

## 基于多视场波前传感的次镜位置误差检测方法

赵 东, 张晓芳, 陈蔚霖, 武楚晗

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

**摘 要:** 大口径分块式主镜空间对地遥感系统在轨工作时, 次镜相对于主镜的位置失调会对系统像质产生影响, 需对其进行在轨检测与校正。当分块式主镜无中心基准镜时, 无法用传统的灵敏度矩阵反演法计算出次镜失调量。为此, 提出了一种基于多视场波前传感信息计算次镜位置失调量的方法, 采用 ZEMAX 软件建立了无中心基准的 36 分块式主镜空间对地遥感系统。针对该系统像差特点, 利用不同视场的场依赖波前像差, 建立了次镜失调量检测数学模型, 开展了仿真研究, 结果表明当波前传感误差为  $1/40\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ) 时, 次镜位置失调量的检测精度 X、Y 方向平移约为 30 nm, 倾斜约为  $15''$ ; 失调量检测动态范围 X、Y 方向平移为 0~1.5 mm, 倾斜为 0~0.03°。并通过多组实际仿真, 验证了所提方法的可行性。

**关键词:** 大口径分块式主镜; 次镜失调; 多视场波前传感; 场依赖波前像差; 检测精度  
**中图分类号:** TH751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0817010

## Secondary mirror position error detection method based on multi-field wavefront sensing

Zhao Dong, Zhang Xiaofang, Chen Weilin, Wu Chuhan

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

**Abstract:** When the space-to-ground optical remote sensing system with a segmented primary worked, the alignment degeneracies of secondary mirror relative to the primary mirror would have an impact on the image quality, which should be detected and corrected online. When there was no center segmented-mirror in the segmented primary mirror, the traditional sensitivity matrix inversion method would not be used to calculate the alignment degeneracies of secondary mirror. It proposed a method to calculate the misalignment of the secondary mirror by using the multi-field wavefront sensing information. Based on ZEMAX, it established a space-to-ground remote sensing system with 36 segmented primary mirror, in which there was no center mirror. For the optical system with special aberration characteristics, it built a mathematical model to obtain the misalignment of secondary mirror by means of the field-dependent wavefront aberration which can be got by multi-field wavefront sensing. The simulation results showed that when the wavefront sensing error is  $1/40\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ), the detection accuracy of the misalignment of secondary mirror on X,Y-translation and X,Y-tilt reached 30 nm and  $15''$  respectively; the detection

收稿日期: 2018-03-13; 修订日期: 2018-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(61471039)

作者简介: 赵东(1994-), 男, 硕士生, 主要从事自适应光学方面的研究。Email: 449135422@qq.com

导师简介: 张晓芳(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事自适应光学方面的研究。Email: zhangxf@bit.edu.cn

range of the misalignment of secondary mirror on X,Y-translation and X,Y-tilt are 0-1.5 mm and 0-0.03° respectively. And a lot of simulations based on the real space optical remote system were done to prove the feasibility of the proposed method.

Key words: large segmented -primary mirror; secondary mirror misalignment; multi -field wavefront sensing; field-dependent wavefront aberration; detection accuracy

## 0 引言

近年来,越来越多的大口径分块式主镜空间光学遥感系统被用于对地探测,军事侦察等<sup>[1-2]</sup>。此类光学系统多采用三反结构,包括主镜、次镜和三镜,具有大口径、长焦距、轻量化的特点。当其在轨工作时,由于受振动、冲撞、空间微重力环境以及热环境等各种因素<sup>[3-4]</sup>的影响,次镜相对于主镜的位置会发生失调,影响其成像质量,必须进行在轨检测与校正。传统的检测方法是利用干涉仪或波前传感器测出系统波前像差与次镜失调量之间的关系,建立灵敏度矩阵,再用灵敏度矩阵反演法<sup>[5]</sup>反演出次镜的具体失调量。2006年,黄一帆等采用灵敏度矩阵反演法对一个4m口径的三反射式光学系统进行在轨调校,获得了良好的校正效果<sup>[5]</sup>;2010年,韩杏子等提出利用随机并行梯度下降(SPGD)算法对次镜的6个位置自由度进行优化,初步实现了次镜的无波前传感在轨调校<sup>[6]</sup>。为提高校正精度,扩大校正范围,随后又提出将随机并行梯度下降算法、相位变更法和灵敏度矩阵反演法相结合的在轨调校方法<sup>[7]</sup>。

对大口径分块式主镜空间对地遥感系统来说,上述方法虽然可实现次镜高精度在轨调校,但均要求遥感系统中的分块式主镜具有中心基准镜,否则无法建立基准系统,造成方法失效。

针对上述问题,文中以无中心基准子镜的36分块式主镜空间对地遥感系统为研究对象,提出了一种利用多视场波前传感信息来计算次镜失调量的方法,针对该系统像差特点,通过获取不同视场的场依赖波前像差,建立了次镜失调量检测数学模型,开展了相关的仿真研究,有效验证了该方法的可行性,为大口径分块式主镜空间对地遥感系统次镜在轨装调的实际应用奠定了基础。

