

# 可见光与红外一体化光学系统设计

李瑞昌<sup>1,2</sup> 邹刚毅<sup>1,2</sup> 王臣臣<sup>1,2</sup> 樊学武<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 空间遥感相机的空间分辨率、时间分辨率以及光谱分辨率不断提高,相机的观测谱段也得到了拓展,实现了多谱段观测。针对多谱段观测需求,通过计算以及光学设计软件设计研究了可见光与红外一体化光学系统。可见光部分系统焦距为 6000 mm, $F$  数为 11.8,波段为 400~900 nm。红外部分系统焦距为 1280 mm, $F$  数为 2.5,波段为 3000~5000 nm,两个系统视场均为  $1.4^\circ \times 0.6^\circ$ 。可见光波段系统与红外波段系统共用前四片反射镜,五镜为二向分色镜,将可见光反射至五镜上方的时间延迟积分 CCD 中,红外波段透过五镜至后方校正镜组。整个系统无色差,结构较为紧凑,可见光与红外部分成像质量均达到要求。

**关键词** 光学设计; 遥感相机; 一体化光学系统; 可见光; 红外

**中图分类号** TB21; TN21 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0522002

## Optical Design of Visible and Infrared Integrative Camera

Li Ruichang<sup>1,2</sup> Zou Gangyi<sup>1,2</sup> Wang Chenchen<sup>1,2</sup> Fan Xuewu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

<sup>2</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** The spatial resolution, time resolution and spectral resolution of the space remote sensing camera are improved gradually, the spectral band for observation of the camera is also extended and the multispectral observation is realized. The design of visible and infrared integrative optical system is studied based on the need of multispectral observation. The design is accomplished through calculation and an optical design software. In this design, the system focal length of the visible part is 6000 mm,  $F$  number is 11.8 and the wavelength band is 400~900 nm. The system focal length of the infrared part is 1280 mm,  $F$  number is 2.5 and the wavelength band is 3000~5000 nm. The field of view is  $1.4^\circ \times 0.6^\circ$  for both of the systems. The visible band system and the infrared band system share the first four mirrors, the fifth is a dichroic mirror and reflects the visible light to the time delayed and integration CCD which is over the fifth mirror. The infrared light passes through the fifth mirror to the rear lens set for correction. The whole system has no color aberration, its structure is compact, and the image quality for visible and infrared is up to par.

**Key words** optical design; remote sensing camera; integrative optical system; visible light; infrared

**OCIS codes** 220.4830; 110.3080; 130.3120

## 1 引言

随着科技的不断进步,各国所研制的空间遥感相机在时间分辨率、空间分辨率以及光谱分辨率方面有了显著提高,相机的观测谱段得到了拓展,实现了多谱段观测。例如,近几年美国发射的空间遥感卫星 WorldView-3,不仅拥有较高的地面分辨率,还可以进行多谱段观测,观测谱段覆盖了可见光及近红外波段,观测的波段数共 28 个。韩国于 2014 年底发射的遥感卫星 KOMPSAT-3A,在相机设计上使用了一体化成像光学系统,对可见光、近红外以及中波红外波段同时成像,与上一代遥感卫星 KOMPSAT-3 相比,对谱段进行了红外波段的拓展。红外波段的相机不仅可以在夜间正常工作,还可以对高温和烟雾进行预警,弥补可

**收稿日期:** 2015-11-18; **收到修改稿日期:** 2016-01-05

**作者简介:** 李瑞昌(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学设计等方面的研究。E-mail: 543976277@qq.com

**导师简介:** 樊学武(1972—),男,博士,研究员,主要从事光学设计、对地遥感相机、红外相机等方面的研究。

E-mail: 3076048309@sina.com

见光观测的不足。同时观测可见光与红外两个波段可以提升相机对不同观测环境的适应能力。由此可见,提高相机分辨率和拓展相机的观测谱段是空间遥感相机今后发展的重要方向。

## 2 技术指标

要求设计一个可见光与红外一体化光学系统,波段为可见光以及中波红外波段,主要光学指标如表 1 所示。

表 1 光学系统主要指标  
Table 1 Main parameters of optical system

| Parameter              | Visible                      | Infrared                     |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Effective focal length | 6000 mm                      | 1280 mm                      |
| $F \#$                 | 11.8                         | 2.5                          |
| Field of view          | $1.4^\circ \times 0.6^\circ$ | $1.4^\circ \times 0.6^\circ$ |
| Wavelength             | 400—900 nm                   | 3—5 $\mu\text{m}$            |

