

分块式三反系统面形误差和曲率半径不一致性误差的变形镜校正方法研究

韩杏子 胡新奇 俞 信

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 高分辨率空间遥感器要求大系统口径,然而单块大口径主镜的制造非常困难,而且受到运载火箭整流罩尺寸的限制,主镜口径增大程度有限,所以人们采用分块子镜拼接成一个整镜的方案来解决这一问题,但是分块子镜面形误差和曲率半径的不一致性会影响到整个系统的性能。提出利用位于出瞳处的变形镜对上述误差进行校正的方案,替代了现行的利用分块镜自身致动器进行校正的方法,并且进行了仿真分析,结果表明,该方案在一定条件下可以很好的补偿上述两种误差。

关键词 遥感;分块主镜;曲率半径不一致;面形误差

中图分类号 TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100302

Research on Correction of Surface Error and Radius Mismatch of Segmented Mirror of Three-Mirror Reflective Optical System with Deformable Mirror

Han Xingzi Hu Xinqi Yu Xin

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

Abstract High-resolution space remote sensor needs large system aperture, but it is hard to fabricate one single mirrors with large aperture, furthermore, limited by size of the rocket, and aperture of primary mirror can only be enlarged in a certain degree. This problem is solved by using several segmented mirror to build one large mirror. But surface error and radius mismatch of segmented mirror will decrease performance of the whole system. Substitute recent methods which use actuators of segmented mirrors to correct these errors, a new method using deformable mirror that lies in the exit pupil corrects those errors is proposed and simulation has been done. Simulation results show that this method can correct those errors very well in certain cases.

Key words remote sensing; segmented mirror; radius mismatch; surface error

OCIS codes 230.0230; 250.0250; 260.0260; 280.0280

1 引 言

随着航天遥感应应用需求的不断提高,发展高分辨率空间光学遥感器成为必然,另外,多光谱观测需要光学系统具有更高的集光能力,这就要求增大系统口径以满足上述要求,因此, Cole 等^[1]提出了分块折叠式超薄主镜的方案来实现大口径主镜。但是这样增大口径的同时也增加了系统的复杂性,分块镜之间的位置误差、各个分块镜曲率半径不一致误差(RM)和分块镜自身的面形误差(SE)等,都会影响系统成像质量^[2]。

目前对 SE 和 RM 误差主要是通过分块镜背面相应的致动器进行校正,以詹姆斯-韦伯太空望远镜为例,主镜分块镜背后通过六脚支撑,同时可以调节分块镜的位置误差,另外还有一个专门调节曲率半径的致动器,再加上校正面形的大量面形致动器^[3]。NASA 研制的下一代空间望远镜,也采用了类似的结构,每个分块镜面板背后有 3 个位置致动器,用于控制 6 个位置自由度,同时还配有面形致动器,用以控制分块镜形状^[4]。这就使主镜重量大大增加,结构非常复杂,加重了制造和运载的难度。

收稿日期: 2010-08-21; **收到修改稿日期**: 2010-12-02

作者简介: 韩杏子(1983—),女,博士研究生,主要从事无波前传感自适应光学方面的研究。E-mail: xinger@bit.edu.cn

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

E-mail: yuxin@bit.edu.cn

为此,本文提出利用出瞳处变形镜与主镜位置的共轭关系,通过测量出瞳波相差,使变形镜产生与之相反的面形,从而进行校正。这种方法可以简化甚至去除分块镜背后的面形致动器和曲率半径致动器,大大简化主镜结构,减小制造和发射的压力。