## 1 基本原理

文中所提方法适用于无中心基准镜的分块式主镜空间对地遥感系统。

为研究方便,利用ZEMAX软件,建立了如图1所示的典型空间对地遥感三反光学系统。其口径8m,焦距108m,包括非球面主镜、次镜和三镜。其中主镜是由36块正六边形子镜构成且无中心基准镜。系统基本参数如图2所示。

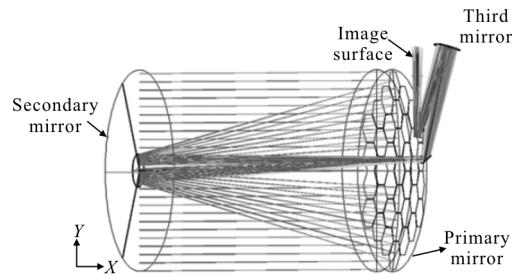


图 1 大口径分块式空间对地遥感系统

Fig.1 Space-to-ground optical remote sensing system with large segmented primary

Surf. Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Seal-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity
1*	Standard	Infinity	0.000		4081.591
2*	Standard	Infinity	1.123E+004		4081.591
4	Non-Seq. 主镜	-2.662E+004	-		4100.000 U
5	Coordinate	Infinity	-1.024E+004		4100.000 U
6	Standard	次镜	1.177E+004	MIRROR	676.484
7	Coordinate		0.000 P		0.000
8	Coordinate		0.000		0.000
9*	Standard	Infinity	0.000	MIRROR	977.693
10	Coordinate		-5229.135		0.000
11	Coordinate		0.000		0.000
12*	Even Asph. 三镜	6122.094	3836.611	MIRROR	1011.339
13	Coordinate		0.000 P		0.000
14	Coordinate		0.000		0.000
15	Standard	Infinity	0.000	MIRROR	157.276
16	Coordinate		-2424.540		0.000
17	Coordinate		0.000		0.000
18	Standard	5.495E+005	-12.500	F_SILICA	190.680
19	Standard	Infinity	12.500		190.849
20	Coordinate		-12.500		0.000
21	Standard	Dunay	Infinity		598.352
INA	Standard	Infinity			807.637

图 2 ZEMAX 软件提供的光学系统基本参数

Fig.2 Basic parameters of the optical system in ZEMAX

该系统像差特点为:当次镜失调时,系统波前像差主要由三部分构成:占主体的慧差、小部分的离焦和像散。其中慧差并不随着视场的改变而改变,而离焦和像散随着视场而变化,将后者称为场依赖波前

像差<sup>[8]</sup>,其与次镜失调量密切相关。可通过获取不同视场的场依赖波前像差,计算出次镜失调量。算法原理详述如下:

根据光学系统的像差特点,当次镜失调后,可通过调整主镜各个分块镜的六自由度位置及曲率半径而使系统中心视场成像接近衍射极限,其残余像差为  $\phi_0(x_0, y_0)$ ,其中坐标  $(x_0, y_0)$  表示中心视场点。此时,在除中心视场外的其他任意视场处,波前像差可表示为:

$$\phi(x, y) = \phi_0(x_0, y_0) + \phi_{MF0}(x, y) + \phi_{MF}(x, y, v, w) \quad (1)$$

式中:  $x$  和  $y$  为物面坐标;  $v$  和  $w$  像面坐标;  $\phi_0(x_0, y_0)$  为残余像差;  $\phi_{MF0}(x, y)$  为除中心视场外,任意视场  $(x, y)$  处的设计误差;  $\phi_{MF}(x, y, v, w)$  为由于次镜相对主镜失调而产生的场依赖波前像差。

由于次镜具有关于  $Z$  轴对称的结构且其沿  $Z$  轴的平移量可通过移动焦面位置补偿,故文中仅讨论次镜具有  $X$ 、 $Y$  方向平移和  $X$ 、 $Y$  方向倾斜四种失调量的情况。这四种失调量所引起的波前误差相互独立,因此可用其线性组合来表示公式(1)中的场依赖波前像差:

$$\phi_{MF}(x, y, v, w) = \sum_{j=1}^4 m_j \times \varphi_j(x, y, v, w) \quad (2)$$

式中:  $j=1-4$  分别代表次镜沿  $X$ 、 $Y$  方向的平移及  $X$ 、 $Y$  方向的倾斜(后文中出现的  $j$  都表示此含义);  $m_j$  为对应的次镜失调量大小;  $\varphi_j(x, y, v, w)$  为多视场影响函数,是次镜产生某一单位失调量时所引起的视场点  $(x, y)$  处的场依赖波前像差,其由光学系统自身特性决定。

任意视场点  $(x, y)$  处的场依赖波前像差计算过程如下:

(1) 针对所研究的光学系统,选取除中心视场外若干个视场点  $(x, y)$ ,利用光学设计软件,得到系统未失调时,各个视场的设计误差  $\phi_{MF0}(x, y)$ ;

(2) 使光学系统次镜失调,此时通过调整主镜分块镜的六自由度位置及曲率半径,使光学系统中心视场  $(x_0, y_0)$  处成像接近衍射极限,得到系统中心视场残余像差  $\phi_0(x_0, y_0)$ ;

(3) 采用一定的波前传感方法,获取除中心视场外,其他各个视场点处的波前像差  $\phi_j(x_0, y_0)$ ;

