

## 大视场离轴三反光学系统场曲特性与装调方法

钟兴, 马驰\*, 李艳杰, 刘润山

长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130033

**摘要** 基于矢量波像差理论, 分析了离轴三反光学系统装调过程中在小量失调状态下的场曲特性, 提出了通过倾斜焦面补偿系统失调产生场曲的方法。在此基础上, 结合某遥感相机进行了仿真模拟, 具体分析了焦面分视场数目与三反射镜安装精度要求的关系, 提出了系统装调流程和方法。利用测试相机调制传递函数的方法, 对相机的场曲特性进行了测试, 并通过修正焦面倾角实现场曲像差补偿。修正后的相机边缘视场调制传递函数得到明显提升, 相机各视场调制传递函数均优于 0.21。

**关键词** 光学设计; 离轴三反系统; 矢量波像差理论; 失调; 场曲; 光学系统; 大视场

中图分类号 V248.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0922001

## Field Curvature Characteristics and Alignment Method for the Off-Axis Three-Mirror Optical System with Wide Field-of-View

Zhong Xing, Ma Chi\*, Li Yanjie, Liu Runshan

Chang Guang Satellite Technology Co. Ltd., Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Based on the vector wavefront aberration theory, the field curvature characteristic of the off-axis three-mirror optical system under a small misalignment during installation and adjustment was analyzed. A method for generating field curvature by tilting the focal plane to compensate for system misalignment is proposed. The simulation analysis was conducted using a remote sensing camera. Besides, the relationship between the number of split field-of-view of focal plane and the tertiary mirror installation accuracy requirements was analyzed, and the optical system alignment process and method were given. Then, the field curvature characteristic of the camera was tested by measuring the modulation transfer function, and the focal plane inclination angle was corrected to compensate for the curvature aberration. After the correction, the modulation transfer function of the edge field-of-view significantly improved. The modulation transfer function of each field-of-view of the camera is greater than 0.21.

**Key words** optical design; off-axis three-mirror system; vector wavefront aberration theory; misalignment; field curvature; optical system; wide field-of-view

**OCIS codes** 220.1000; 220.4840; 110.4100

## 1 引言

离轴三反光学系统具有视场大、像质优、谱段宽、结构紧凑、易于实现轻量化等优点, 被广泛地应用于空间对地遥感观测中<sup>[1-2]</sup>。离轴三反光学系统的最终成像性能不仅受系统设计时的残余像差影响, 还受元件加工研制工艺和系统装调水平等因素

的制约<sup>[3]</sup>。目前, 在离轴反射光学系统装调过程中, 一般利用干涉测量法对系统的波像差进行监测, 以轴上和轴外视场是否残余球差、彗差和像散三种像差作为判断系统失调(偏心、倾斜等)的依据<sup>[4-6]</sup>, 但这种方法不能对系统的场曲像差进行测量。光学系统失调造成系统的场曲特性发生变化, 系统实际像面与理想像面的位置具有一定的偏离, 进而导致相

收稿日期: 2020-10-22; 修回日期: 2020-11-20; 录用日期: 2020-12-01

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500904)

\* E-mail: machi\_hitedu@163.com

机不同视场的清晰度不同,不仅降低了系统的成像性能,也为后续的图像处理环节带来了困难。伴随着人们对遥感相机大幅宽、高分辨率和高信噪比等性能的追求,离轴三反系统视场角和口径等设计指标要求也在不断增加<sup>[7]</sup>。根据波像差理论,光学系统场曲像差分别与系统视场角和系统口径的二次方成正比关系<sup>[8]</sup>,因此大视场角、大口径的离轴三反系统失调产生的场曲像差对系统影响更为明显。综上,研究离轴三反系统失调状态下的场曲特性,对辅助指导系统优化设计和实际装调具有重要的意义。

本文以矢量波像差理论为基础,对离轴三反系统在失调情况下的场曲特性进行了分析,并对某遥感相机进行模拟仿真;根据理论分析结果,提出补偿场曲的方法,并辅助指导完成相机装调;最后对相机场曲补偿前后的像质测试结果进行对比,验证了所提方法的有效性。

