

文章编号: 1672-8785(2020)12-0001-11

多谱段多通道离轴三反 空间相机装调

邢 辉^{1,2} 张占东^{1,2} 刘剑峰^{1,2} 宋俊儒^{1,2} 金忠瑞^{1,2} 刘志远^{1,2}

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094;

2. 先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094)

摘 要: 针对离轴三反多谱段空间相机光学件自由度多、通道多且装调复杂的难题, 进行了光学仿真分析和计算机辅助装调。根据光学设计结果, 设计了基于光线追迹的视场光阑, 给出了红外通道和可见光通道的波像差, 并仿真分析了次镜和三镜的灵敏度矩阵。用可见光干涉仪对全反射式红外通道进行了装调。根据干涉仪得到的 Zernike 像差系数, 结合计算机辅助装调仿真结果, 以主镜为基准调整了次镜与三镜的空间位置关系, 直至系统波前满足设计要求。红外通道中心视场和边缘视场的波前均方根(Root Mean Square, RMS)装调结果分别为 0.15λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$) 和 0.33λ ; 可见光通道中心视场和边缘视场的 RMS 值分别为 0.06λ 和 0.07λ 。考虑到加工和装调误差, 装调结果与设计结果基本一致。相机在轨图像清晰, 成像质量高。

关键词: 空间相机; 多谱段; 多通道; 装调

中图分类号: V447⁺.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.12.001

Alignment of Multispectral and Multichannel Off-axis Three-mirror Space Camera

XING Hui^{1,2}, ZHANG Zhan-dong^{1,2}, LIU Jian-feng^{1,2}, SONG Jun-ru^{1,2},JIN Zhong-rui^{1,2}, LIU Zhi-yuan^{1,2}

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory for Advanced Optical Remote Sensing Technology of Beijing, Beijing 100094, China)

Abstract: The optical simulation analysis and computer-aided alignment are carried out to solve the problems of multidegree of freedom, multichannel and complex alignment of optical components for off-axis three-mirror multispectral space camera. According to the results of the optical design, a field aperture based on ray tracing is designed, the wavefront aberrations of the infrared channel and the visible channel are given, and the sensitivity matrix of the secondary mirror and the third mirror is simulated and analyzed. The total reflection infrared channel is aligned with a visible-light interferometer. According to the Zernike aberration coefficient obtained by the interferometer, combined with the computer-aided alignment simulation results, the spatial posi-

收稿日期: 2020-09-01

作者简介: 邢辉(1979-), 男, 山东阳信人, 高级工程师, 硕士, 主要从事空间相机光机系统的装调测试研究。E-mail: xinghui322@126.com

tion relationship between the secondary mirror and the third mirror is adjusted based on the primary mirror until the wavefront of the system meets the design requirements. The Root Mean Square (RMS) alignment results of the center field-of-view and the edge field-of-view of the infrared channel are 0.15λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$) and 0.33λ respectively; the RMS values of the center field-of-view and the edge field-of-view of the visible channel are 0.06λ and 0.07λ respectively. Considering the processing and assembly errors, the alignment results are basically consistent with the design results. The on-orbit image of the camera is clear and the image quality is high.

Key words: space camera; multispectral; multichannel; alignment

0 引言

离轴三反光学系统具有无中心遮拦、成像质量好、视场大、结构紧凑等优点,近年来成功应用于多颗在轨卫星。美国 QuickBird 对地观测卫星、英国 TopSat 对地观测卫星、法国 OSIRIS 彗星核子观测卫星以及印度 IRS-1C 卫星均搭载了离轴三反望远镜。由于地物目标在不同波段下的光谱特征存在差异,多谱段成像在资源普查、立体测绘、灾害预防等遥感领域得到了广泛应用^[1-5]。

同轴光学系统的装调测试方法由来已久,评价方式也非常成熟。而离轴三反光学系统则一般采用计算机辅助装调方法。该方法由 Itek 公司于 1985 年在光学装调中首先提出并得到了成功应用。1987 年, Hughes 公司对这种方法进行了完善,进一步提出了光学系统失调量评估方法^[6]。计算机辅助装调不仅能够实现可视化、量化调整,而且还可以缩短装调周期和提高装调精度。近年来,国内多个高校和科研机构采用该方法完成了多个三反离轴相机的装调测试工作,例如资源三号多光谱相机、高分五号相机等^[7]。

首先给出原理分析,包括蒙特卡洛光线追迹方程、全反射式光学系统初级像差的各项系数的表达式、光学系统的灵敏度矩阵以及光学系统畸变数学方程。在光学设计结果的基础上,给出了基于光线追迹的视场光阑设计,分析了红外通道和可见光通道的波像差,并仿真了次镜和三镜的灵敏度矩阵以及光学系统的畸变。利用可见光干涉仪完成了全反射式系统的装调。装调结果与设计结果基本一致。

1 原理分析

1.1 光线追迹方程

在光学系统完成建模后,利用蒙特卡洛光线追迹算法计算光学系统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)、点列图、点扩散函数等性能评价指标,从而为光学系统模型的修正以及装调测试提供重要参考^[8]。