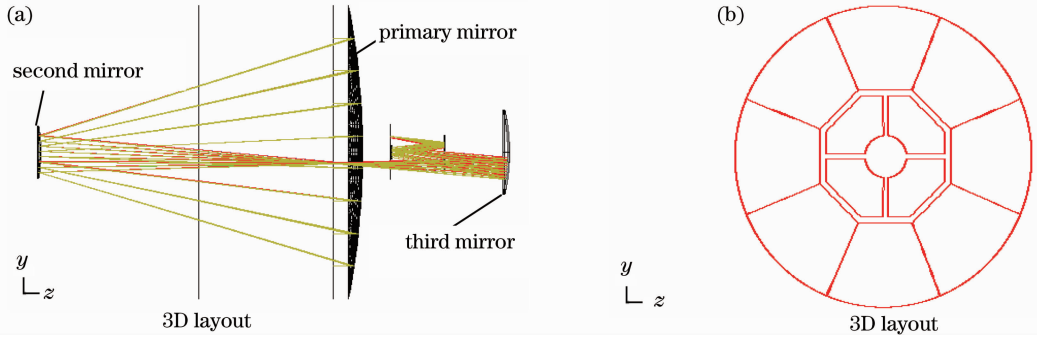


图 1 三反射式光学系统及主镜结构。(a)光学系统,(b)主镜结构

Fig. 1 Three-mirror reflective optical system and structure of primary mirror. (a) optical system, (b) shape of primary mirror

该光学系统主要由 3 个非球面镜组成,分别为分块主镜、二镜和三镜,变形镜位于出瞳位置,与分块主镜共轭。这种三反射式光学系统结构紧凑,具有较强的消像差能力。

3 误差校正

通过位于出瞳处的变形镜校正主镜分块镜 SE。选用目前最常用的两种变形镜:微机电变形镜(MEMS DM)和薄膜变形镜(MDM),其中 MEMS DM 致动器按方形排列。MDM 致动器按六边形排

2 仿真建模

在 Zemax 中搭建三反射式光学系统,其中主镜由 1 块八边形中心镜和 8 块环扇形分块镜构成,如图 1 所示。

列。如图 2 所示。

3.1 对分块镜 SE 的校正

一般对于波前误差的描述,最常用的是圆域正交 Zernike 多项式,但是仿真中用到的是环扇形分块镜,在这个区域内,原有的 Zernike 多项式将失去正交性。为了解决这一问题,利用 Gram-Schmidt 正交化方法^[5] Virendra N. Mahajan^[6] 和 C. F. Dunkl^[7] 分别推导出了环形、正六边形等非圆域 Zernike 多项式,这里利用该理论推导出对应于仿真中环扇域的正交 Zernike 多项式,方法如下:

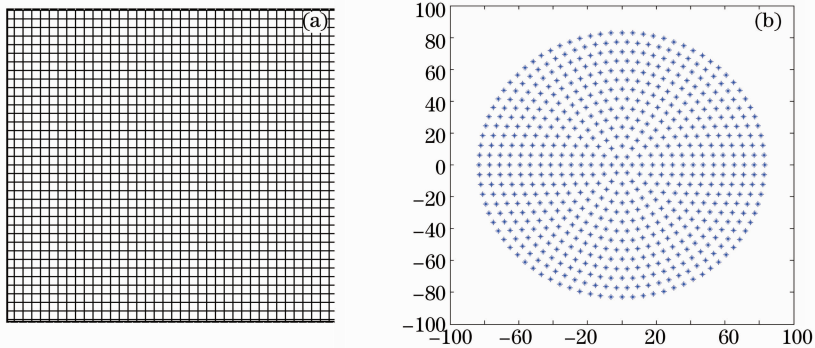


图 2 仿真中使用的(a)MEMS DM 和(b)MDM

Fig. 2 (a) MEMS DM and (b) MDM used in the simulation

以 $\{Z_j\}$ 表示圆域正交 Zernike 多项式, $\{X_j\}$ 表示非圆域内的正交多项式,按 Gram-Schmidt 正交化方法给出的 $\{X_j\}$ 为

$$\begin{cases} X'_1 = Z_1 \\ X'_j = Z_j - \sum_{k=1}^{j-1} \frac{\langle Z_j, X'_k \rangle}{\langle X'_k, X'_k \rangle} X'_k, (j = 2, 3, \dots), \\ X_j = \frac{X'_j}{\|X'_j\|_2}, (j = 1, 2, 3, \dots) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 和 $\| \cdot \|_2$ 可分别表示为

$$\begin{aligned} \langle f_1 \cdot f_2 \rangle &= S^{-1} \iint_{\Omega} f_1 \cdot f_2 dx dy, \\ \| f_1 \|_2 &= \left(S^{-1} \iint_{\Omega} f_1^2 dx dy \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (2)$$