## 2 离轴三反系统失调场曲特性分析

在实际的光学系统装调过程中,每个元件表面在三维空间中有 6 个失调自由度:沿着 X、Y、Z 轴方向(定义 Z 轴为系统的光轴方向,X 轴、Y 轴与 Z 轴垂直,以下相同)的三维平移和绕 X、Y、Z 轴的三维转动<sup>[9]</sup>。其中,沿 X 轴、Y 轴方向的平移造成表面的偏心,绕 X 轴、Y 轴的转动造成表面的倾斜。对轴对称光学系统的像差来说,失调后系统为非共轴光学系统,其中元件表面沿 Z 轴方向的平移仅会给系统带来离焦和少量球差,绕 Z 轴的旋转不造成影响,因此这两个自由度不予考虑,主要考虑影响系统彗差、像散和场曲的余下 4 个自由度。根据矢量波像差理论,光学系统的元件存在失调时,系统的波像差将发生变化,但是仍满足两个基本性质<sup>[10]</sup>:一是每个表面在像面处像差贡献中心与像面中心不再重合,且每个元件表面的像差贡献中心为连接该表面出瞳中心和曲率中心的直线与像面的交点;二是光学系统在像面上的最终像差等于全部元件表面像差贡献之和。由此可知,光学元件的像差中心相对理想系统的像面中心存在一个偏移,矢量波像差理论引入了一个矢量来表示失调光学系统相对于轴对称光学系统的像差贡献中心的变化<sup>[11]</sup>,如图 1 所示,由像差中心偏离矢量  $\sigma_j$  来表示第 j 个表面的像差贡献中心点位置。离轴反射式系统通常采用非球面进行设计,对于非球面表面,像差偏移矢量可分为两部分,一部分是球面的偏离,采用  $\sigma_j^0$  表示;另一部分是非球面相对于球面的偏离,采用  $\sigma_j^*$  表示。

$\sigma_j^0$  为

$$\sigma_j^0 = -[(u_j + c_j h'_j) - \beta_j - V_j]/i_j, \quad (1)$$

$\sigma_j^*$  为

$$\sigma_j^* = (V_j - h'_j)/h_j, \quad (2)$$

式中: $h_j$ 、 $i_j$  分别为理想的光学系统主光线在第 j 个表面上的入射高度和入射角度; $u_j$ 、 $h'_j$  分别为通过失调系统每个表面的物中心、像中心和光瞳中心的光线在第 j 个表面上物方的孔径角和入射高度; $c_j$  为第 j 个表面的曲率; $\beta_j$  为第 j 个表面的倾斜矢量; $V_j$  为第 j 个表面顶点的偏心矢量。可以看出,无论对于球面还是非球面表面,偏移矢量的大小与元件失调量成正比关系,且偏移矢量的方向与表面的偏心或倾斜方向相同。

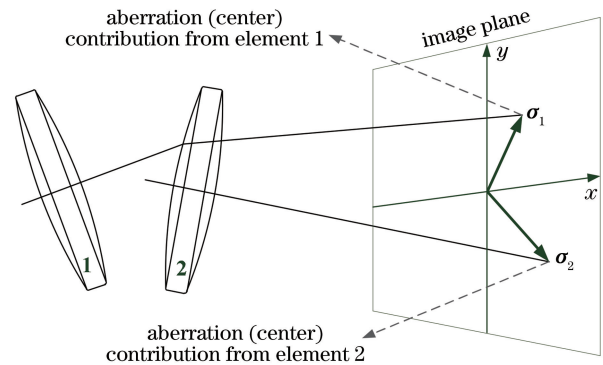


图 1 光学元件倾斜时像差贡献示意图

Fig. 1 Schematic of aberration contribution when optical element is tilted

进行离轴三反光学系统设计时,系统像质主要受初级像差限制,且失调时不会产生新的像差类型<sup>[5]</sup>。当光学系统处于失调状态时,光学元件失调主要引入初级像差<sup>[12]</sup>,高级像差对整个系统的性能影响很小。因此,仅针对系统的初阶波像差(三阶波像差)进行分析,失调光学系统的三阶波像差<sup>[13-15]</sup>表示为

$$\begin{aligned} W(\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho}) = & \sum_j W_{040j} (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})^2 + \\ & \sum_j W_{131j} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}] (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \\ & \sum_j W_{222j} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}]^2 + \\ & \sum_j W_{220j} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)] (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \\ & \sum_j W_{311j} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)] [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}], \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{H}$  为归一化的像方视场矢量; $\boldsymbol{\rho}$  为归一化的出瞳孔径矢量; $W_{040j}$ 、 $W_{131j}$ 、 $W_{222j}$ 、 $W_{220j}$  和  $W_{311j}$  分别为第 j 个表面的初阶球差、彗差、像散、场曲和畸变

系数。基于上述分析可以看出,光学系统的每个表面都在像面处产生一个以该表面的三阶像差系数为权重,以矢量  $\sigma_j$  顶点为中心的像差场,失调系统总的像差是每个表面像差贡献之和。