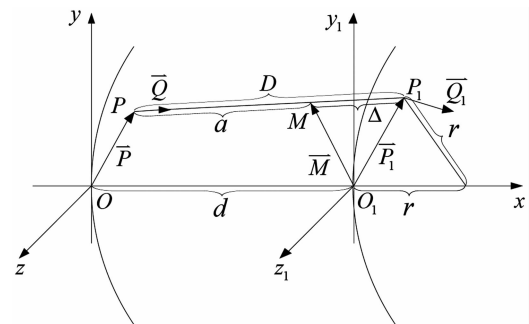


图1 球面光线追迹

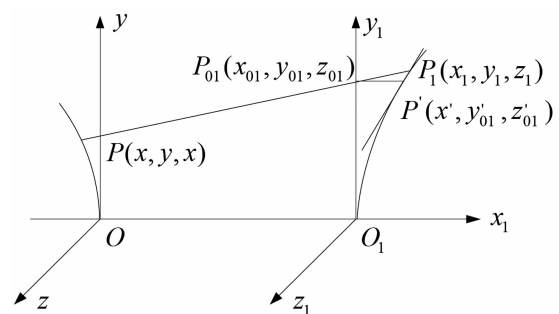


图2 非球面光线追迹

如图 1 所示,入射光线的位置和方向分别为 $\vec{P}(x, y, z) = xi + yj + zk$ 和 $\vec{Q}(\alpha, \beta, \gamma) = ai + bj + \gamma k$ 。其中, i 、 j 、 k 分别为沿 3 个坐标轴方向的单位向量, \vec{Q} 为入射光线方向上的单位向量。出射光线的位置和方向分别为 $\vec{P}(x_1, y_1, z_1)$

$=x_1\mathbf{i}+y_1\mathbf{j}+z_1\mathbf{k}$ 和 $\vec{Q}_1(\alpha_1+\beta_1+\gamma_1)=\alpha_1\mathbf{i}+\beta_1\mathbf{j}+\gamma_1\mathbf{k}$ 。则球面光线追迹公式为^[8-9]

$$\left\{\begin{array}{l} a=\alpha(d-x)-\beta y-\gamma z \\ M_x=x-d+aa \\ M^2=(x-d+aa)^2+(y+\beta a)^2+(z+\gamma a)^2 \\ \Delta=\frac{M^2c-2M_x}{\alpha+\sqrt{\alpha^2-M^2c^2+2M_xc}} \\ D=\alpha+\Delta \\ x_1=x+d+\alpha D \\ y_1=Y+\beta D \\ z_1=Z+\gamma D \\ \cos I=|\alpha(1-x_1c)-\beta y_1c-\gamma z_1c| \\ \cos I'=\sqrt{1-\frac{n^2}{n'^2}(1-\cos^2 I)} \\ g=n'\cos I'-n\cos I \\ \alpha_1=\frac{n}{n'}\alpha+\frac{g}{n}(1-x_1c) \\ \beta_1=\frac{n}{n'}\beta-\frac{g}{n}y_1c \\ \gamma_1=\frac{n}{n'}\gamma-\frac{g}{n}z_1c \\ c=\frac{1}{r} \end{array}\right. \quad (1)$$

对于非球面而言, 光线与非球面的投影点 P_1 无法直接由光线方程和曲面方程进行求解, 而只能用逐次逼近的方法求解近似数值解。如图 2 所示, 求出光线与 y_1z_1 坐标面的交点 P_{01} , 然后将 P_{01} 作为 P_1 的第一次近似解, 并由 P_{01} 作光轴的平行线交曲面于点 P' 。把光线与过点 P' 的切平面的交点 P_1 作为新的近似解。重复以上步骤, 直到满足精度要求为止。

1.2 全反射式光学系统的像差计算

全反射式光学系统的光学元件失调主要引入初级像差, 而系统失调则不会产生新的像差类型。由于波像差检测设备(干涉仪、波前传感器等)无法检测系统畸变和场曲, 所以在光学系统装调初期仅考虑初级球差、彗差和像散的失调。失调共轴三反系统初级像差的 Zernike 标量表达式为^[2]

$$W_j(\rho, \phi)=\sum_{i=5}^9 C_i Z_i(\rho, \phi) \quad (2)$$

式中, $W_j(\rho, \phi)$ 为 j 视场的波像差; $Z_i(\rho, \phi)$ 为 Zernike 多项式; C_i 为多项式的 j 视场拟合系数。表 1 列出了泽尼克圆域多项式的像散、彗差和球差表达式。其中, θ 为极角, ρ 为半径^[2, 11-12]。

表 1 泽尼克圆域多项表达式

泽尼克表达式	含义	项数
$\rho^2 \cos 2\theta$	0° 或 90° 像散	Z_5
$\rho^2 \sin 2\theta$	$\pm 45^\circ$ 像散	Z_6
$(3\rho^2-2)\rho \cos \theta$	X 方向彗差	Z_7
$(3\rho^2-2)\rho \sin \theta$	Y 方向彗差	Z_8
$6\rho^4-6\rho^2+1$	球差	Z_9