空间遥感相机的地面分辨率  $G_{\text{SD}}$  是由卫星轨道高度  $H$ 、像元尺寸  $\mu$  及光学系统焦距  $f$  共同决定的,其关系为<sup>[1]</sup>

$$G_{\text{SD}} = \frac{H\mu}{f} \quad (1)$$

以 320 km 轨道高度为例,要求可见光波段地面分辨率高于 0.5 m,红外波段地面分辨率高于 6 m。由(1)式可求出各探测器像元尺寸大小,并根据计算结果选择与其最接近的实际探测器。可见光部分拟采用像元尺寸为 8.75  $\mu\text{m}$  的线阵时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)探测器,探测器长度约为 223 mm,像元数为  $2.4 \times 10^4$  个。可见光的像面可以根据实际情况来布置探测器,例如只采用全色探测器,或者采用五谱合一的全色和多光谱探测器,从而实现多光谱探测,光路共用。红外部分选用像元大小为 20  $\mu\text{m}$  的线阵推扫式红外焦平面探测器,探测器长度约为 47.6 mm,像元数为  $2.4 \times 10^3$  个。计算得出可见光部分地面分辨率约为 0.47 m,红外部分地面分辨率为 5 m,符合设计要求<sup>[2]</sup>。

## 3 设计思路

设计拟采用反射式光学系统。反射式光学系统具有结构紧凑、无色差、无二级光谱等优点。红外透射式光学系统对透镜的材料要求较高,而反射式光学系统不存在该问题,且反射镜材料比透镜材料更容易得到,尤其是较大口径的透镜材料<sup>[3]</sup>。

设计的难点在于如何合理安排各反射镜以及探测器的位置,使其在不遮挡光路的前提下布局更加紧凑,充分利用空间。在设计时要控制各反射面的曲率半径及二次曲面系数,使设计更加合理<sup>[4]</sup>。

### 3.1 可见光部分光学系统设计

可见光部分光学系统在共轴三反式光学系统的基础上采用偏视场设计。光线经过前三面反射镜后通过四镜、五镜两片折轴镜折叠光路,最终到达五镜上方的 TDICCD。主镜中心挖空,四镜位于主镜孔洞中心。

共轴三反式光学系统的自由变量增加至 7 个,分别为  $e_1^2$ 、 $e_2^2$ 、 $e_3^2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ ,  $e_1^2$ 、 $e_2^2$ 、 $e_3^2$  代表三个反射面的二次曲面特性, $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别为次镜和三镜的放大率, $\alpha_1$  为次镜对主镜遮拦比, $\alpha_2$  为三镜对次镜遮拦比<sup>[5]</sup>。

根据系统参数以及各镜片间的距离要求确定共轴三反系统的焦距  $f$  及其系统结构参数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ,系统的表面参数以及各镜间的距离为

$$R_1 = \frac{2f}{\beta_1\beta_2}, \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{2\alpha_1 f}{\beta_2(1+\beta_1)}, \quad (3)$$

$$R_3 = \frac{2\alpha_1\alpha_2 f}{1+\beta_2}, \quad (4)$$

$$d_1 = \frac{(1 - \alpha_1)f}{\beta_1\beta_2}, \quad (5)$$

$$d_2 = \frac{(1 - \alpha_2)\alpha_1 f}{\beta_2}, \quad (6)$$

$$l'_3 = f\alpha_1\alpha_2, \quad (7)$$

式中  $R_1, R_2, R_3$  分别为主镜、次镜、三镜的顶点曲率半径,  $d_1$  为主镜到次镜的距离,  $d_2$  为次镜到三镜的距离,  $l'_3$  为三镜到像面的距离。设计采用有一次像面的三反系统, 一次像面位于次镜和三镜之间, 即  $0 < \alpha_1 < 1, \beta_1 < 0$ 。为了使主镜的中心挖孔尺寸尽量小, 一次像面的位置尽量在主镜孔洞中心, 如图 1 所示, 即焦点伸出量  $\Delta$  取值约为 0。 $\Delta$  计算公式为

$$\Delta = l_2(\beta_1 - 1) + f'_1, \quad (8)$$

式中  $l_2$  为次镜到主镜焦点的距离。

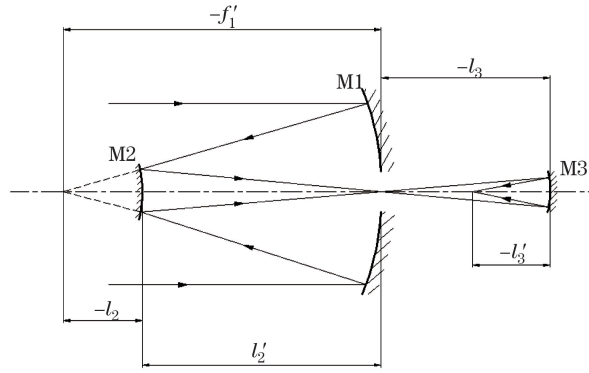


图 1 共轴系统初始结构 ( $\Delta=0$ )