离轴三反光学系统通常由 3 个反射镜组成<sup>[16]</sup>,其中主反射镜为长条形,尺寸和质量相对较大,长度随视场角的增大而增加。因此,在离轴三反系统的装调过程中,通常以主反射镜作为基准,对次反射镜和三反射镜进行调节。设定次反射镜和三反射镜相对于主镜偏心和倾斜导致的球面部分像差中心偏移和非球面部分像差中心偏移矢量分别为  $\sigma_2^0, \sigma_2^*$ 、 $\sigma_3^0, \sigma_3^*$ ,当系统失调量较小时,可以认为  $\sigma_j^2 \approx 0$ 。一般离轴三反光学系统可以很好地校正系统的球差、彗差和像散,可在较大视场范围内有良好的成像质量,因此近似有  $\sum_j W_{040j} \approx 0, \sum_j W_{131j} \approx 0$ 。元件的偏心和倾斜并不影响球差,忽略对球差的分析。单独考虑彗差和像散的分量,有

$$W_{\text{COMA}} \approx - \{ [(W_{131})_2^0 \sigma_2^0 + (W_{131})_2^* \sigma_2^* + (W_{131})_3^0 \sigma_3^0 + (W_{131})_3^* \sigma_3^* ] \cdot \rho \} (\rho \cdot \rho), \quad (4)$$

$$W_{\text{ASTI}} \approx \{ -H [(W_{222})_2^0 \sigma_2^0 + (W_{222})_2^* \sigma_2^* + (W_{222})_3^0 \sigma_3^0 + (W_{222})_3^* \sigma_3^* ] \cdot \rho^2 \}. \quad (5)$$

这两个等式中共有 4 个变量,4 个变量对应着次反射镜和三反射镜的 8 个自由度。两个等式组成一个不定方程组,系统装调的过程可以视为不定方程组求解问题。因此,次反射镜和三反射镜的失调偏移矢量相互耦合且无法分离其中的具体数值,在系统装调的过程中,希望利用干涉仪测量的彗差、像散反向精确求解系统的失调量是不可能的。即使将视场中的彗差和像散调节至较小值或全部消除,仅能够说明次反射镜和三反射镜失调引起的彗差和像散相互抵消,而系统仍可能处于失调状态。

对离轴三反系统适当地分配光焦度还可以消除初阶场曲,对于平场的光学系统,有  $\sum_j W_{220j} \approx 0$ ,同理,离轴三反系统失调引起的场曲可以表示为

$$W_{\text{FCUR}} \approx -2H \cdot \{ [(W_{220})_2^0 \sigma_2^0 + (W_{220})_2^* \sigma_2^* + (W_{220})_3^0 \sigma_3^0 + (W_{220})_3^* \sigma_3^* ] (\rho \cdot \rho) \}, \quad (6)$$

为了表述更为直观,令  $A_{220} = \sum_j (W_{220})_j \sigma_j$ ,则有

$$W_{\text{FCUR}} \approx (-2H \cdot A_{220}) (\rho \cdot \rho), \quad (7)$$

可以看出,系统失调产生的场曲大小与视场矢量的一次方和孔径矢量的二次方成正比关系,因此,对于大口径、大视场的离轴三反系统,失调产生的场曲对系统的影响不可忽略。同时,系统失调产生的场曲为两个矢量的点积作用结果,当矢量  $H$  和矢量  $A_{220}$

方向相互垂直时,场曲大小为 0,说明失调系统的中间焦面仍是平面且相对于理想像面发生了倾斜。如图 2 所示,中间焦面与理想像面的交线与矢量  $A_{220}$  方向垂直,两个平面的夹角即为中间焦面的倾斜角度。对波像差的定义进行推导,可以得到焦面倾斜角度为  $16(f/D)^2 |A_{220}|$ ,其中  $f$  为光学系统焦距, $D$  为系统有效通光口径。

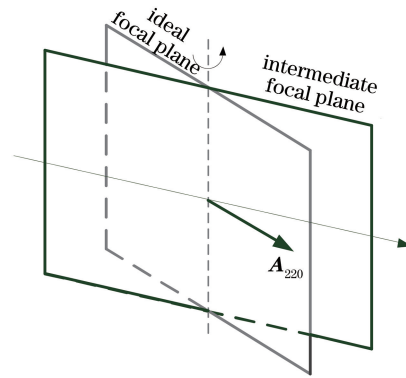


图 2 平场光学系统失调导致焦面倾斜  
Fig. 2 Focal plane tilt caused by misalignment of plane-field optical system

综上所述,对于校正了各项初阶像差的离轴三反系统,若采用干涉测量法装调,即使将整个视场中的彗差和像散全部消除也不能保证系统处于共轴状态。系统的失调产生中间焦面倾斜的场曲,因此,通过适当地倾斜像面和离焦,可有效补偿系统失调带来的波像差变化,进而保持系统成像品质不变。对于具有较大视场角的离轴三反系统,系统设计时完全校正初阶场曲是比较困难的。如图 3 所示,若系统的焦面采用多片探测器拼接方式,对焦面分视场进行修正,则可以同时补偿系统原始的初阶场曲和失调产生的场曲。理论上,焦面修正过程中分组数