(4) 利用所得到的  $\phi_{MF0}(x, y)$ ,  $\phi_0(x_0, y_0)$  和  $\phi_j(x, y)$ ,根据公式(1),可计算出次镜产生某一失调量时所引

起的视场点  $(x, y)$  处的场依赖波前像差,即:

$$\varphi_j(x, y, v, w) = \phi_j(x, y) - \phi_0(x_0, y_0) - \phi_{MF0}(x, y) \quad (3)$$

若步骤(2)中次镜失调量为单位值,设  $X$ 、 $Y$  方向平移各为  $0.1 \text{ mm}$ ,倾斜各为  $0.01^\circ$ ,则由步骤(1)~(4),可得多视场影响函数  $\varphi_j(x, y, v, w)$ 。

如前文所述,场依赖波前像差主要为离焦和像散,故多视场影响函数可用泽尼克多项式的第 3(45°像散)、4(离焦)、5 阶(0°像散)来表示:

$$\varphi_j(x, y, v, w) = \sum_{k=3}^5 a_{jk}(x, y) \times Z_k(v, w) \quad (4)$$

式中:  $k$  为泽尼克阶数;  $a_{jk}(x, y)$  为与第  $j$  项次镜失调相关的第  $k$  阶泽尼克多项式的权重系数,其仅与所选取的视场点  $(x, y)$  的位置成线性关系,表示为:

$$a_{jk}(x, y) = \alpha_{jk}(x - x_0) + \beta_{jk}(y - y_0) \quad (5)$$

式中:  $\alpha_{jk}$  和  $\beta_{jk}$  分别为  $X$ 、 $Y$  方向比例因子。

将公式(5)代入公式(4),可得:

$$\varphi_j(x, y, v, w) = \sum_{k=3}^5 [a_{jk}(x, -x_0) + \beta_{jk}(y - y_0)] Z_k(v, w) \quad (6)$$

公式(6)建立了多视场影响函数  $\varphi_j(x, y, v, w)$  与比例因子  $\alpha_{jk}$  和  $\beta_{jk}$  之间的数学关系。若将公式(6)代入公式(2),则任意视场点  $(x, y)$  处的场依赖像差表示为:

$$\phi_{MF}(x, y, v, w) = \sum_{j=1}^4 m_j \{ \sum_{k=3}^5 [a_{jk}(x, -x_0) + \beta_{jk}(y - y_0)] Z_k(v, w) \} \quad (7)$$

根据公式(7),只要能获得不同视场的场依赖波前像差  $\phi_{MF}(x, y, v, w)$  以及比例因子  $\alpha_{jk}$ 、 $\beta_{jk}$ ,便可求出次镜失调量  $m_j$ 。其中,场依赖波前像差  $\phi_{MF}(x, y, v, w)$  可通过前文所述步骤(1)~(4)获得,而比例因子  $\alpha_{jk}$ 、 $\beta_{jk}$  由光学系统自身特性决定,可依据公式(6)由多视场影响函数  $\varphi_j(x, y, v, w)$  求得。

## 2 仿真研究及结果分析

为验证所提方法的检测精度及动态范围,文中以图 1 中的 36 分块子镜式空间对地遥感系统为研究对象,开展了相关的仿真研究。此外,由于该方法基于多视场波前传感信息,亦着重分析了波前传感误差对次镜失调量检测精度的影响。

### 2.1 仿真方法、流程及结果

#### 2.1.1 求解特定光学系统的比例因子

文中为得到次镜失调量,需首先计算特定光学

系统的多视场影响函数  $\varphi_j(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$  和比例因子  $\alpha_{jk}$ 、 $\beta_{jk}$ 。两者均由光学系统的自身参数所决定。以图 1 所建立的光学系统为例,其中心视场为(0,0.34),另外选取 6 个不同的视场分别为 (-0.08,0.26), (0.08,0.34),

(0.08,0.42), (-0.08,0.42), (0.08,0.26), (-0.08,0.34)(单位为 $^\circ$ ), 获得了该光学系统的多视场影响函数  $\varphi_j(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$ , 并进而求得了 X、Y 方向的比例因子  $\alpha_{jk}$ 、 $\beta_{jk}$ , 如表 1 所示。

表 1 36 分块子镜式空间对地遥感系统光学系统的比例因子  $\alpha_{jk}$ 、 $\beta_{jk}$

Tab.1 Scale factor  $\alpha_{jk}$ ,  $\beta_{jk}$  of the space-to-ground optical remote sensing system with 36 segmented primary mirror

$\alpha_{13}$	$\alpha_{14}$	$\alpha_{15}$	$\beta_{13}$	$\beta_{14}$	$\beta_{15}$
0.259 505 35	-0.213 097 93	0	0	0	0.263 852 09
$\alpha_{23}$	$\alpha_{24}$	$\alpha_{25}$	$\beta_{23}$	$\beta_{24}$	$\beta_{25}$
0	0	0.262 924 16	-0.267 297 18	-0.222 423 93	0
$\alpha_{33}$	$\alpha_{34}$	$\alpha_{35}$	$\beta_{33}$	$\beta_{34}$	$\beta_{35}$
0	0	0.818 919 62	-0.821 630 59	0.633 674 81	0
$\alpha_{43}$	$\alpha_{44}$	$\alpha_{45}$	$\beta_{43}$	$\beta_{44}$	$\beta_{45}$
-0.816 227 28	-0.643 104 125	0	0	0	-0.818 905 87