Fig. 1 Initial structure of coaxial system ( $\Delta=0$ )

三反式光学系统有 7 个自由参数, 可同时消除球差  $S_I$ 、彗差  $S_{II}$ 、像散  $S_{III}$ 、场曲  $S_{IV}$  4 种像差, 计算后的消像差条件如下<sup>[6]</sup>:

$S_I = 0$  时,

$$e_2^2(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)^3 - e_3^2[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)^3 = (\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - [\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 - 2\beta_1\beta_2, \quad (9)$$

$S_{II} = 0$  时,

$$e_1^2 = 1 + \frac{1}{\beta_1^3\beta_2^3}[\alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 - \alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 + e_2^2\alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)^3 - e_3^2\alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)^3], \quad (10)$$

$S_{III} = 0$  时,

$$e_2^2 \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1 + \beta_1)^3}{4\alpha_1\beta_1^2} - e_3^2 \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1 + \beta_2)^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} = \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\alpha_1\beta_1^2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} - \beta_1\beta_2 - \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)(1 - \beta_1)(1 + \beta_1)}{\alpha_1\beta_1} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 - \beta_2)(1 + \beta_2)}{\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2} + \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1\alpha_2}, \quad (11)$$

$S_{IV} = 0$  时,

$$\beta_1\beta_2 = \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1\alpha_2}. \quad (12)$$

轮廓尺寸确定后, 可由消像差条件(9)~(12)式求出主镜、次镜、三镜的二次曲面系数分别为  $-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$ 。

用 Matlab 软件编程计算光学系统初始结构参数, 并代入 Code V 中进一步优化, 初始结构参数如表 2 所示。

表 2 光学系统初始结构参数

Table 2 Original structure parameters of optical system

| Mirror    | Radius /mm | Distance /mm | Conic   |
|-----------|------------|--------------|---------|
| Primary   | -2400      | -840         | -1.0270 |
| Secondary | -960       | 2880         | -3.0816 |
| Tertiary  | -1600      | -1800        | -1.6667 |

### 3.2 红外部分光学系统设计

红外部分光学系统与可见光系统共用前四片反射镜,在五镜(二向分色镜)处透射后进入校正镜组。校正镜组选用离轴四反光学系统<sup>[7]</sup>。

离轴四反光学系统的设计是在共轴四反光学系统的基础上给各镜片设置一定的离轴量,再进一步优化,使其消除中心遮拦,且布局更加紧凑。

共轴四反光学系统依旧利用三级像差理论来求解,其初始结构参数较共轴三反光学系统多两个结构参数,三镜遮拦比 $\alpha_3$ 和三镜放大率 $\beta_3$ 。在设计中,一些初始结构参数可以根据技术指标中对系统尺寸的要求预先设定一个数值,譬如各镜片的遮拦比 $\alpha$ 以及放大率 $\beta$ 。另一些参数,譬如光线入射角度 $u$ ,可以根据设计中共用部分真实光线追迹得出。将 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 等代入三级像差表达式中计算得出初始结构,在这个结构基础上先对共轴时各镜的距离进行调整,再加入离轴量进行进一步优化。三级像差表达式为<sup>[8]</sup>

$$S_I = \sum hP + \sum h^4K, \quad (13)$$

$$S_{II} = \sum yP - J \sum W + \sum h^3yK, \quad (14)$$

$$S_{III} = \sum \frac{y^2}{h}P - 2J \sum \frac{y}{h}W + J^2 \sum \phi + \sum h^2y^2K, \quad (15)$$

$$S_{IV} = \sum \frac{\Pi}{h}, \quad (16)$$

$$S_V = \sum \frac{y^3}{h^2}P - 3J \sum \frac{y^2}{h^2}W + J^2 \sum \frac{y}{h} \left( 3\phi + \frac{\Pi}{h} \right) - J^3 \sum \frac{1}{h^2} \Delta \frac{1}{n^2} + \sum hy^3K. \quad (17)$$