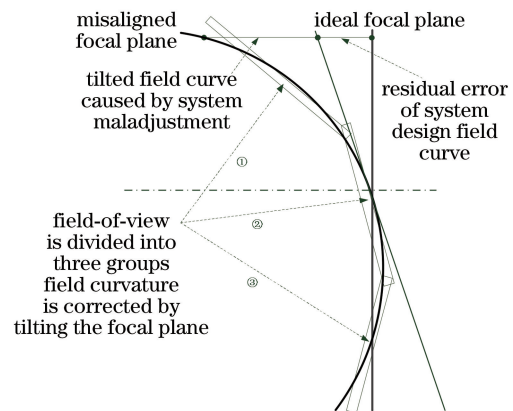


图 3 失调场曲补偿方法示意图  
Fig. 3 Schematic of offset field curvature compensation method



越多,系统场曲残像差残余越小,成像质量越好。

### 3 离轴三反系统失调补偿仿真模拟

离轴三反系统的装调过程通常分为粗装调和精装调两个步骤。粗装调过程中,先以主反射镜为基准,将三反射镜按照设计的位置进行摆放,然后根据波像差的测量结果对次反射镜进行调整。若三反射镜的初始摆放位置具有一定的误差,则系统可能形成视场内彗差和像散消除但仍处于失调的特殊状态。为验证倾斜修正焦面能够提升失调三反系统的成像质量,选取某光学遥感相机的光学系统进行仿真分析。该相机光学系统的焦距  $f = 4850 \text{ mm}$ ,相对口径  $D/f = 12.1259$ ,谱段为  $500 \sim 800 \text{ nm}$ ,视场角为  $16.1^\circ \times 0.7^\circ$ ,离轴角为  $5.05^\circ$ 。相机设计光路如图 4 所示, $Z$  方向为系统光轴方向, $X$  方向为系统宽视场方向。系统包含主反射镜、次反射镜、三反射镜和折叠镜,其中主反射镜、次反射镜和三反射镜皆采用非球面设计,折叠镜仅起到折转光路的作用,不对系统像质造成影响,可以忽略考虑。系统中次反射镜为光阑,通过视场离轴实现了无遮拦成像,因此该离轴光学系统仍可视作轴对称系统。

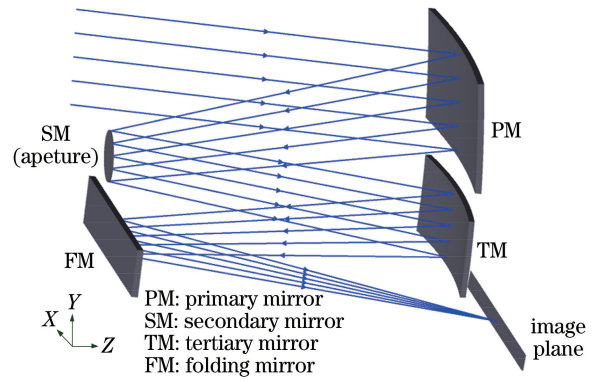


图 4 空间相机光学系统

Fig. 4 Optical system of a space camera

图 5 为该相机光学系统设计调制传递函数 (MTF) 曲线和各元件表面波像差系数,系统各视场 (FOV) MTF 值与衍射极限接近,可以看出系统的球差、彗差、像散及场曲得到了较好的校正,符合 (4)~(6) 式的假设前提。系统在 Nyquist 频率 ( $50 \text{ lp/mm}$ ) 的设计 MTF 约为 0.48,相机探测器 MTF 约为 0.52,理论上相机整体 MTF 为二者的乘积<sup>[17]</sup>,考虑到其他环节的误差因素,预期相机整体 MTF 优于 0.2。

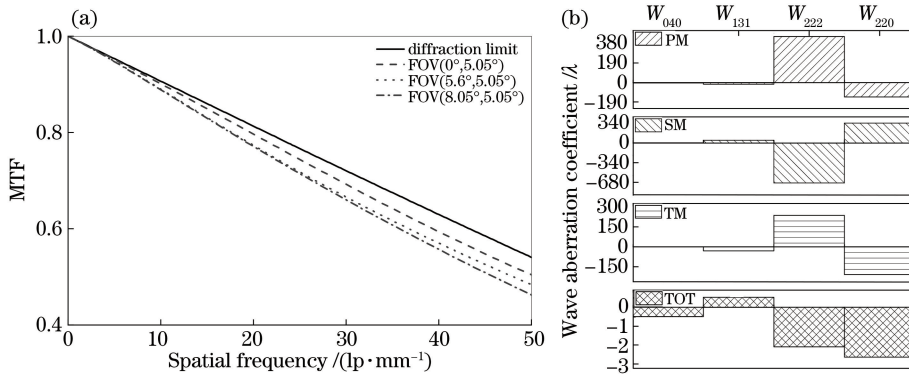


图 5 光学系统设计像质。(a) 光学系统 MTF 曲线;(b) 光学系统波像差系数

Fig. 5 Image quality of optical system design. (a) MTF curve of optical system; (b) wave aberration coefficient of optical system