2.1.2 求解次镜失调量

采用第 1 节所述方法,并利用表 1 中的比例因子,基于 MATLAB 和 ZEMAX 建立了多视场波前传感的次镜失调量检测数学模型,计算出次镜失调量。表 2~5 分别列出了次镜四种失调量的实际值和仿真值。

表 2 次镜 X 方向平移失调量实际值和仿真值

Tab.2 Actual value and simulation value in the X-translation of the secondary mirror

X-translation of secondary mirror			
Actual/mm	Simulation/mm	Actual/mm	Simulation/mm
$10 \times 10^{-2}$	$10.0023 \times 10^{-2}$	$55 \times 10^{-2}$	$55.0048 \times 10^{-2}$
$15 \times 10^{-2}$	$15.0033 \times 10^{-2}$	$60 \times 10^{-2}$	$60.0043 \times 10^{-2}$
$20 \times 10^{-2}$	$20.0040 \times 10^{-2}$	$65 \times 10^{-2}$	$65.0036 \times 10^{-2}$
$25 \times 10^{-2}$	$25.0046 \times 10^{-2}$	$70 \times 10^{-2}$	$70.0037 \times 10^{-2}$
$30 \times 10^{-2}$	$30.0051 \times 10^{-2}$	$75 \times 10^{-2}$	$75.0017 \times 10^{-2}$
$35 \times 10^{-2}$	$35.0053 \times 10^{-2}$	$80 \times 10^{-2}$	$80.0005 \times 10^{-2}$
$40 \times 10^{-2}$	$40.0054 \times 10^{-2}$	$85 \times 10^{-2}$	$84.9992 \times 10^{-2}$
$45 \times 10^{-2}$	$45.0054 \times 10^{-2}$	$90 \times 10^{-2}$	$89.9977 \times 10^{-2}$
$50 \times 10^{-2}$	$50.0052 \times 10^{-2}$	$95 \times 10^{-2}$	$94.9961 \times 10^{-2}$

表 3 次镜 Y 方向平移失调量实际值和仿真值

Tab.3 Actual value and simulation value in the Y-translation of the secondary mirror

Y-translation of secondary mirror			
Actual/mm	Simulation/mm	Actual/mm	Simulation/mm
$10 \times 10^{-2}$	$10.0050 \times 10^{-2}$	$55 \times 10^{-2}$	$55.0061 \times 10^{-2}$
$15 \times 10^{-2}$	$15.0069 \times 10^{-2}$	$60 \times 10^{-2}$	$60.0041 \times 10^{-2}$
$20 \times 10^{-2}$	$20.0083 \times 10^{-2}$	$65 \times 10^{-2}$	$65.0016 \times 10^{-2}$
$25 \times 10^{-2}$	$25.0093 \times 10^{-2}$	$70 \times 10^{-2}$	$69.9987 \times 10^{-2}$
$30 \times 10^{-2}$	$30.0098 \times 10^{-2}$	$75 \times 10^{-2}$	$74.9953 \times 10^{-2}$
$35 \times 10^{-2}$	$35.0099 \times 10^{-2}$	$80 \times 10^{-2}$	$79.9915 \times 10^{-2}$
$40 \times 10^{-2}$	$40.0096 \times 10^{-2}$	$85 \times 10^{-2}$	$84.9873 \times 10^{-2}$
$45 \times 10^{-2}$	$45.0089 \times 10^{-2}$	$90 \times 10^{-2}$	$89.9827 \times 10^{-2}$
$50 \times 10^{-2}$	$50.0077 \times 10^{-2}$	$95 \times 10^{-2}$	$94.9777 \times 10^{-2}$

表 4 次镜 X 方向倾斜失调量实际值和仿真值

Tab.4 Actual value and simulation value in the X-tilt of the secondary mirror

X-tilt of secondary mirror			
Actual /(")	Simulation /(")	Actual /(")	Simulation /(")
36	26	198	140
54	39	216	153

续表 4  
Continuation Tab.4

X-tilt of secondary mirror			
Actual /(")	Simulation /(")	Actual /(")	Simulation /(")
72	51	234	167
90	64	252	178
108	77	270	191
126	90	288	203
144	102	306	216
162	114	324	229
180	127	342	242

表 5 次镜 Y 方向倾斜失调量实际值和仿真值  
Tab.5 Actual value and simulation value in  
the Y-tilt of the secondary mirror

Y-tilt of secondary mirror			
Actual /(")	Simulation /(")	Actual /(")	Simulation /(")
36	25	198	138
54	38	216	151
72	51	234	164
90	63	252	176
108	76	270	189
126	89	288	201
144	103	306	214
162	113	324	227
180	126	342	240

## 2.2 仿真分析

### 2.2.1 检测动态范围研究

检测范围主要由两方面确定：一是当次镜失调量较大时，仅调整主镜各个分块镜的六自由度位置及曲率半径，很难使系统中心视场成像接近衍射极限，造成文中方法失效；二是计算得到的次镜失调量与实际失调量偏离较大，导致校正后的系统仍无法满足成像要求。