式中 f_1, f_2 表示任意给定得连续函数, Ω 表示积分区域, S 表示积分区域的面积。

按照(1)式和(2)式推导出符合仿真中分块镜形状的正交 Zernike 多项式,记为 Sernike 多项式,前九阶 Sernike 如下:

$$\begin{aligned} S_1 &= 1 \\ S_2 &= 5.654x \\ S_3 &= 7.381y - 5.631 \\ S_4 &= 30.49x^2 + 30.49y^2 - 47.31y + 16.83 \\ S_5 &= 47.24xy - 37.48x \\ S_6 &= 12.96x^2 - 50.66y^2 + 75.3y - 27.44, \quad (3) \\ S_7 &= 287x^2y + 287y^3 - 233.8x^2 - \\ &\quad 653.9y^2 + 480y - 112.7 \\ S_8 &= 179.7x^3 + 179.7xy^2 - 293.1xy + 105.7x \\ S_9 &= 137.5x^2y - 385.3y^3 + 858.7y^2 - \\ &\quad 118.0x^2 - 627.6y + 150.6 \end{aligned}$$

由(3)式可以看出,环扇域 Sernike 多项式具有跟 Zernike 类似的意义,如第一阶表示平移,第二,三阶分别表示 x 方向和 y 方向倾斜等。

根据(3)式,则分块镜 SE 可以表示为

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^n a_i S_i(x, y), \quad (4)$$

式中 S_i 为第 i 阶 Sernike 多项式, a_i 为第 i 阶 Sernike 多项式系数。

按照(4)式给分块镜加 SE,各项 Sernike 系数在 $0 \sim 1$ 之间随机取值(用到前 9 阶 Sernike 多项式),加 SE 后的波面如图 3 所示, f_{RMS} 为波相差。

3.1.1 MEMS 变形镜校正分块镜 SE

MEMS DM 的各个致动器之间无耦合,仿真中

表 2 耦合系数对薄膜变形镜校正分块镜 SE 的影响

Table 2 Effect of coupling of MDM on correction of segmented SE

Coupling coefficient	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
Mean RMS before correction / λ	0.4903	0.4916	0.4890	0.4878	0.4616	0.4928
Mean RMS after correction / λ	0.1183	0.1106	0.1141	0.0792	0.0744	0.0813
Probability of $f_{RMS} \leq 0.1\lambda$ after correction / %	20	33	30	93	89	89

由表 2 可以看出,耦合系数过小(本例中小于 0.4),致动器间影响太小,镜面连续性差,校正效果

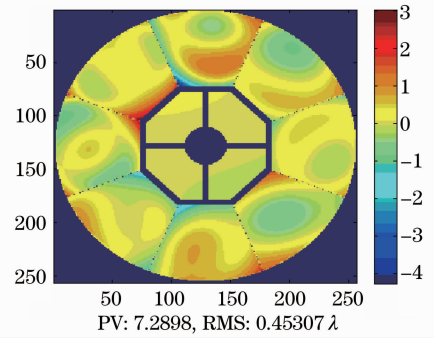


图 3 加上 SE 的波面

Fig. 3 Wavefront map with SE

用到的 MEMS DM 致动器沿 piston 方向独立致动。本文采取致动器线性响应的方式,取不同通道数,进行了 100 组校正仿真,结果如表 1 所示。

表 1 MEMS DM 对分块镜 SE 的校正效果

Table 1 Correction results of SE with MEMS DM

Numbers of channel	100×100	123×123	200×200
Mean RMS before correction / λ	0.4857	0.4830	0.4852
Mean RMS after correction / λ	0.1066	0.0871	0.0653
Probability of $f_{RMS} \leq 0.1\lambda$ after correction / %	39	92	99

由表 1 可见,通道数越多,校正效果越好,对于本文所加的 SE,当 MEMS DM 通道数大于 15000 时,校正后波相差 RMS 在 0.1λ 以内。

3.1.2 MDM 校正分块镜 SE

影响 MDM 性能的两个主要参数是致动器间距和致动器间的耦合系数。仿真中,变形镜口径固定,致动器按六边形排列,所以致动器间距取决于致动器的数量。致动器间耦合系数过大,每个致动器对周围致动器的影响增大,耦合系数过小,镜面连续性变坏。