利用仿真软件,将三反射镜设置一定的倾斜量,模拟粗装调过程中三反射镜初始摆放位置误差产生的失调量。将次反射镜的偏心、倾斜设为补偿量,模拟补偿彗差和像散的装调过程;同时,将后截距和焦面的倾斜设置为补偿量,模拟调整焦面补偿失调产生的场曲过程。选用  $(0^\circ, -5.05^\circ)$ 、 $(\pm 2.7^\circ, -5.05^\circ)$ 、 $(\pm 5.4^\circ, -5.05^\circ)$  以及  $(\pm 8.05^\circ, -5.05^\circ)$  视场的 Nyquist 频率的 MTF 作为优化指标,对全部补偿量进行补偿优化。以三反射镜绕 Y 轴倾斜失调为例,首先分析

不对视场分组(整个焦面为一个平面)进行补偿的情况,仿真得到不同失调量大小条件下的倾斜焦面补偿后的系统 MTF 数值和倾斜焦面角度,如图 6 所示。可以看出,焦面补偿的倾斜大小方向与三反射镜倾斜方向相同且大小为线性关系。符号标记的曲线为对应的视场 MTF 数值,在三反射镜绕 Y 轴倾斜失调角度小于  $0.02^\circ$  的情况下,焦面倾斜补偿后的系统 MTF 数值变化小于  $\pm 0.01$ ,仍具有较好的像质。由此可见,通过后期装调,可以补偿三反射镜的初始摆放位置误差导致的像差变化。



同理,可分析三反射镜其他自由度方向失调引起的 MTF 下降结果。

综合考虑元件曲率、面型、粗糙度等加工误差因素对系统的影响,以像面全部视场 MTF 不低于 0.465 作为约束条件。采用图 3 中示意的方法,将焦面分组倾斜再对场曲进行补偿,并分析三反射镜初始摆放精度要求,分析结果如表 1 所示。需特别说明的是,考虑到遥感相机标定等实验的需求,探测器拼接组数需为奇数,以确保拼接焦面的拼接缝隙能够避开相机中心视场位置,因此本文仅对视场分组数目为 1、3、5 的情况进行分析。

结合当前装调工艺水平,估计可实现三反射镜相对主反射镜安装的偏心误差小于 0.1 mm,倾斜误差小于  $0.015^\circ$ 。根据表 1 分析结果,将视场分成

表 1 不同视场分组数目下的三反射镜安装精度要求

Table 1 Tertiary mirror installation accuracy requirements under different number of FOV groups

Number of FOV groups	Installation accuracy requirements			
	Decenter of X direction /mm	Decenter of Y direction /mm	Tilt around X axis /( $^\circ$ )	Tilt around Y axis /( $^\circ$ )
No compensation	0.04	0.09	0.012	0.006
1	0.12	0.12	0.014	0.012
3	0.18	0.14	0.016	0.016
5	0.21	0.15	0.017	0.018

## 4 系统装调过程及结果

在相机的光学系统设计上,使次反射镜中轴与主反射镜、三反射镜中轴重合,一定程度上降低了装调难度。鉴于次反射镜质量较小及操作空间较大,将主反射镜作为基准,先安装三反射镜,最后对次反射镜进行精细调节,主反射镜光轴方向即为系统光轴方向。系统具体装调流程如图 7 所示。首先,搭建主反射镜与主反射镜补偿器的组合光路,通过测量组合光路波像差实现主反射镜与主反射镜补偿器同轴,确立主反射镜光轴方向,并标定光轴方向与参考棱镜的坐标转换关系。同理,利用三反射镜补偿器与三反射镜的组合光路反向指导调节三反射镜的安装位置,实现主反射镜、三反射镜共轴摆放。通过工装与调整架将次反射镜组件连接,摆放至系统设计的初始位置,至此完成系统粗调。采用自准干涉法测量系统各视场波像差,迭代调节次反射镜至视场内球差、彗差以及像散达到较小的值。系统中的平面镜仅起到折转光路的作用,对系统的影响较小,较容易安装,本文不再赘述。

3 组并分别进行补偿,即可同时满足相机 MTF 像质要求和装调工艺水平要求。

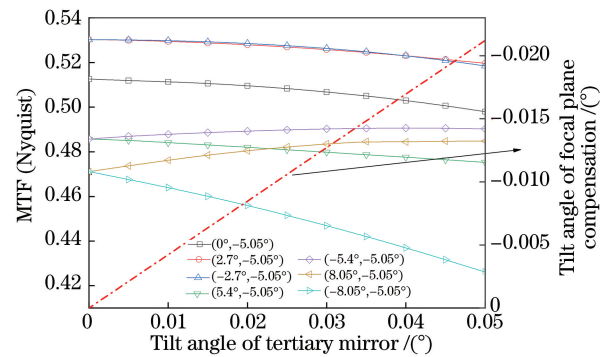


图 6 利用焦面倾斜补偿的系统 MTF 及焦面倾斜角度

Fig. 6 MTF of optical system using focal-plane tilt compensation and tilt angle of focal plane

