{i=1}^n a_i Z_i(x, y) = \sum_{j=1}^n u_j V_j(x, y) + E(x, y), \quad (6)$$

式中  $V_j$  为变形镜第  $j$  个控制单元的影响函数,  $u_j$  为该控制单元电压,  $E(x, y)$  为波前拟合残差小量, (6) 式两边同时乘以一个驱动器影响函数并在变形镜通光口径  $D$  内积分平均, 可得<sup>[17]</sup>

$$C_{zv} a = C_v u + \varepsilon, \quad (7)$$

式中  $C_{zv}$  为驱动器影响函数与 Zernike 模式间的相互关系矩阵;  $C_v$  为驱动器影响函数间的耦合矩阵, 对称可逆;  $\varepsilon$  为拟合残差向量, (7) 式最小方差解为

$$u = C_v^{-1} C_{zv} a. \quad (8)$$

$S$  表示变形镜的面积。可以证明最佳控制电压  $u$  使得波前拟合方差  $\sigma_\varepsilon^2 = S^{-1} \int E^2(x, y) dx dy$  最小。

### 3.3 基于模式系数 SPGD 法大口径主镜大通道数 MEMS 变形镜校正

(8) 式建立起了 Zernike 多项式系数与变形镜控制电压之间的关系, 根据 SPGD 算法对变形镜控制电压进行优化的原理, 将优化对象由传统 SPGD 的变形镜控制电压转变为所要优化的 Zernike 多项式的模式系数。对于通道数较大的变形镜而言, 采用基于模式系数的 SPGD 法, 可大大减少控制参数, 提高优化效率。基于模式系数 SPGD 方法的具体过程类似于传统 SPGD 算法, 公式为

$$\begin{cases} a_i^+ = a_i^{(m)} + \delta a_i \\ \delta J = J^+ - J \\ a_i^{(m+1)} = a_i^{(m)} - \mu \delta J \delta a_i^{(m)} \end{cases}. \quad (9)$$

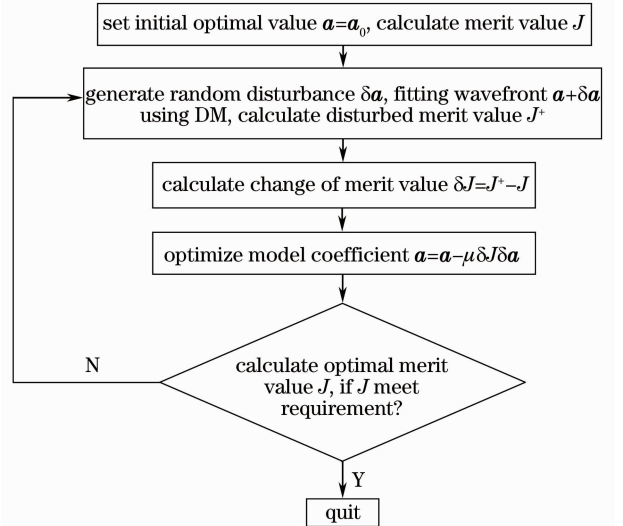


图 4 基于模式系数 SPGD 方法校正主镜面形误差流程图

Fig. 4 Flow chart of primary mirror surface error correction using model-based SPGD



校正流程图如图 4 所示。

通过对图 3 随机生成 50 次主镜面形误差,利用  $40 \times 40$  通道、致动器按照方形排布,并且每个致动器可以按照 (piston-tip-tilt) 三维致动的 MEMS 变形镜作为校正器,通过基于模式系数的 SPGD 方法进行误差校正。