共轴四反光学系统的设计方法已有详细讲解<sup>[9]</sup>,不再赘述。需要注意,与以往共轴四反系统的计算稍有不同,该共轴四反系统的物距是有限远的,初始入射光线并不是平行光,即 $l_1 \neq \infty, u_1 \neq 0$ 。

## 4 设计结果

将第2节的设计指标以及第3节的计算结果代入Code V软件设计可见光与红外一体化光学系统,所有Y视场全部向上方偏移 $0.85^\circ$ 。

### 4.1 可见光部分

可见光部分光学系统最终设计参数如表3所示。

表 3 可见光部分参数

Table 3 Parameters of visible part

|                 | Radius /mm | Distance /mm | Conic   |
|-----------------|------------|--------------|---------|
| Primary         | -2074.38   | -790.19      | -0.9425 |
| Secondary       | -718.62    | 1643.36      | -3.0248 |
| Tertiary        | -1098.68   | -853.17      | -0.4053 |
| 4 <sup>th</sup> | $\infty$   | 469.33       | 0       |
| 5 <sup>th</sup> | $\infty$   | -220.10      | 0       |

可见光部分光学系统如图2所示,由三片二次曲面镜以及两片平面折轴镜组成。主镜半孔径约为271 mm,系统遮拦比约为1/3.35。系统总长约为1.65 m,光阑位于次镜前方,以便于消除杂光。一次像面位置与主镜反射面所在位置相同,四镜位于主镜孔洞中心,主镜孔洞基本达到最小。四镜、五镜上分别镀有二向分色膜(四镜只反射波长大于400 nm的光,五镜只反射波长小于900 nm的光),可达到可见光与红外

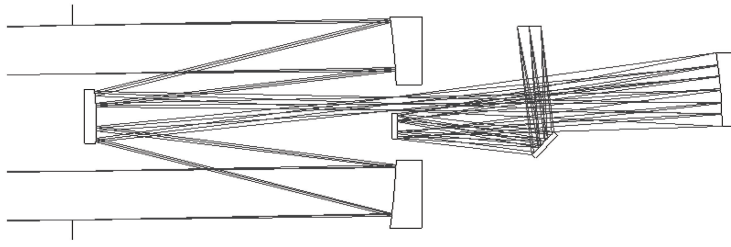


图 2 可见光部分光学系统

Fig. 2 Optical system of visible part

分离的效果。可见光部分最终反射进入五镜上方的 TDICCD 中。

光学成像质量通常用像点图以及调制传递函数 (MTF) 来评价。可见光部分探测器像元尺寸为  $8.75 \mu\text{m}$ , 对应奈奎斯特频率为  $57 \text{ lp/mm}$ 。为了更加全面地对像质进行评价, 选择以下 9 个视场:  $(0^\circ, 0.55^\circ)$ 、 $(0^\circ, 0.85^\circ)$ 、 $(0^\circ, 1.15^\circ)$ 、 $(0.7^\circ, 0.55^\circ)$ 、 $(0.7^\circ, 0.85^\circ)$ 、 $(0.7^\circ, 1.15^\circ)$ 、 $(0.35^\circ, 0.55^\circ)$ 、 $(0.35^\circ, 0.85^\circ)$ 、 $(0.35^\circ, 1.15^\circ)$ 。图 3 所示为 MTF 曲线图。

由图 3 可以看出, 9 个视场的 MTF 曲线均接近衍射极限, 频率为  $57 \text{ lp/mm}$  时各视场 MTF 值基本高于 0.35。

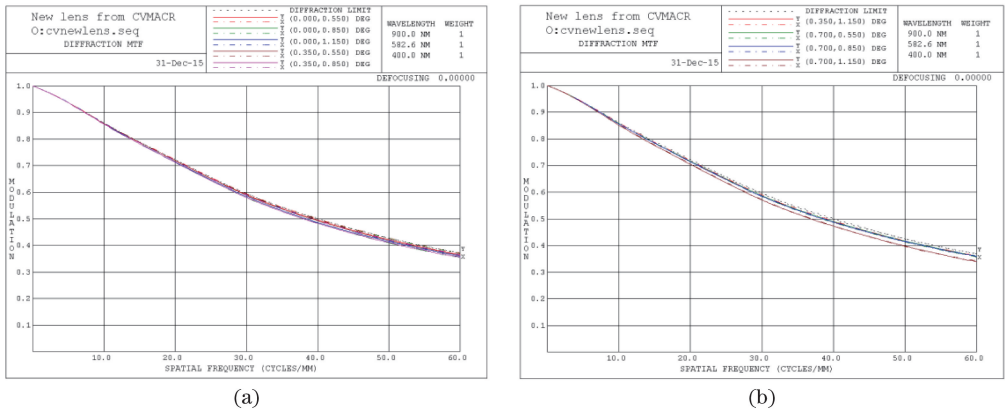


图 3 可见光部分 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves of visible part