图 8 为自准干涉法测量系统波像差的实验现场图。干涉仪发出的标准球面波经过光学系统后变为平面波,平面波在系统前的标准平面镜发生反射,再次经过光学系统回到干涉仪,与标准光发生干涉,得到干涉图。通过调整平面镜的反射角度可以改变测量的视场角,视场角的大小可以通过测量平面镜与参考棱镜的夹角关系确定。

最后进行焦面安装,测量不同视场点的中间像面场曲大小并进行修正,完成系统精调。根据上文分析结果,将焦面探测器分成 3 组(依次编号 A、B、C)进行机械拼接,如图 9 所示,每一组焦面上安置一个光学棱镜,用于标定焦面与光轴的位置关系。此外,每一组焦面通过机械垫片与相机结构连接,通过修正垫片的厚度和倾角可以调整像面的位置,达到像面实际位置与理想位置接近的目的。

利用调制对比度测量方法对系统的 MTF 进行测量,并推算系统各个视场点的场曲大小,如图 10 所示,利用积分球照明条纹靶标,并利用平行光管将条纹靶标投影至相机入瞳处。相机对靶标的投影像进行成像,通过解算条纹图像的对比度即可解算系统的 MTF 值<sup>[18]</sup>。

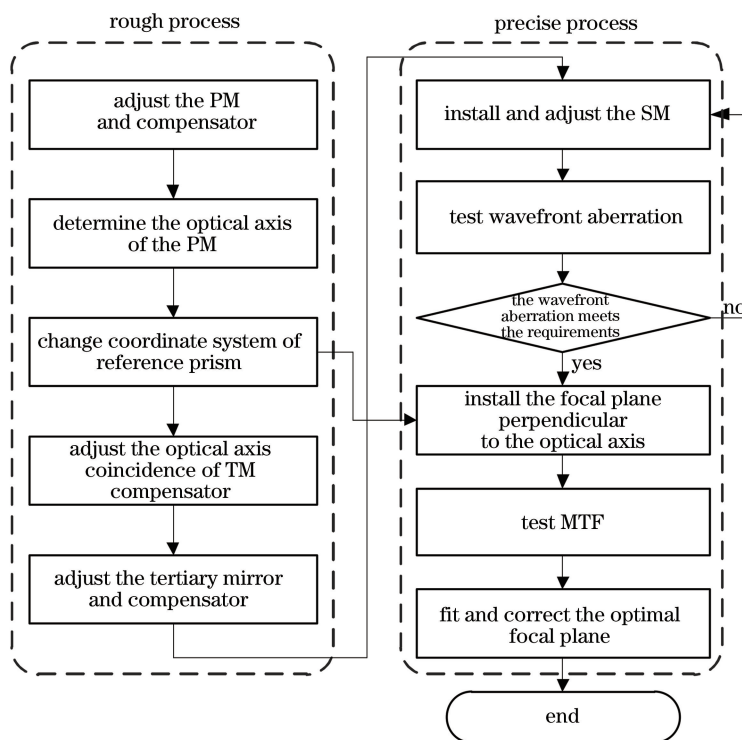


图 7 系统装调流程

Fig. 7 Process of optical system alignment

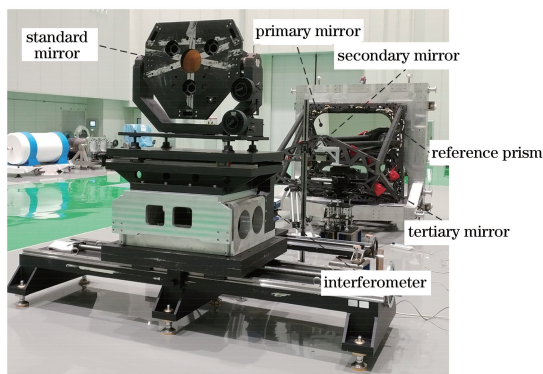


图 8 自准干涉测量实验现场

Fig. 8 Auto-collimating interference test site

先将 3 组焦面垂直于光轴安装,每一组焦面选用相同厚度的垫片,将各组探测器调节至同一位置。调

节焦面 Z 轴位置,可以获取一系列的系系统离焦 MTF 值,利用二阶多项式对其关系进行拟合,拟合形式为

$$M_{TF} = k_1 \times d_z^2 + k_2 \times d_z + k_3, \quad (8)$$

式中:  $M_{TF}$  为系统 MTF 测量结果;  $d_z$  为测量点在 Z 轴的位置;  $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_3$  为待拟合系数。

每一组探测器选取 3 个测量点,测量点位置如图 9 标注所示,利用拟合结果,使  $M_{TF}$  达到极大值时的  $d_z$  为各个测量点的最佳焦面位置,也就是中间焦面场曲大小为 0 的位置。记中心视场(测量点 5)的最佳焦面位置为坐标零点,根据场曲像差的定义,其余测量点的最佳位置即为对应视场点的中间焦面场曲大小,按照焦面测量的场曲大小分布趋势,对焦面位置进行修正即可补偿系统的场曲像差。