研究表明,空间望远镜主镜面形误差主要来自空间热畸变及重力变形等的影响,包括倾斜、离焦、

彗差等低阶误差<sup>[18]</sup>,故这里的面形误差通过随机生成前 9 阶 Zernike 多项式系数产生,像质评价函数选择光斑平均半径,如(2)式。

考虑到对光学系统性能评价的一般习惯,这里给出校正前后系统出瞳波像差峰谷(PV)及 RMS 变化,如图 5 所示。

50 次校正前后出瞳波像差 RMS 值的概率密度分布如图 6 所示。

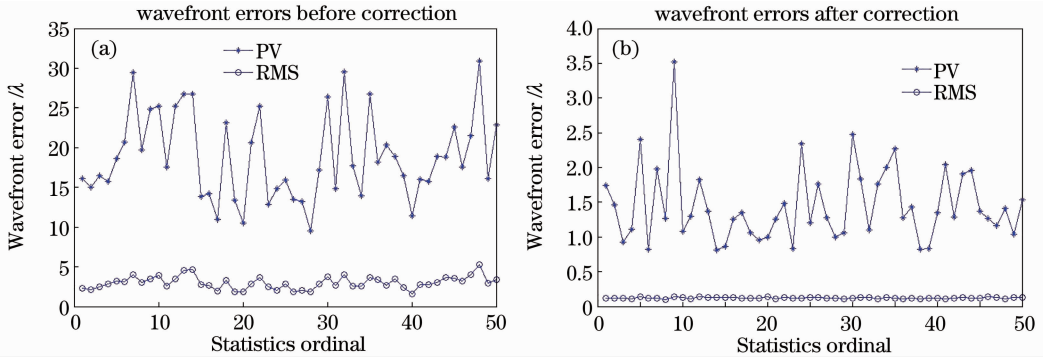


图 5 50 次随机面形误差校正前(a)后(b)出瞳波像差

Fig. 5 50 exit wavefront errors (a) before and (b) after random surface error correction

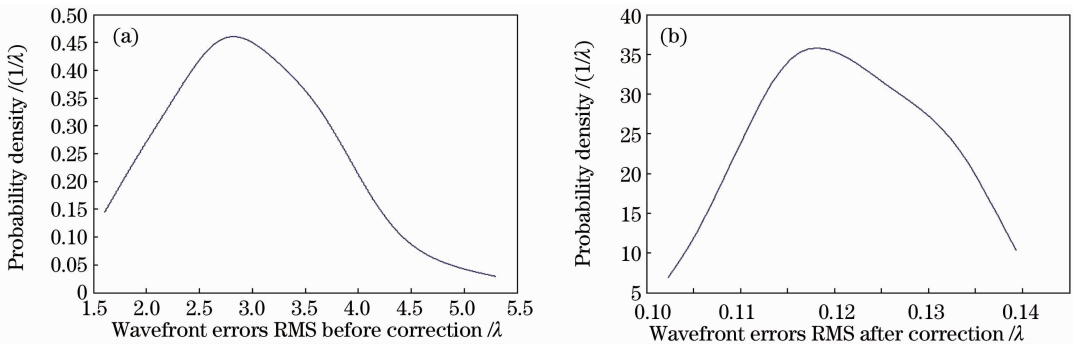


图 6 50 次校正前(a)后(b)出瞳波像差 RMS 值概率密度分布

Fig. 6 50 probability distribution of wavefront errors RMS (a) before and (b) after correction

可见,用基于模式系数的 SPGD 方法对大通道数 MEMS 变形镜进行无波前传感器控制,实现了大口径主镜面形误差校正。校正后出瞳波像差 PV 和 RMS 值均得到了有效抑制,校正后,出瞳波像差 RMS 主要集中在  $1/8\lambda \sim 1/9\lambda$  附近。

#### 4 宽视场无波前传感器校正

高分辨率空间光学传感器由于工作轨道较高,其视场范围不受大气湍流的限制,而是主要受到光学系统自身误差的影响,工作视场一般较大,约为  $1^\circ$ 。采用自适应光学进行校正时,通常是针对轴上视场波像差进行校正,轴外视场波像差不能被完全补偿,导致边缘视场像质相对下降,成像不理想。

目前少有对于高分辨率空间光学传感器的宽视

场校正研究,2002 年,McComas 等<sup>[19]</sup>提出用于空间望远镜的宽视场校正自适应光学方法,该方法认为不同视场的波像差仅取决于系统的角放大率,没有考虑轴外视场像差。

此外,还可在各个视场分别设置一个波前传感器以探测相应视场波前误差,利用变形镜逐一进行校正,这种方法需要多个波前传感器,结构非常复杂。

本文提出一种基于 SPGD 的视场像质评价函数加权校正的无波前传感器宽视场自适应光学校正方法。通过对各个分视场像质评价函数进行一定的加权控制,利用 SPGD 算法实现高分辨率空间光学传感器的宽视场自适应光学校正。校正流程为:

1) 从成像探测器上获取光强信息,计算每个分

视场的像质评价函数,根据实际需要,将各个视场像质评价函数按照一定的权重进行加权求和作为 SPGD 优化算法的评价函数  $J$

$$J = \sum_{i=1}^n w_i J_i, \quad (10)$$

式中  $w_i$  为第  $i$  个视场的权重,  $n$  为视场总数,  $J_i$  是根据第  $i$  个视场光强信息计算而得的像质评价函数。

2) 给波前校正器(变形镜)的控制电压施加一定的微小扰动,按照(10)式计算扰动后系统的加权评价函数  $J^+$ 。

3) 计算扰动引起的像质评价函数变化量  $\delta J = J^+ - J$ ,根据 SPGD 优化(1)式对变形镜的控制电压进行优化。

该方法的主要特点是:1)由于 SPGD 算法基于像质评价函数校正的特点,通过像面光强获取像质评价函数非常方便;2)不需要任何波前传感器,不需要波前重构运算,相对于传统波前探测的方法,系统简单,易于实现;3)通过对各个分视场评价函数权重的控制,可以针对不同的应用环境实现不同目标,即通过所有视场加权实现全视场波前误差的平衡校正或通过提高某个感兴趣视场的权重,实现对某个特定区域重点校正。

设计并研制了无波前传感器宽视场校正原理性实验平台如图 7 所示,系统视场范围为  $\pm 0.76^\circ$ 。

光纤光源经过准直镜出射为平行光,通过 lens 1 聚焦到毛玻璃上,产生散射光,照射到靶标上。透射靶标的光线经过 lens 2 后,由一个相位板作为误差源引入扰动。扰动光波经过变形镜后,通过成像透镜 lens 3 聚焦到 CCD 上。根据 CCD 上测得的光强信息获取像质评价函数,利用 SPGD 算法对变形镜的控制电压进行优化,从而实现宽视场自适应光学校正。

实验中使用的变形镜为 OKO 公司生产的 37 通道薄膜变形镜。CCD 为敏通公司生产的低噪声 8 位 CCD,像素数为  $288 \text{ pixel} \times 352 \text{ pixel}$ ,信噪比大于 48 dB。

采用了自行研制的靶标,由一组均匀分布在十字线上的星点组成,星点直径为 0.05 mm,可根据像面光斑的位置计算星点视场角,靶标及其视场划分如图 8 所示,其中边缘视场 2,3,4,5 对中心视场 1 的张角为  $0.43^\circ$ 。

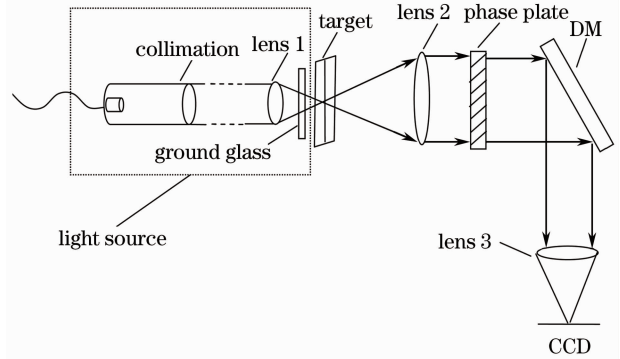


图 7 宽视场原理

Fig. 7 Wide-field schematic

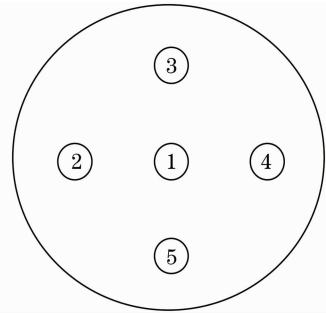


图 8 实验所用靶标及视场划分

Fig. 8 Target used in the experiment and the field division

不存在扰动时的靶标像,以及加入扰动后靶标像如图 9 所示。

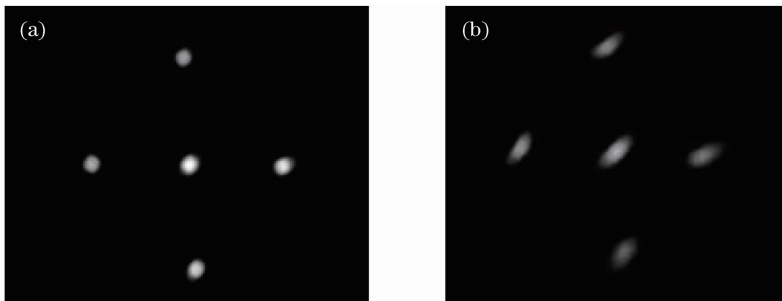


图 9 加入扰动前(a)后(b)靶标像

Fig. 9 (a) Initial and (b) disturbed images of target

由于靶标中每个光源均可视为一个点目标,故这里的像质评价函数仍然选择光斑平均半径,如(2)式所示。分别针对视场 1,4 像质评价函数进行校正,即分别将视场 1,4 像质评价函数权重设为 1,其余视场权重设为 0,校正后结果如图 10 所示。