1.3 灵敏度矩阵

光学系统中光学元件的失调会引入像差。将初级像差作为校正对象, 则校正对象与失调量之间成非线性关系。利用多元泰勒公式将非线性方程组转换为下列线性方程组^[3, 13-16]:

$$A\Delta X=\Delta F \quad (3)$$

$$\Delta X=\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \Delta F=\begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \\ \vdots \\ \Delta F_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, A 为灵敏度矩阵:

$$A=\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial F_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ΔX 为系统中各光学元件的失调量, 包括各坐标轴的平移量和转动量; ΔF 为光学系统各校正对象的实测值与设计值之差; 灵敏度矩阵 A 为校正对象与调整变量的差商。式(3)的最小二乘解为

$$A^T A \Delta X=A^T \Delta F \quad (6)$$

若矩阵非奇异, 则方程组的解为

$$\Delta X=(A^T A)^{-1} A^T \Delta F \quad (7)$$

1.4 光学系统畸变

对于大视场、离轴、全反射式非对称光学

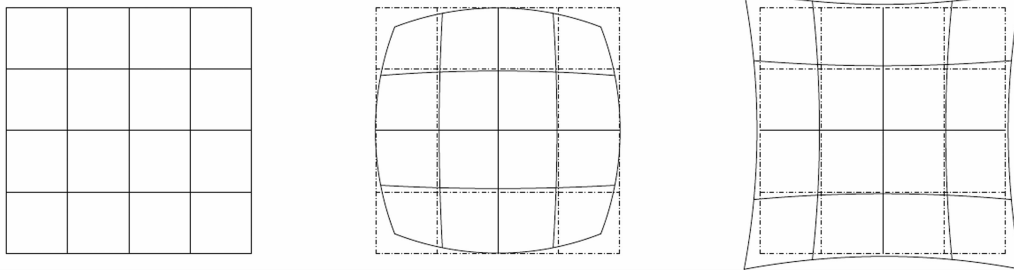


图 3 畸变

成像系统而言,除了彗差、像散、场曲和球差之外,畸变一般很难得到彻底消除,如图 3 所示^[17]。尤其在非测绘类航天遥感相机中,通常也不会要求光学设计完全实现消畸变。在完成系统初调后,需要对光学系统畸变进行初步测试。等畸变满足设计要求后才能进行定焦等后续工作。国内外的许多学者给出了畸变标定和测试的多种方法。畸变的数学方程为^[18-21]

$$\begin{cases} x_d = x + k_1 x(x^2 + y^2) + p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy \\ \quad + s_1(x^2 + y^2) \\ y_d = y + k_2 y(x^2 + y^2) + 2p_1 xy + p_2(x^2 + 3y^2) \\ \quad + s_2(x^2 + y^2) \end{cases} \quad (8)$$

式中, k_1 、 k_2 、 p_1 、 p_2 、 s_1 、 s_2 都是非线性畸变参数; (x_d, y_d) 为畸变像点的坐标; (x, y) 为理想像点的坐标。

2 仿真分析

图 4 所示为某相机光学系统的设计结果。该系统包含可见光通道、短中波谱段通道和长波谱段通道(共三个谱段通道)。其中,短中波谱段和长波谱段共用主镜、次镜和红外通道三镜。通过红外通道三镜后面的分光片分光,两个通道的成像视场角及焦距一致。在主次镜系统的一次像面处放置反射镜 1,然后通过分视场形式将可见光谱段分离出来。光线经过可见光通道三镜和反射镜 2 后最终到达可见光焦面^[7]。

2.1 红外通道的仿真分析

由于红外干涉仪的出射光线不可见,实际的全反射式光学系统一般使用可见光干涉仪进行系统装调。为了便于仿真分析,将模型简化为只含主镜、次镜和三镜的光学系统,如图 5

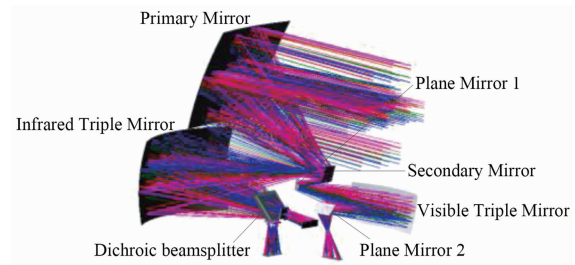


图 4 光学系统

所示。

2.1.1 基于光线追迹的视场光阑设计与仿真

将红外通道的光阑(出瞳)设置在冷屏位置上,导致主镜、次镜和三镜在不同视场内使用各自镜面的不同口径区域。表 2 给出了红外通道的主镜足印图。可以看出,不同视场的光线在主镜上的位置不同。