首先研究耦合系数对校正效果的影响。以 1027 通道 MDM 为例,致动器影响函数为高斯型,进行了 100 组仿真,结果如表 2 所示。

也会变差。而当耦合系数过大时,致动器间影响太大,同样会影响校正效果,对于本文仿真系统,耦合

系数为 0.4 时最佳。

然后研究同样耦合系数下,通道数对 MDM 校正效果的影响。取耦合系数为 0.4,通道数为 127,

表 3 不同通道数薄膜变形镜对分块镜 SE 校正结果

Table 3 Correction results of SE with MDM of different channels

Numbers of channel	127	547	1027	2107
Mean RMS before correction / λ	0.4908	0.4897	0.4878	0.4941
Mean RMS after correction / λ	0.2312	0.1311	0.0792	0.0517
Probability of $f_{RMS} \leq 0.1\lambda$ after correction /%	0	6	93	100

由表 3 可以看出,同样耦合系数下,通道数越大,校正效果越好。对于与图 3 相同的方法施加的 SE,耦合系数为 0.4,通道数大于 1027 时,校正后像面平均波相差 $f_{RMS} < 0.1\lambda$ 的概率大于等于 93%。

综合以上对于 MDM 通道数和耦合系数的仿真结果,考虑到分块镜除了 SE 以外,还存在 RM 误差,本文选用耦合系数为 0.4,通道数为 2107 的 MDM 进行下一步研究。

3.2 对 RM 误差的校正

曲率半径误差对于整镜会产生一个离焦误差,影响并不大,只需要调整某个光学元件的位置即可校正^[2]。但是对于分块镜,很难保证每个分块镜的曲率误差都相等,这种不一致误差会给系统带来很大影响。以本仿真系统为例,利用蒙特卡洛方法进行分析,分别取这种不一致性误差为曲率半径的千分之一、万分之一或十万分之一,每种误差按照正态

表 5 变形镜对分块镜 RM 的校正结果

Table 5 Correction results of RM of segmented mirror

$\Delta R/R$	Mean RMS after correcting with 2107 MDM / λ	Mean RMS after correcting with 123×123 MEMS DM / λ
0.0001	0.0175	0.0306
0.00001	0.0035	0.0083

可见,当曲率半径误差在 0.0001 以内时,用耦合系数 0.4,通道数 2107 薄膜变形镜,或者通道数为 123×123 的 MEMS DM 进行校正,都会达到比较好的效果,校正后系统波像差 RMS 的值小于 0.04λ ,且 RM 越小,同一变形镜校正效果也会明显变好。

3.3 对分块镜 SE 和曲率半径误差的校正

实际中,分块镜的 SE 和 RM 误差是同时存在的,所以有必要研究变形镜对同时存在这两种误差时的校正效果。

按照 3.1 和 3.2 节相同的方法同时对分块镜加 SE(用前 9 阶 Sernike 多项式表示,系数在 0~1 之

547,1027,2107 的 MDM 对上述 SE 进行校正,结果如表 3 所示。

分布随机产生 100 组数据进行仿真,引起系统出瞳 RMS 变化情况如表 4 所示。

表 4 RM 对系统性能的影响

Table 4 Effect of RM on performance of optical systems

$\Delta R/R$	Wavefront error with probability of 98%
0.001	$f_{RMS} \leq 2.65\lambda$
0.0001	$f_{RMS} \leq 0.28\lambda$
0.00001	$f_{RMS} \leq 0.0689\lambda$

由表 4 可以看出,当 RM 为千分之一时,引起的出瞳波相差达到了 2.65 个波长,所以实际中应该保证 RM 小于千分之一。分别对分块镜 RM $\Delta R/R$ 在 $\pm 0.0001, \pm 0.00001$ 之间,均值为 0 的随机正态分布误差,通过上述两种变形镜进行校正,结果如表 5 所示。

间随机取值)和 RM($\Delta R/R$ 在 $\pm 0.0001, \pm 0.00001$ 之间按照均值为 0 的正态分布随机取值),其中一次出瞳波面如图 4 所示。