针对上述两方面分别开展仿真研究。以 0.01 mm、0.001°作为次镜 X、Y 方向平移及倾斜失调量的起始采样点，并逐渐增大所引入的失调量，发现当次镜 X、Y 方向平移失调量超过 1.8 mm、倾斜失调量超过

0.046°时，通过调整主镜各个分块镜的六自由度位置及曲率半径，无法使系统中心视场成像接近衍射极限，文中所提方法失效。

同时不断计算仿真值与实际引入的失调量偏离情况，发现当次镜 X、Y 方向平移失调量超过 1.5 mm、倾斜失调量超过 0.03°时，其仿真值与实际值的偏离量较大。分别达到 130 nm 和 0.01°，在如此大的测量误差情况下，即使对次镜进行校正，校正后的光学系统仍无法满足成像要求(波前 RMS 超过 1/10 波长)。

结合上述两方面的仿真研究结果，文中所提方法对次镜 X、Y 方向平移和倾斜失调量检测的动态范围分别为 0~1.5 mm, 0~0.03°。

### 2.2.2 检测精度研究

假设对某一失调量，每个采样点的测量误差用  $E_i$  表示，其为失调量仿真值与实际值之差：

$$E_i = m_{\text{simulation}} - m_{\text{real}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中： $m_{\text{simulation}}$  为失调量仿真值； $m_{\text{real}}$  为失调量实际值。

文中采用测量误差的 RMS 值表示检测精度  $E_{\text{RMS}}$ ，如公式(9)所示(其中  $n$  为采样数)。

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( E_i - \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \right)^2}{n}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

次镜失调量设置情况为：X、Y 方向平移失调量范围为 0.01~1 mm，采样间距为 0.01 mm；X、Y 方向倾斜失调量范围为 0.001°~0.03°，采样间距为 0.001°。对上述所有的采样点，先利用公式(8)计算出每一个采样点的测量误差，再利用公式(9)计算检测精度。得到次镜 X、Y 方向平移和倾斜的检测精度分别为 33 nm, 26 nm, 14", 15"。

可以看出，文中所提出的次镜失调量检测方法精度较高，对次镜 X、Y 方向平移和倾斜的检测精度分别约为 30 nm 和 15"。

### 2.2.3 波前传感误差对次镜失调量检测精度影响

由公式(7)可知，次镜失调量可依据不同视场的场依赖波前像差以及比例因子，求出，但是在实际应用时，这种基于多视场波前传感的次镜失调量检测方法显然会受到波前传感误差 (Wavefront Sensing Error, WFSE) 的影响。为定量描述波前传感误差对文中方法的影响，以相位恢复法<sup>[9]</sup>为例，仿真研究了引入波前传感误差下的次镜失调量检测精度。文中设定相位恢复法的波前传感精度<sup>[9]</sup>为 1/40λRMS

(15.8 nm,  $\lambda=632.8$  nm), 利用文中研究方法。得出了有无波前传感误差时次镜四种失调量仿真结果对比如表 6~9 所示。

表 6 含有波前传感误差时次镜 X 方向  
平移失调量实际值和仿真值

Tab.6 Actual value and simulation value in the  
X-translation of the secondary mirror  
when sensing error are considered

X-translation of secondary mirror		
Actual/mm	Simulation (no WFSE)/mm	Simulation (have WFSE)/mm
$10 \times 10^{-2}$	$10.002\ 341 \times 10^{-2}$	$10.002\ 344 \times 10^{-2}$
$15 \times 10^{-2}$	$15.003\ 265 \times 10^{-2}$	$15.003\ 269 \times 10^{-2}$
$20 \times 10^{-2}$	$20.004\ 028 \times 10^{-2}$	$20.004\ 030 \times 10^{-2}$
$25 \times 10^{-2}$	$25.004\ 637 \times 10^{-2}$	$25.004\ 639 \times 10^{-2}$
$30 \times 10^{-2}$	$30.005\ 058 \times 10^{-2}$	$30.005\ 061 \times 10^{-2}$
$35 \times 10^{-2}$	$35.005\ 334 \times 10^{-2}$	$35.005\ 338 \times 10^{-2}$
$40 \times 10^{-2}$	$40.005\ 441 \times 10^{-2}$	$40.005\ 447 \times 10^{-2}$
$45 \times 10^{-2}$	$45.005\ 384 \times 10^{-2}$	$45.005\ 388 \times 10^{-2}$
$50 \times 10^{-2}$	$50.005\ 162 \times 10^{-2}$	$50.005\ 169 \times 10^{-2}$

表 7 含有波前传感误差时次镜 Y 方向  
平移失调量实际值和仿真值

Tab.7 Actual value and simulation value in the  
Y-translation of the secondary mirror  
when sensing error are considered