如图 4 所示像点图, 各个视场像点均在艾利斑以内。如图 5 所示畸变曲线图, 畸变值最大约为千分之二, 成像质量良好。

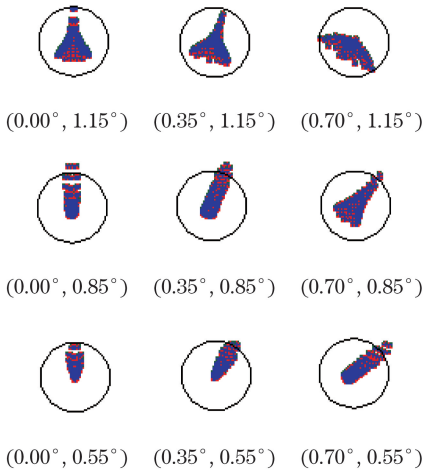


图 4 可见光部分像点图

Fig. 4 Spot diagrams of visible part

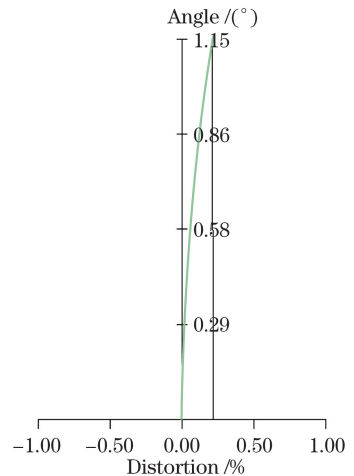


图 5 可见光部分畸变曲线

Fig. 5 System distortion of visible part

## 4.2 中波红外部分

红外部分光学系统由 8 片反射镜以及 1 片平行平板透镜(五镜)组成,五镜采用硅作为材料,可以透过中波红外波段,厚度约为 13 mm。六镜、七镜、八镜、九镜构成校正镜组。从四镜开始系统数据如表 4 所示(5<sup>th</sup>-1 和 5<sup>th</sup>-2 分别表示五镜的前后表面)。

表 4 红外校正镜组参数  
Table 4 Parameters of infrared correction part

|                    | Radius /mm | Distance /mm | Conic  | Axis tilt /( $^{\circ}$ ) | Axis offset /mm |
|--------------------|------------|--------------|--------|---------------------------|-----------------|
| 4 <sup>th</sup>    | $\infty$   | 469.33       |        |                           |                 |
| 5 <sup>th</sup> -1 | $\infty$   | 13.13        |        | -45                       |                 |
| 5 <sup>th</sup> -2 | $\infty$   | 311.18       |        | -45                       |                 |
| 6 <sup>th</sup>    | -2560.00   | -631.76      | 6.0000 |                           | -121.67         |
| 7 <sup>th</sup>    | 1574.93    | 590.77       | 4.6520 |                           | -181.19         |
| 8 <sup>th</sup>    | 424.02     | -510.12      | 4.7423 |                           | -78.79          |
| 9 <sup>th</sup>    | 608.40     | 527.53       | 0.0979 |                           | -2.91           |

红外部分光学系统如图 6 所示,光线经四镜反射后透过五镜进入校正镜组,校正镜组 4 片反射镜均采用二次曲面。校正镜组 4 片反射镜只存在 Y 方向上的偏心。为了使镜片之间布局更加紧凑,并且保证五镜位置对后面的光路不造成影响,各个镜子不遮挡光路,优化时需要重点控制六镜、七镜、八镜的偏移量以及六镜的曲率半径。六镜曲率半径在对后面光路影响较小的情况下要尽量小,为五镜留下足够空间。4 片镜子均采用基本偏心,无倾斜量<sup>[10-11]</sup>。