分别用 123×123 通道 MEMS DM 和 2107 通道耦合系数为 0.4 的 MDM 对图 4 所示误差进行校正,进行 100 组仿真,结果如表 6 所示。

由表 6 结果可见,用上述两种变形镜对 Sernike 系数在 0~1 之间随机分布的 SE 和 RM(0.0001, 0.00001)同时存在的情况进行校正后,出瞳波相差 $f_{RMS} < 0.1\lambda$,且同样 SE 下,RM 越小,校正效果越好。

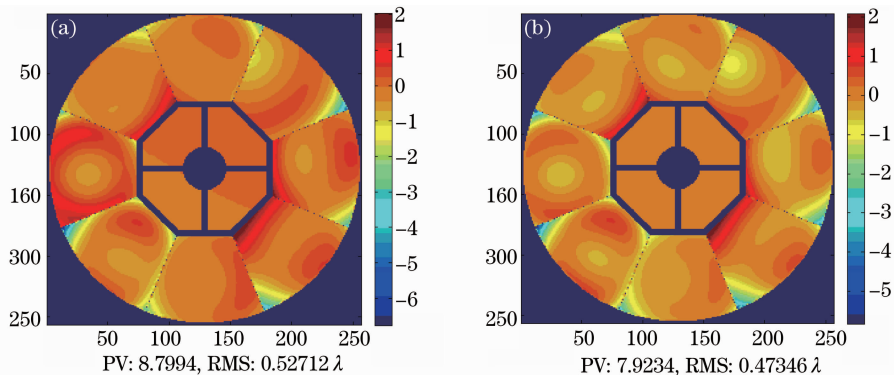


图 4 同时存在 SE 及 RM 的波面。(a) RM 0.0001, (b) RM 0.00001

Fig. 4 Wavefront map with SE plus RM. (a) RM 0.0001, (b) RM 0.00001

表 6 变形镜对 SE 和 RM 的校正效果

Table 6 Correction results of SE and RM with DM

SE	$\Delta R/R$	RMS after correcting with 2107 MDM / λ	RMS after correcting with 123 \times 123 MEMS DM / λ
The first nine coefficients of sernike are between 0~1 randomly	0.0001	0.0527	0.0927
	0.00001	0.0499	0.0845

4 结 论

通过位于主镜共轭位置的变形镜以及出瞳处测得的波相差,对分块镜 SE 和 RM 进行校正,分别研究了 MEMS DM 和 MDM 的性能参数对校正效果的影响,分析了 RM 对三反射式系统的影响,给出了特定 RM 下的校正结果,最后选择合适的 MEMS DM 和 MDM,对同时存在的 SE 和 RM 进行了校正。这种方法可以在一定误差范围内简化甚至去除分块镜背后的面形致动器和曲率致动器,这样就可以大大简化主镜结构,降低制造和运载发射的压力。

参 考 文 献

1 Glen C. Cole, Robert Garfielda, Tracy Peters *et al.*. An overview of optical fabrication of the JWST mirror segments at

Tinsley[C]. *SPIE*, 2006, **6265**: 62650V1
 2 Dewen Cheng, Yongtian Wang, M. M. Talha *et al.*. Effect of radius mismatch on performance of segmented telescopic systems [c]. *SPIE*, 2007, **6834**: 68341Y1
 3 David M. Chaney, James B. Hadaway, Jake Lewis. Cryogenic radius of curvature matching for the JWST primary mirror segments [C]. *SPIE*, 2009, **7439**: 1~9
 4 David N. Jacobson, Max Nein, Larry Craig *et al.*. Design of a large lightweight space telescope optical system for the next generation space telescope[C]. *SPIE*, 1998, **3356**: 74~88
 5 G. A. Korn, T. M. Korn. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*[M]. New York: McGraw-Hill, 1967. 19~21
 6 Virendra N. Mahajan. Zernike annular polynomials for imaging systems with annular pupils [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(1): 75~85
 7 C. F. Dunkl. Orthogonal polynomials on the hexagon[J]. *SIAM J. Appl. Math.*, 1987, **47**(2): 343~345