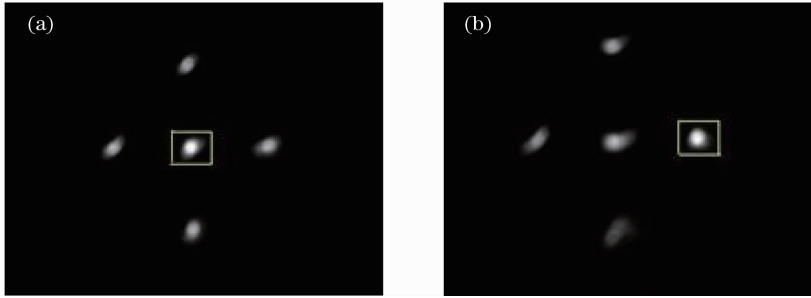


图 10 基于视场 1(a),4(b)评价函数校正结果

Fig. 10 Correction results based on (a) merit of field 1 and (b) merit of field 4

相应的各个视场像质评价函数变化情况如表 1 所示,其中评价函数相对变化百分比为 $(J_a - J_b)/J_b$ , $J_a$ 代表校正前评价函数值, $J_b$ 代表校正后评价函数值。

表 1 基于视场 1,4 校正前后各个视场评价函数值变化情况

Table 1 Merits' change before and after correction based on field 1 and field 4

Merits' value	Fields				
	1	2	3	4	5
Before correction	7.2519	6.5182	6.2243	7.1241	7.1303
After correction based on field 1	5.7510	5.7756	5.3189	6.3068	6.1338
Relative change /%	-20.70	-11.39	-14.55	-11.47	-13.98
Before correction	7.3890	6.6729	6.0716	7.2803	6.9082
After correction based on field 4	6.7352	6.3350	5.4359	5.2447	7.9684
Relative change /%	-8.85	-5.06	-10.47	-27.96	15.35

可见,当仅根据某个视场像质评价函数,利用 SPGD 方法进行校正时,该视场像质明显变好,其余视场像质改善情况不定,个别视场出现变差情况。

将所有 5 个视场权重均设为 1 进行校正,作为全视场平衡校正;将视场 2,5 评价函数权重设为 10,其余视场评价函数权重设为 1 进行校正,作为视场 2,5 权重加大校正,校正结果如图 11 所示。

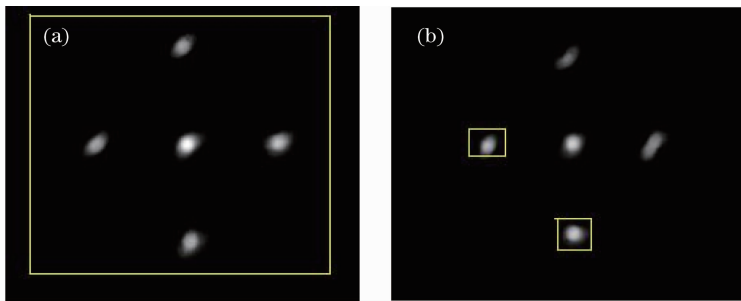


图 11 全视场评价函数加权校正结果。(a)全视场平衡校正;(b)视场 2,5 权重加大校正

Fig. 11 Correction results with merit weights in all fields. (a) Balanced correction in all fields;

(b) correction with enlarged weights in field 2 and field 5

相应的像质评价函数变化如表 2 所示。

可见,全视场平衡校正后,所有视场光斑像质均有所提高。当加大某个(或几个)视场权重以后,相对于全视场平衡校正的情况,权重加大相应视场的像质明显提高。

由此可得,基于 SPGD 的视场像质评价函数加权无波前传感器宽视场校正方法具有明显优势:1) 可以灵活选择校正视场,根据不同的应用需求有效地校正系统波前误差;2) 不需要任何波前传感器或测量装置,简单易行。

表 2 全视场平衡校正及视场 2、5 权重加大校正前后  
评价函数值变化情况

Table 2 Merits' change before and after balanced correction  
and enlarged weights in field 2 and field 5 correction