Y-tilt of secondary mirror		
Actual/mm	Simulation (no WFSE)/mm	Simulation (have WFSE)/mm
$10 \times 10^{-2}$	$10.005\ 041 \times 10^{-2}$	$10.005\ 044 \times 10^{-2}$
$15 \times 10^{-2}$	$15.006\ 894 \times 10^{-2}$	$15.006\ 899 \times 10^{-2}$
$20 \times 10^{-2}$	$20.008\ 321 \times 10^{-2}$	$20.008\ 324 \times 10^{-2}$
$25 \times 10^{-2}$	$25.009\ 309 \times 10^{-2}$	$25.009\ 311 \times 10^{-2}$
$30 \times 10^{-2}$	$30.009\ 845 \times 10^{-2}$	$30.009\ 849 \times 10^{-2}$
$35 \times 10^{-2}$	$35.009\ 947 \times 10^{-2}$	$35.009\ 949 \times 10^{-2}$
$40 \times 10^{-2}$	$40.009\ 643 \times 10^{-2}$	$40.009\ 646 \times 10^{-2}$
$45 \times 10^{-2}$	$45.008\ 897 \times 10^{-2}$	$45.008\ 899 \times 10^{-2}$
$50 \times 10^{-2}$	$50.007\ 723 \times 10^{-2}$	$50.007\ 728 \times 10^{-2}$

表 8 含有波前传感误差时次镜 X 方向  
倾斜失调量实际值和仿真值

Tab.8 Actual value and simulation value in the  
X-tilt of the secondary mirror  
when sensing error are considered

X-tilt of secondary mirror		
Actual /(")	Simulation(no WFSE) /(")	Simulation(have WFSE) /(")
36	25.52	25.51
39.6	27.96	27.95
43.2	30.51	30.50
46.8	33.05	33.04
50.4	35.59	35.58
54	39.12	39.11
57.6	40.66	40.65
61.2	43.21	43.20
64.8	45.75	45.74

表 9 含有波前传感误差时次镜 Y 方向  
倾斜失调量实际值和仿真值

Tab.9 Actual value and simulation value in the  
Y-tilt of the secondary mirror  
when sensing error are considered

Y-tilt of secondary mirror		
Actual/mm	Simulation (no WFSE)/mm	Simulation (have WFSE)/mm
$36 \times 10^{-2}$	$25.16 \times 10^{-2}$	$25.15 \times 10^{-2}$
$39.6 \times 10^{-2}$	$27.68 \times 10^{-2}$	$27.67 \times 10^{-2}$
$43.2 \times 10^{-2}$	$30.19 \times 10^{-2}$	$30.18 \times 10^{-2}$
$46.8 \times 10^{-2}$	$32.71 \times 10^{-2}$	$32.70 \times 10^{-2}$
$50.4 \times 10^{-2}$	$35.22 \times 10^{-2}$	$35.21 \times 10^{-2}$
$54 \times 10^{-2}$	$37.74 \times 10^{-2}$	$37.73 \times 10^{-2}$
$57.6 \times 10^{-2}$	$40.26 \times 10^{-2}$	$40.25 \times 10^{-2}$
$61.2 \times 10^{-2}$	$42.77 \times 10^{-2}$	$42.76 \times 10^{-2}$
$64.8 \times 10^{-2}$	$45.28 \times 10^{-2}$	$45.27 \times 10^{-2}$

通过表 6~9 可以发现,波前传感误差对次镜失调量检测精度的影响不大,对 X、Y 方向平移而言,影响程度不超过 0.1 nm,对于 X、Y 方向倾斜,影响程度约为 0.01"。按照公式(8)、(9)计算检测精度,得出在波前传感误差为 1/40λ 的情况下,次镜 X、Y 方向平移和倾斜的检测精度分别为 33 nm, 26 nm, 15", 15", 与无传感误差时的检测精度基本一致。

### 2.3 实例分析

为验证基于多视场波前传感信息的次镜失调量检测方法的工程可行性,依据已有的某些大型空间地对地传感器次镜实际失调情况,开展了大量的仿真实验。次镜失调量的取值范围为: X、Y 方向平移小

于 1 mm; 倾斜小于 100"。在此误差范围内,采用平均分布方法随机设置次镜失调量,任意选取 100 组数据进行次镜失调量检测,并完成校正,校正后光学系统平均波前 PV 值为 0.409 3λ, RMS 值为 0.067 9λ, 成像质量接近衍射极限。仿真结果验证了所提出方法的可行性。

下文给出仿真中的一个具体示例。设次镜失调量 X、Y 方向平移各为 0.5 mm, 倾斜各为 0.01°, 引入该失调量后,系统各个视场的波前图如图 3 所示(λ=632.8 nm)。