从原则上讲,在各反射镜镜面参数确定的情况下,约束了出瞳的大小和位置,也就约束了系统的 F 数以及到达各镜面的有效光线。对于离轴三反光机系统来说,各光学元件和结构件的加工与设计都会存在偏差,导致在系统初装中无法准确定位出瞳的位置和大小。此时只能通过控制到达各反射镜镜面的有效光线,使系统装调模型与光学设计模型相符。由于主镜口径最大,而且是平行光入射到主镜上,可以通过约束主镜不同视场的入射光线来进行系统装调。

基于式(1),利用 CODE V 光学设计软件计算出主镜各个视场的光阑大小和位置,并在主镜支撑结构的相应位置上设置视场光阑(见表 3)。

2.1.2 基于计算机辅助装调的灵敏度分析

表 4 列出了红外通道在可见光波长(632.8

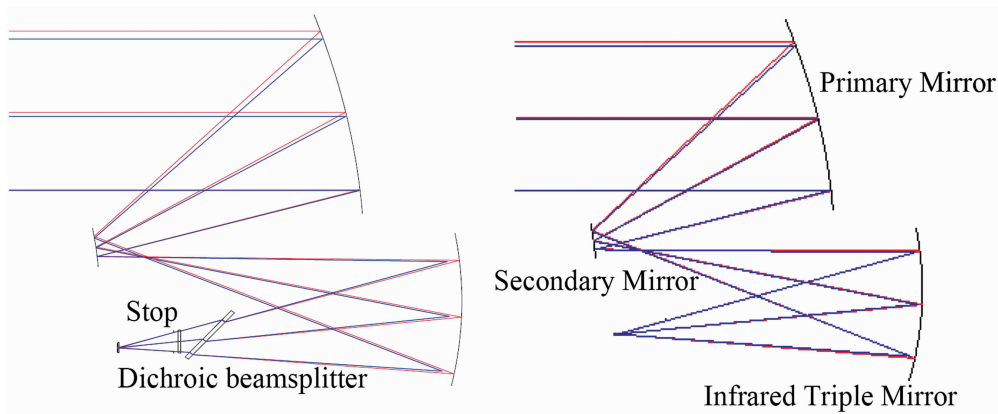


图 5 红外通道的光路图

表 2 红外通道的主镜足印图($\lambda=632.8 \text{ nm}$)

归一化视场角	$(-1^\circ, 0^\circ)$	$(0^\circ, 0^\circ)$	$(1^\circ, 0^\circ)$
主镜足印图			

表 3 基于光线追迹的各视场光阑设计

归一化视场角下, 各视场的光阑设计	$(-1^\circ, -1^\circ)$	$(-1^\circ, 0^\circ)$	$(-1^\circ, 1^\circ)$
	$(0^\circ, -1^\circ)$	$(0^\circ, 0^\circ)$	$(0^\circ, 1^\circ)$
	$(1^\circ, -1^\circ)$	$(1^\circ, 0^\circ)$	$(1^\circ, 1^\circ)$

nm)下的像散、彗差、球差及 RMS 值。可以看出, 对于同样的像差大小, 用可见光干涉仪进行测试时会更明显, 其装调测试的灵敏度更高。

为了使系统像差迅速收敛, 在系统装调时

通常以主镜为基准, 主要调整次镜和三镜的空间位置。用 D 和 T 表示反射镜的平移失调和空间角失调。于是次镜的六个空间调整变量分别为 D_{xs} 、 D_{ys} 、 D_{zs} 、 $T_{\alpha s}$ 、 $T_{\beta s}$ 、 $T_{\gamma s}$, 三镜的六个空间调整变量分别为 D_{xt} 、 D_{yt} 、 D_{zt} 、 $T_{\alpha t}$ 、 $T_{\beta t}$ 、 $T_{\gamma t}$ 。

表4 红外通道像差($\lambda=632.8\text{ nm}$)

归一化视场角	$(-1^\circ, 0^\circ)$	$(0^\circ, 0^\circ)$	$(1^\circ, 0^\circ)$
Z_5/λ	0.194	-0.090	0.194
Z_6/λ	-0.678	0.000	0.678
Z_7/λ	-0.244	0.000	0.244
Z_8/λ	0.166	0.244	0.166
Z_9/λ	0.072	0.066	0.072
RMS/ λ	0.315	0.123	0.315