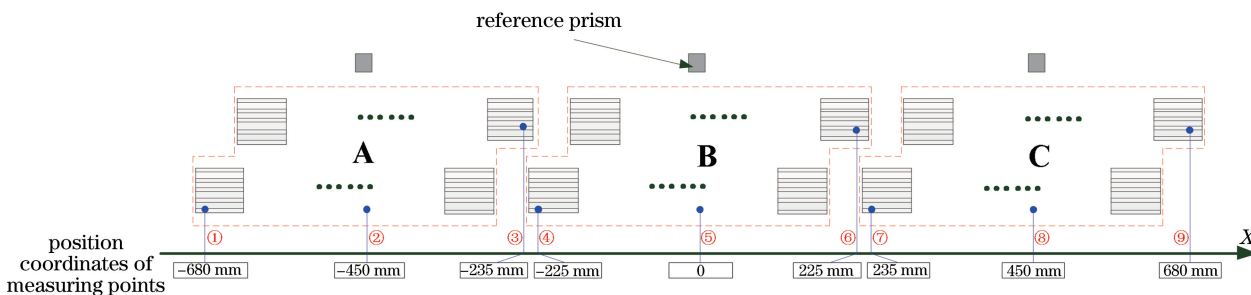


图 9 相机焦面拼接及测量点位置示意图

Fig. 9 Schematic of assembly focal plane and position coordinates of measuring points

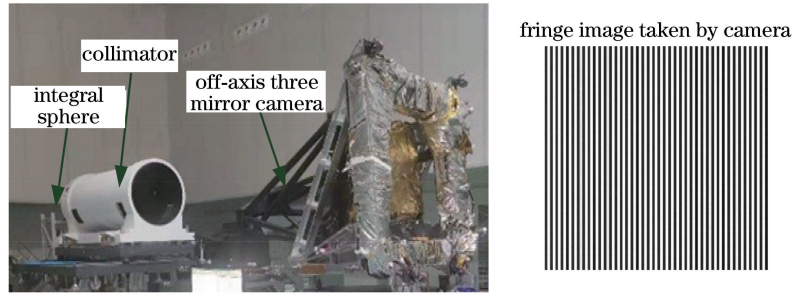


图 10 MTF 测试现场及条纹图像

Fig. 10 MTF test site and fringe image

以 A 组探测器为例,测量结果和拟合得到的最优焦面位置如图 11 所示。

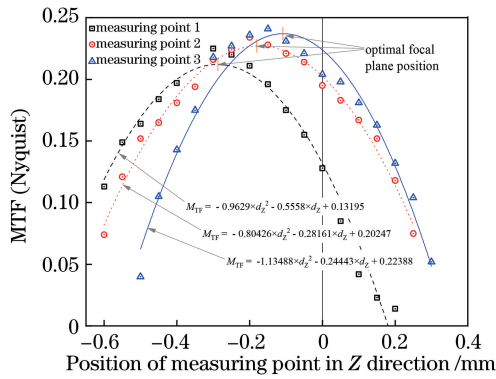


图 11 A 组焦面 MTF 测量结果

Fig. 11 MTF measurement results of group A focal plane

各个测量点的 X 向位置与拟合得到的最优焦面位置关系如图 12 所示,将焦面分成 3 组进行拟合,使各个视场的焦面位置与分析得到的最优位置之间差值最小,并依据拟合的结果对垫片的厚度和倾角进行修正,即完成全部的相机的装调和场曲补偿过程。

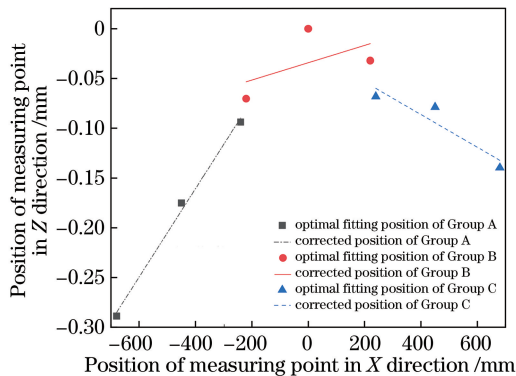


图 12 分组线性拟合得到的焦面位置

Fig. 12 Optimal position of focal plane by group linear fitting

根据拟合的结果可以看出,三组焦面的旋转方向不同,且旋转角度呈现出明显的非对称性,这是系

统设计原始场曲残差与失调产生的像面倾斜场曲共同作用的结果。焦面修正完毕后,对各测量点的 MTF 进行复测,焦面修正前、后 MTF 测量结果对比如图 13 所示,可以看出,经过修正的系统边缘视场 MTF 得到了明显的提升,各个视场 MTF 值均高于 0.21,满足预期设计要求。