由图 3 可知,引入次镜失调量以后,系统的成像质量严重下降,系统各个视场波前 PV 值最大达到

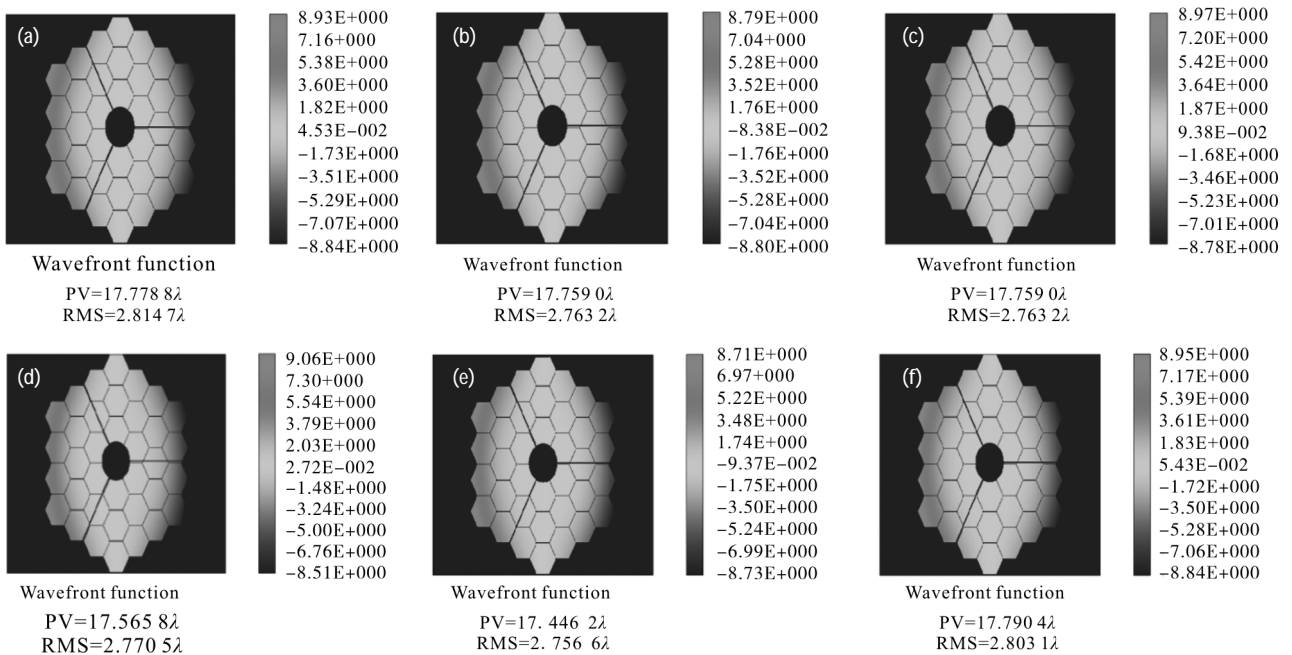


图 3 引入次镜失调量以后其他视场的波前图

Fig.3 System wavefront map in other field points when the alignment degeneracies of secondary mirror are introduced

17.790 4λ, RMS 值最大达到 2.803 1λ。通过优化主镜各个分块镜的六自由度位置及曲率半径而使系统中心视场成像接近衍射极限,优化后的中心视场的波前图如图 3 所示, PV 值为 0.996 3λ, RMS 值为 0.069 4λ。此时其他视场的波前图如图 4 所示,可以看到,其他视场仍有残余波前像差存在。

采用文中方法计算次镜失调量并进行校正前图如图 5 所示。各个视场的成像质量接近(校正器执行误差忽略),校正后的光学系统波衍射极限。

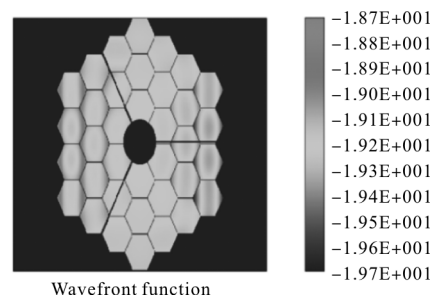


图 4 优化后的中心视场系统波前图

Fig.4 Optimized center field point system wavefront map

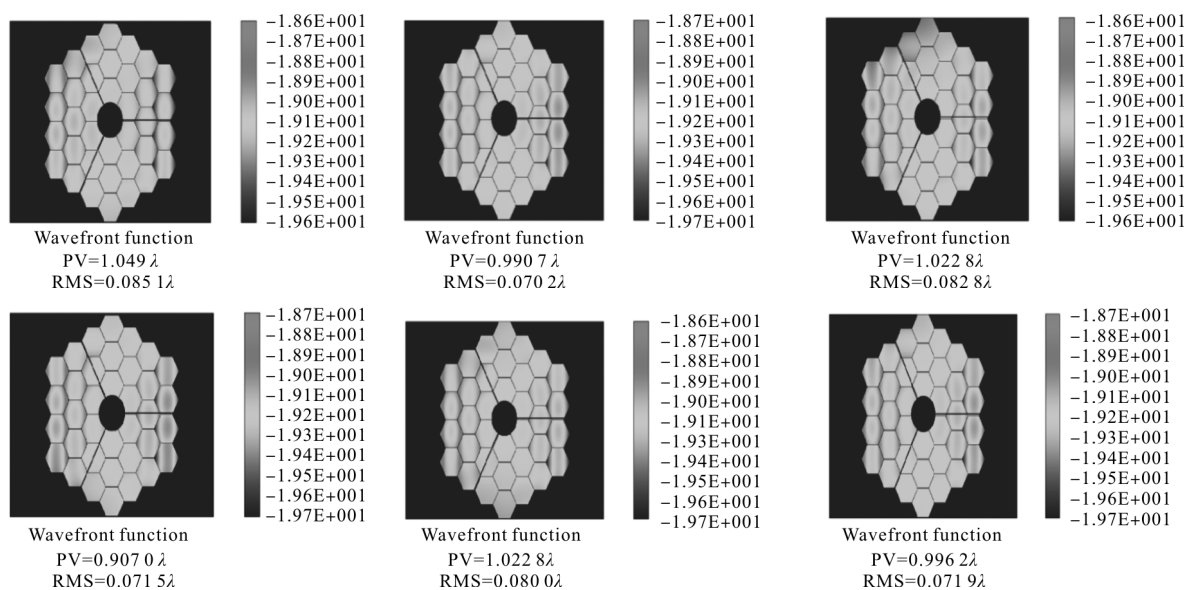


图 5 中心视场优化好以后其他视场下的系统波前图

Fig.5 System wavefront map in other field points after the center field point has been optimized