干涉图

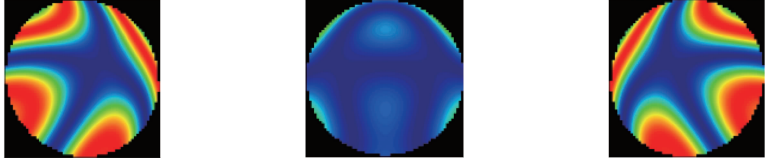
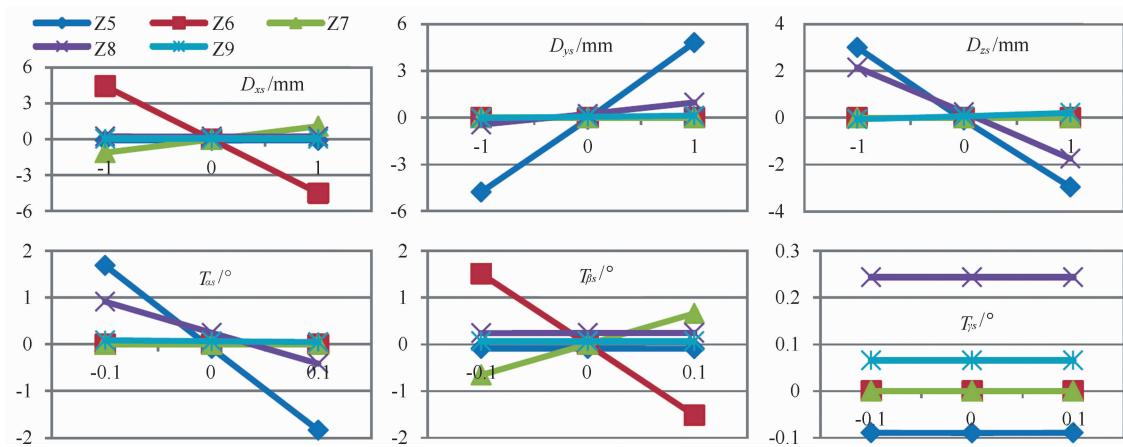



图6 次镜失调量与像差的关系

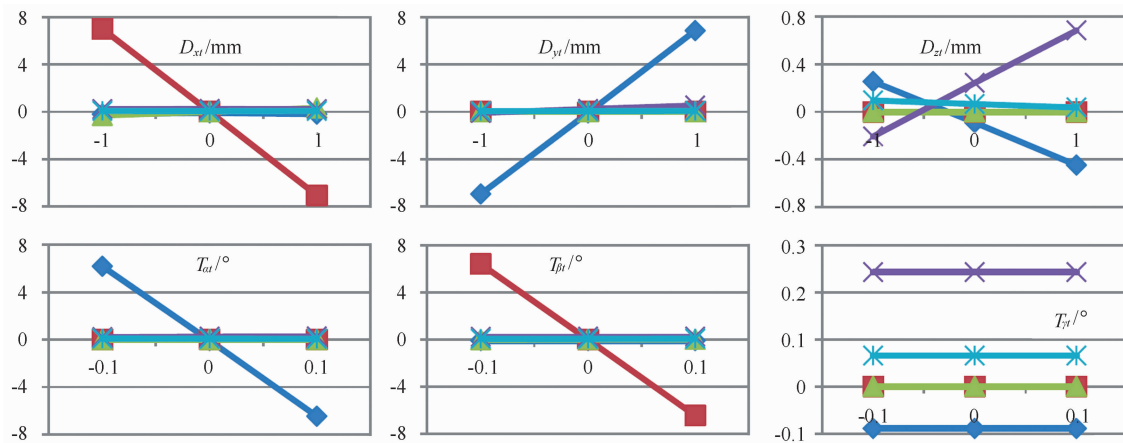


图7 三镜失调量与像差的关系

图6和图7所示分别为次镜和三镜的失调量与像散、彗差及球差的关系。可以看出，反射镜的失调量与像差之间成线性关系。

通过计算图6和图7中各曲线的斜率，即

可得到次镜和三镜的灵敏度矩阵(见表5)。可以看出，失调量主要使系统产生较大的像散和彗差， D_x 、 D_y 、 D_z 、 T_α 、 T_β 会带来不同方向的像散和彗差，角度失调灵敏度明显比平移失调灵

敏度高, T_z 基本不影响系统像差。

2.1.3 光学系统畸变的仿真分析

大视场离轴非对称式光学系统一般都有畸变。它虽然不会改变图像清晰度, 但是会改变图像的几何形状。这会影响视场角和焦距的测量, 进而影响幅宽。因此, 在光学设计和装调时应充分加以考虑。

光学系统沿轨方向偏场, 穿轨方向视场对称。图 8 为光学系统的畸变网格。可以看出, 该系统存在负畸变, 并且在边缘视场畸变较大。

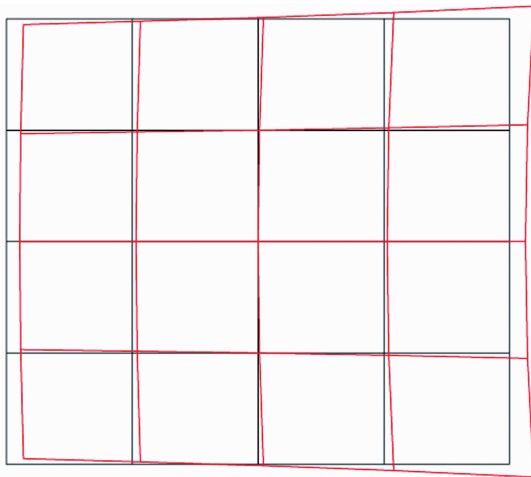


图 8 光学系统畸变

2.2 可见光通道的像差分析

受卫星的空间限制, 可见光通道进行了两次折转, 光路比较复杂, 如图 9 所示。可见光谱段与中长波谱段在一个方向上的成像视场角不一致。在中间像面处放置反射镜, 将可见光谱段分离出来。可见光谱段与中长波谱段共用主镜和次镜, 光线经过可见光通道三镜后再经过折转镜到达像面。可见光通道的灵敏度分析方法与红外通道相同, 在此不再赘述。