Merits' value	Correction fields	
	All fields	Field 2,5
Before correction	31.1814	12.2827
After balanced correction	26.1758	10.5764
Relative change /%	-16.05	-13.89
Before correction	30.5258	11.8163
After correction with enlarged weights in field 2 and field 5	27.4010	9.9029
Relative change /%	-10.24	-16.19

## 5 结 论

无波前传感器自适应光学去除了传统自适应光学中的波前传感器,不需要进行波前测量和重构,大大简化了系统结构,易于实现。本文提出将无波前传感器自适应光学技术应用于高分辨率空间光学遥感成像系统中,解决了主镜面形误差的大通道数 MEMS 变形镜校正以及宽视场自适应光学校正等关键技术问题,不需要使用波前传感器,无需波前重构,大大简化了系统结构。

## 参 考 文 献

- Xiaofang Zhang, Xin Yu, Jixiang Yan *et al.*. Application of adaptive optics to a space-ground large deployable optics system [C]. *SPIE*, 2009, **7281**: 72810T
- Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Comparison of several stochastic parallel optimization control algorithms for adaptive optics system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(1): 11~16
- 杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统几种随机并行优化控制算法比较[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(1): 11~16
- 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
- 韩杏子, 胡新奇, 俞 信. 高分辨率空间光学系统位置误差的无波前传感综合校正[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0626003
- M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, J. C. Ricklin. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(12): 907~909
- P. Yang, S. J. Hu, S. Q. Chen *et al.*. Research on the phase aberration correction with a deformable mirror controlled by a genetic algorithm[J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2006, **48**(1):

1017~1024

- Kang L. Sh., Xie Y., You Sh. Y. *et al.*. The Simulated Annealing Algorithm[M]. Beijing: Science Press, 1998. 3275
- Liu Jiaguo. Research on Adaptive Optics Correction of Aero-Optical Effects Wavefront Distortion [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008. 47~52
- 刘家国. 气动光学效应波前畸变的自适应光学校正研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2008. 47~52
- R. K. Tyson. Introduction to Adaptive Optics[M]. Bellingham: SPIE Press, 2000
- Chen Bo, Yang Huizhen, Zhang Jinbao *et al.*. Performances index and convergence speed of parallel gradient descent algorithm in adaptive optics of point source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1144~1148
- 陈 波, 杨慧珍, 张金宝等. 点目标成像自适应光学随机并行梯度下降算法性能指标与收敛速度[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1144~1148
- Phillip A. Sabelhaus, John E. Decker. An overview of the James Webb Space Telescope (JWST) project [C]. *SPIE*, 2004, **5487**: 550~563
- William R. Oegerle, Lee D. Feinberg, Lloyd R. Purves *et al.*. ATLAST-9.2m: a large-aperture deployable space telescope[C]. *SPIE*, 2010, **7731**: 77312M
- Zhang Zhiwei, Yu Xin, Yang Bingxin. The application of adaptive optics on space optical remote sensor [J]. *High Technology Letters*, 2000, **10**(3): 48~52
- 张志伟, 俞 信, 杨秉新. 自适应光学在空间光学遥感器上的应用[J]. *高技术通讯*, 2000, **10**(3): 48~52
- Christopher J. Burrows. Hubble Space Telescope optics-problems and solutions[C]. *SPIE*, 1991, **1494**: 528~533
- B. A. Macintosh, J. Graham, D. Palmer *et al.*. The Gemini planet imager[C]. *SPIE*, 2006, **6272**: 62720L
- Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin *et al.*. Design on three-reflective-mirror system used in space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 216~219
- 常 军, 翁志成, 姜会林等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 216~219
- Wang Biru. Modal Based Wave Front Sensorless Adaptive Optics and Application in Microscopy[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009. 43~58
- 王碧如. 基于模式法的无波前传感自适应光学校正及其在显微镜中的应用[D]. 北京: 北京理工大学, 2009. 43~58
- Yang Huizhen, Li Xinyang. Stochastic parallel gradient descent algorithm for adaptive optics system based on Zernike mode[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(5): 645~648
- 杨慧珍, 李新阳. 基于 Zernike 模式的自适应光学系统随机并行梯度下降算法[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(5): 645~648
- Gong Dun. The Thermal Effect on Image Quality of the Remote Sensor Optical System [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010
- 巩 盾. 温度对遥感器光学成像质量的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010
- Brian K. McComas, Edward J. Friedman. Field-balanced adaptive optics error function for wide field-of-view space-based systems[J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(3): 567~574