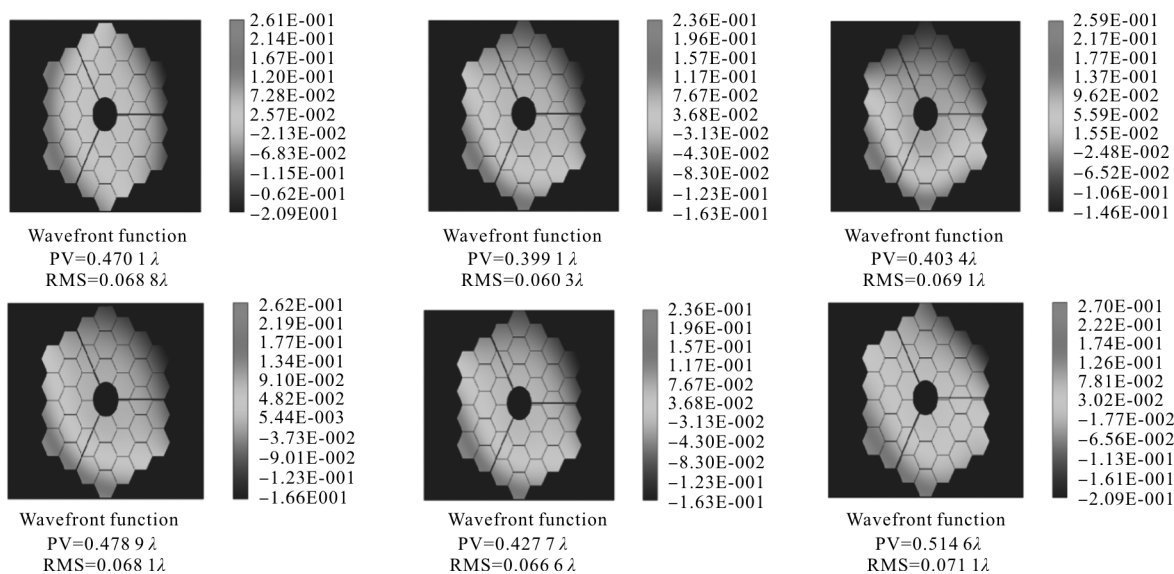


图 6 校正后的光学系统波前图

Fig.6 Corrected optical system wavefront map

### 3 结论

大口径分块式主镜空间对地遥感系统已经成为对地探测,军事侦察所必不可少的科学工具。当其在轨工作时,次镜相对主镜的位置失调会影响遥感系统的在轨工作状态。文中针对系统无中心分块子镜的情况,提出了一种利用多视场波前传感信息计算次镜失调量的方法。仿真研究表明,次镜 X、Y 方向平移和倾斜误差的检测范围分别为 0~1.5 mm,

0~0.03°;检测精度分别约为 30 nm 和 15"。当存在 1/40λ 的波前传感误差时,传感误差对检测精度的影响可忽略。大量的实例仿真验证了该方法的可行性,其可为分块式主镜空间对地遥感系统次镜在轨装调的实际应用提供有效途径。

### 参考文献:

[1] Yu Yang. Research on precision adjustment mechanism for secondary mirror of large space telescope [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics



- Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [2] An Qichang, Zhang Jingxu, Yang Fei. Evaluation of the performance of large telescope based on normalized point source sensitivity[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1218001. (in Chinese)
- [3] Xu Wei, Wu Qingwen, Zhai Yan. Optimal design and analysis of long circular reflector subassembly in the space optical remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 0301303. (in Chinese)
- [4] Li Zongxuan, Jin Guang, Zhang Lei. Support structure of large beam splitter in space optical remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 0801208. (in Chinese)
- [5] Huang Yi, Lin Lin, Cao Yinhua. Computer-aided alignment for space telescope optical system [C]//SPIE, 2006, 6149(1): 61490P-61490P-7.
- [6] Han Xingzi, Xin Yu, Bing Dong. Use the stochastic parallel gradient descent control algorithm to calibrate the second mirror in a three-mirror system [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2010, 47(4): 042201.
- [7] Han Xingzi, Hu Xinqi, Yu Xin. Precisely Integrated Wavefront Sensorless Calibration of High-Resolution Space Optical System with Large Position Errors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 33(6): 264-269. (in Chinese)
- [8] D S Acton, J Scott Knight. Multi-field alignment of the james webb space telescope [C]//SPIE, 2012: 8442.
- [9] Mao Heng, Wang Xiao, Zhao Dazun. Application of phase-diverse phase retrieval to wavefront sensing in non-connected complicated pupil optics [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 105(7): 1671-7694.