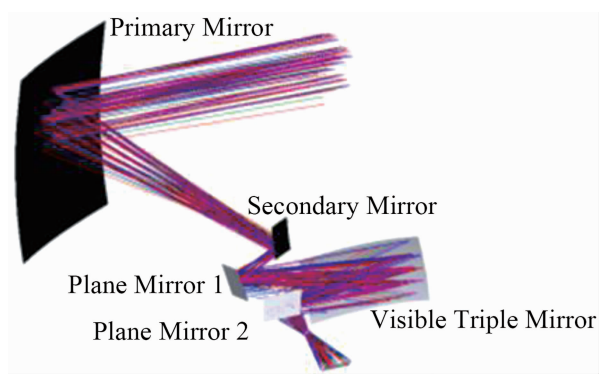


图 9 可见光通道的光路图

表 6 列出了可见光通道各视场的像差数据。可以看出, 可见光通道各视场的初阶像差几乎为零, 设计基本达到衍射极限。装调测试时需要将各视场的像差调到零。这样系统波前和传递函数即可满足设计要求。

3 相机装调测试

3.1 红外通道装调

图 10 为红外通道装调的实物图。4D 干涉仪位于长波红外通道的焦面处, 其出射的光通过相机到达平面反射镜后进行自准直。主镜公差比较严格, 因此主镜作为系统装调测试的基准, 只是在系统初调时进行简单调整。系统精调时主要调整次镜和三镜。将 $(0^\circ, 0^\circ)$ 视场的光阑安装在主镜框上, 然后根据灵敏度矩阵反复调整次镜和三镜的空间位置, 使系统的中心视场像差和传递函数均满足设计要求。将轴外视场的光阑安装在主镜框上, 并精调次镜和三镜的位置。通过不断迭代直至各个视场的像差和传递函数均满足设计要求。

表 7 列出了红外相机红外通道的装调测试结果。可以看出, 该数据与光学设计结果基本一致。

表 5 灵敏度矩阵

	D_{zs}	D_{ys}	D_{zs}	T_{zs}	T_{ys}	T_{ys}	D_{xt}	D_{yt}	D_{zt}	T_{xt}	T_{yt}	T_{zt}
Z_5	0.00	4.80	-2.98	-17.61	0.00	0.00	0.00	6.91	-0.35	-63.24	-0.01	0.00
Z_6	-4.48	0.00	0.00	0.00	-15.16	0.00	-7.04	0.00	0.00	0.00	-64.47	0.00
Z_7	1.11	0.00	0.00	0.00	6.59	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00
Z_8	0.00	0.71	-1.95	-6.62	0.01	0.00	0.00	0.31	0.45	0.26	0.01	0.00
Z_9	0.00	0.07	0.13	-0.18	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.03	-0.10	0.00	0.00

表6 可见光通道像差($\lambda=632.8\text{ nm}$)




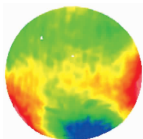
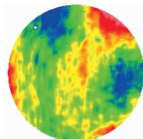
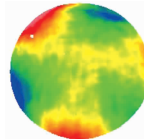
归一化视场角	$(-1^\circ, 0^\circ)$	$(0^\circ, 0^\circ)$	$(1^\circ, 0^\circ)$
Z_5/λ	0.022	0.000	0.022
Z_6/λ	0.000	0.000	0.000
Z_7/λ	0.000	0.000	0.000
Z_8/λ	-0.047	-0.047	-0.047
Z_9/λ	-0.006	-0.006	-0.006
RMS/ λ	0.019	0.017	0.019
干涉图			

表7 红外通道的装调测试结果

归一化视场角	$(-1^\circ, 0^\circ)$	$(0^\circ, 0^\circ)$	$(1^\circ, 0^\circ)$
RMS/ λ	0.33	0.15	0.33
干涉图			

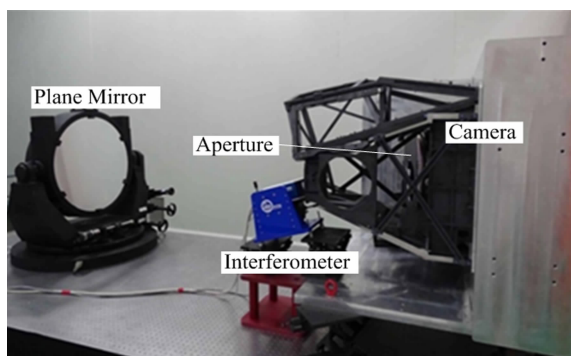


图10 红外通道装调

由于短中波谱段和长波谱段共用主镜、次镜和三镜，只是在三镜的后面加入分色片，使其分成短中波谱段通道和长波谱段通道。这两个通道的焦距、 F 数和成像视场角一致。因此，在确定主镜、次镜和红外通道三镜的位置后，只需将分色片安装到正确位置上即可将短中波谱段通道和长波谱段通道分开，从而完成两个红外通道的装调。