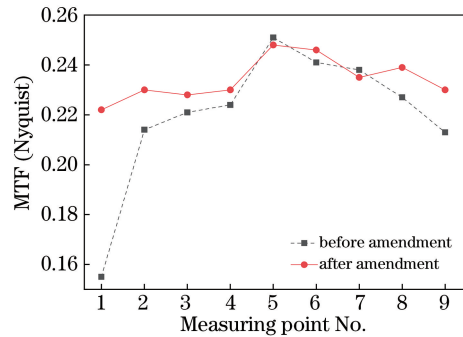


图 13 焦面修正前、后 MTF 测量结果对比

Fig. 13 Comparison of MTF before and after focal plane amendment

## 5 结 论

主要围绕大视场空间相机离轴三反系统的场曲特性开展了研究。基于矢量波像差理论,推导了装调过程中离轴三反系统在小量失调状态下的场曲简易表征形式,分析得出,离轴三反系统在装调过程中即使将整个视场中的彗差和像散全部消除也不能保证系统处于共轴状态,并提出通过分视场倾斜焦面补偿系统失调产生场曲的方法。结合某型号离轴三反形式遥感相机进行了失调模拟补偿仿真模拟,提出了系统装调精度要求和装调方法。在完成系统装调后,利用 MTF 测量结果对系统的场曲特性进行了评估,对理论分析结果进行了验证。经过场曲补偿后的相机边缘视场 MTF 得到了明显提升,且全部视场 MTF 优于 0.21,达到了预期的像质要求。本研究结果对其他离轴反射式系统装调也具有一定的参考价值。



## 参 考 文 献

- [1] Chang J, Weng Z C, Jiang H L, et al. Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(4): 315-318.  
常军, 翁志成, 姜会林, 等. 长焦距空间三反光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 315-318.
- [2] Zhang K K, Ruan N J, Fu D Y. Analysis and consideration of development of overseas space off-axis TMA system camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2008, 29(3): 63-70.  
张科科, 阮宁娟, 傅丹鹰. 国外空间用三反离轴相机发展分析与思考[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(3): 63-70.
- [3] Song Y F, Shao X P, Xu J. Off-axis three-mirror reflective optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4): 706-709.  
宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 706-709.
- [4] Shi Y L, Gao Y G, Deng W J. Model for computer-aided alignment of reflective optical system [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(4): 427-430.  
史亚莉, 高云国, 邓杰杰. 反射光路的计算机辅助装调模型[J]. 激光与红外, 2009, 39(4): 427-430.
- [5] Gong D, Tian T Y, Wang H. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1754-1759.  
巩盾, 田铁印, 王红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1754-1759.
- [6] Pang Z H. Study on computer aided alignment technology for off-axis optical system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 14-19.  
庞志海. 离轴反射光学系统计算机辅助装调技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 14-19.
- [7] Cui J C. Design of large aperture refractive-reflective zoom lens [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2087-2091.  
崔继承. 大口径折反射式变焦距物镜的设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2087-2091.
- [8] Gu Z, Yan C, Wang Y. Alignment of a three-mirror anastigmatic telescope using nodal aberration theory [J]. Optics Express, 2015, 23(19): 25182-25201.
- [9] Kim S, Yang H S, Lee Y W, et al. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems [J]. Optics Express, 2007, 15(8): 5059-5068.
- [10] Yang X J, Wang Z Q, Mu G G, et al. Aberration properties of the decentered and tilted optical systems [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(11): 1658-1662.  
杨新军, 王肇圻, 母国光, 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. 光子学报, 2005, 34(11): 1658-1662.
- [11] Thompson K P, Rolland J P. A page from "the drawer": how Roland Shack opened the door to the aberration theory of freeform optics[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9186: 91860A.
- [12] Wang C, Zhang X, Wang L J, et al. Adjustment of abnormality aperture off-axis freeform system based on square aperture[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1518-1525.  
王超, 张新, 王灵杰, 等. 方形孔径自由曲面反射式系统装调技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1518-1525.
- [13] Thompson K. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2005, 22(7): 1389-1401.
- [14] Rogers J R. Techniques and tools for obtaining symmetrical performance from tilted-component systems [J]. Optical Engineering, 2000, 39(7): 1776-1787.
- [15] Shack R V, Thompson K. Influence of alignment errors of a telescope system on its aberration field [J]. Proceedings of SPIE, 1980, 251: 146-153.
- [16] Yao G, Huang Y, Fu D Y. An easily fabricated unobscured three-mirror reflective system with large FOV[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(5): 44-48.  
姚罡, 黄颖, 傅丹鹰. 一种易于制造、较大视场离轴三反光学系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(5): 44-48.
- [17] Zhang X H, Han C Y, Pan Y L, et al. Evaluation of general image quality of transfer optical remote sensing CCD camera [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4): 697-701.  
张晓辉, 韩昌元, 潘玉龙, 等. 传输型 CCD 相机综合像质评价方法的研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 697-701.
- [18] Nie P, Tian H Y, Dong B, et al. Research of modulation transfer function measurement of CCD camera with rectangle target[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1204002.  
聂品, 田海英, 董斌, 等. 矩形靶标测试 CCD 相机调制传递函数的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1204002.