3.2 可见光通道装调

由于可见光谱段与红外谱段共用主镜和次镜，它们在红外通道装调时就已经确定了位

置。因此，可见光通道装调时主要调整折转镜和可见光通道三镜的位置即可。如图11所示，调整一次像附近折镜和可见光通道三镜的位置，使系统像差、传递函数和视场角均满足要求。

表8列出了可见光通道的装调测试结果。可以看出，可见光通道像差与光学设计结果基本一致。

3.3 焦距测量及焦面位置确定

近轴平行光以某一角度进入光学系统，然后汇聚到系统焦平面上，如图12所示。因此，光学系统焦距与像高的关系为

$$f = \frac{L}{\tan\theta} \quad (9)$$

光机系统各视场的像质满足要求后，需要测量焦距并确定焦面位置，为后期安装探测器奠定基础。光学系统的焦距测量主要有放大率法和测角法。由于测角法的测量精度相对较高，近年来得到了广泛利用。国内的诸多学者也对测角法进行了大量研究^[22-26]。本文采用基

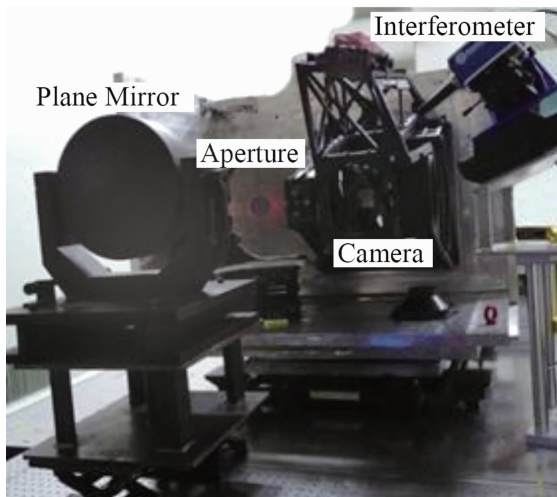


图 11 可见光通道装调

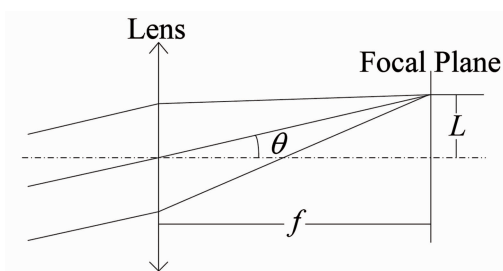


图 12 物像关系

于激光跟踪仪空间位置测量、干涉仪高精度干涉测量和经纬仪精密测角的方法对系统焦距进

行测量。

建立图 13(a)所示的自准直光路。干涉仪出射的光线通过相机后经平面镜自准直。如图 13(b)所示, 调整激光跟踪仪的靶球位置, 使干涉仪的出射光线经过靶球后自准直。此时, 靶球中心即为相机光学系统当前视场的焦点位置。用激光跟踪仪测量靶球位置并记录下来。转动平面镜, 然后用经纬仪测量平面镜转过的角度。利用同样的方法可以测量相机其它视场的焦点位置, 从而得到全视场的焦面位置。由于系统存在畸变, 计算焦距时需要选择近轴的两焦点之间的距离作为像高。

4 结论

表 9 给出了相机在轨获取的曹妃甸的可见光、短波红外、中波红外和长波红外图像。该相机可实现 20 m/40 m 的空间分辨率、12 个可见光至长波红外谱段、5 天一次对我国及近海区域的陆地、水体、海洋目标观测^[27]。可以看出, 相机在轨图像的质量良好。

通过基于光线追迹的视场光阑约束主镜的有效光线, 对于将孔径光阑放在冷屏上的反射

表 8 可见光通道的装调测试结果

归一化视场角	$(-1^\circ, 0^\circ)$	$(0^\circ, 0^\circ)$	$(1^\circ, 0^\circ)$
RMS/ λ	0.07	0.06	0.07
干涉图			

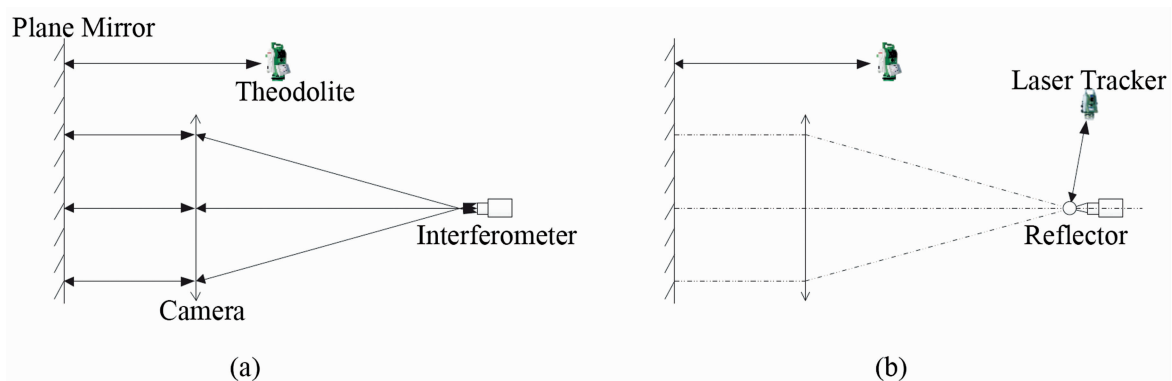


图 13 焦面位置的确定

表 9 在轨图像



式或折反式红外相机具有重要的现实意义。而且将孔径光阑放在冷屏上的透射式镜头也可通过设计第一透镜的视场光阑来实现对进入光学系统的有效光线的约束。利用计算机辅助装调仿真分析了相机各视场像差和反射镜的失调量对系统像质的影响。这为离轴三反或多反相机的装调测试提供了理论指导,使系统像差迅速收敛,从而大大提高装调效率。通过将激光跟踪仪测量引入到焦距和焦面的确定中,可以对相机焦距及畸变进行初步测试,为后期定焦及内方位测试奠定基础。相机最终的装调测试结果与设计结果基本一致,说明仿真分析正确,装调方法合理可行。

参考文献

- [1] 刘强,王欣,黄庚,等. 大视场大相对孔径斜轴离轴三反望远镜的光学设计 [J]. 光子学报, 2019, 48(3): 0322002.
- [2] 王彬,伍凡,叶玉. 离轴三反系统计算机辅助装调 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1118006.
- [3] 刘剑峰,龙夫年,张伟. 离轴三镜系统计算机辅助装调方法研究 [J]. 光学技术, 2004, 30(5): 571-573.
- [4] 杨晓飞,韩昌元. 利用离轴三反镜光学系统确定各镜的装调公差 [J]. 光学技术, 2005, 32(2): 173-176.
- [5] 张斌,韩昌元. 离轴非球面三反射镜光学系统装调中计算机优化方法的研究 [J]. 光学学报, 2001, 21(1): 54-58.
- [6] 杨晓飞,张晓辉,韩昌元. Zemax 软件在离轴三反射镜系统计算机辅助装调中的应用 [J]. 光学精密工程, 2004, 12(3): 271-274.
- [7] 赵艳华,戴立群,白绍竣,等. 全谱段光谱成像仪系统设计及实现 [J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 40.
- [8] 赵茜. 基于光线追迹的光学载荷成像仿真方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [9] 李林,安连生. 计算机辅助光学设计的理论与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [10] 操超,廖志远,白瑜,等. 基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计 [J]. 物理学报, 2019, 68(13): 134201.
- [11] 郭培基,余景池. 用校正法提高补偿器检测法的精度 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 203-204.
- [12] 车驰骋,李英才,帆学武,等. 基于矢量波像差理论的计算机辅助装调技术研究 [J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1630-1631.
- [13] 杨晓飞,张晓辉,韩昌元. 用像差逐项优化法装调离轴三反射镜光学系统 [J]. 光学学报, 2004, 24(1): 117-118.
- [14] 罗森,朱永田. 计算机辅助装调方法在离轴卡塞格林系统中的应用 [J]. 光学技术, 2008, 34(4): 514-517.
- [15] 李旭阳,李英才,马臻,等. 折轴三反射光学系统的计算机辅助装调技术研究 [J]. 应用光学, 2009, 30(6): 901-906.
- [16] 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.
- [17] 赵凯华,钟锡华. 光学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2008.
- [18] 田原媛,黄合成. 基于 CCD 摄像机成像的径向畸变研究 [J]. 世界科技研究与发展, 2008, 3(2): 168-169.
- [19] 汤旭涛. 广角摄像头视频图像实时校正系统设计 [D]. 上海: 华东师范大学, 2009.

- [20] 吴培, 王延杰, 孙宏海, 等. 高动态调光成像系统畸变的自校正 [J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(10): 2999–3001.
- [21] 叶晴旻. 大视场相机畸变校正相关技术的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [22] 陈磊, 高志山, 何勇. 红外光学透镜焦距测量 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(8): 986–988.
- [23] 杨振刚, 陈海清. 红外光学系统焦距测量的研究 [J]. *光学与光电技术*, 2011, **9**(6): 33–35.
- [24] 谭进国, 何欣. 离轴三反空间相机的焦距测量 [J]. *光学仪器*, 2014, **36**(4): 287–290.
- [25] 姚震, 吴易明, 高立民, 等. 长焦距红外光学系统焦距检测方法 [J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(6): 1950–1954.
- [26] 黄阳, 王春雨, 牛锦川, 等. 长焦红外光学系统焦距的高精度测量技术 [J]. *应用光学*, 2017, **38**(6): 995–998.
- [27] 孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 等. “高分五号”卫星概况及应用前景展望 [J]. *航天返回与遥感*, 2018, **39**(3): 1–2.