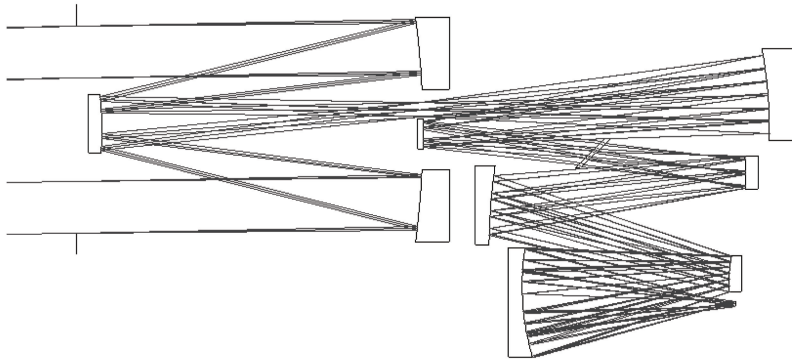


图 6 红外部分光学系统

Fig. 6 Optical system of infrared part

红外部分视场设置与可见光部分相同,其光学系统 MTF 曲线如图 7 所示,各视场曲线均接近衍射极限。像元尺寸为 20  $\mu\text{m}$ ,即奈奎斯特频率取 25 lp/mm 时,所有视场 MTF 值基本都在 0.4 以上。从像点图(图 8)可以看出,像点大小均小于艾利斑,像质良好。

## 4.3 一体化光学系统

整合后的可见光与红外一体化光学系统整体效果图如图 9 所示<sup>[12]</sup>。该系统实现了一台设备同时对可见光波段与红外波段成像。光学系统总长约为 1.65 m,整体高度约为 0.8 m,结构较为紧凑。偏心方面,除五镜存在倾斜以外(与光轴夹角为 45 $^{\circ}$ ),其余各镜片均未设置倾斜量。系统各方面均满足设计要求。

## 5 结 论

结合当前空间遥感观测的需求以及国内外的的发展趋势,计算并设计了一种全反射镜式可见光与红外一体化相机。该光学系统由反射镜以及一片二向分光镜组成,整体结构紧凑,不存在色差、二级光谱等问题。系统中可见光与红外波段在奈奎斯特频率处的 MTF 均达到成像要求,像质良好,满足设计指标。设计中,反射镜的二次曲面系数均控制在 $\pm 6$ 以内,镜片中除了分光镜以外,其他反射镜均未引入倾斜量,为后期加工和装调提供了便利。但该结构形式的光学系统目前要在国内实现还比较困难,无论是镜片的加工,还是整

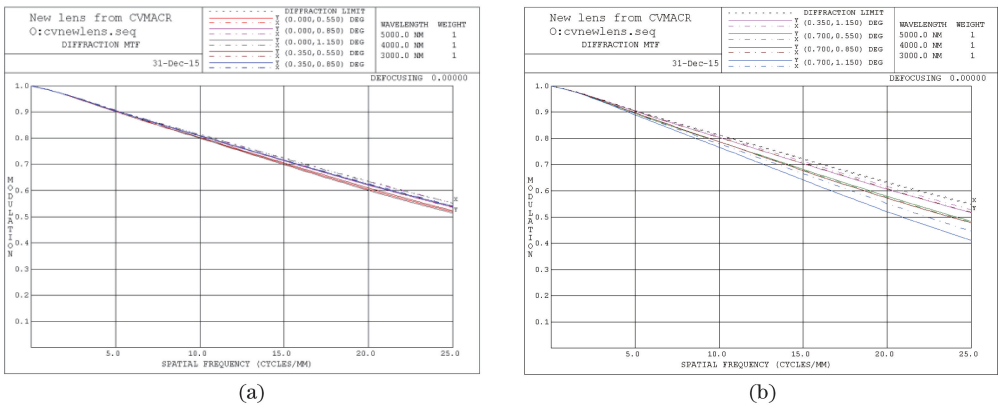


图 7 红外部分 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves of infrared part

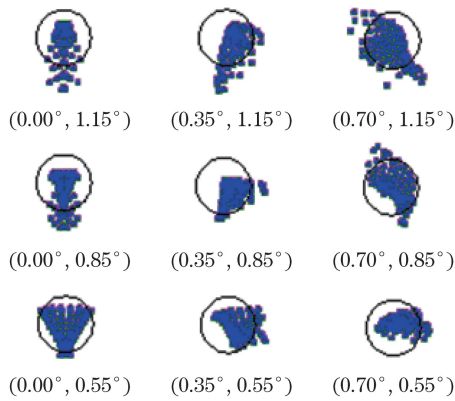


图 8 红外部分像点图

Fig. 8 Spot diagrams of infrared part

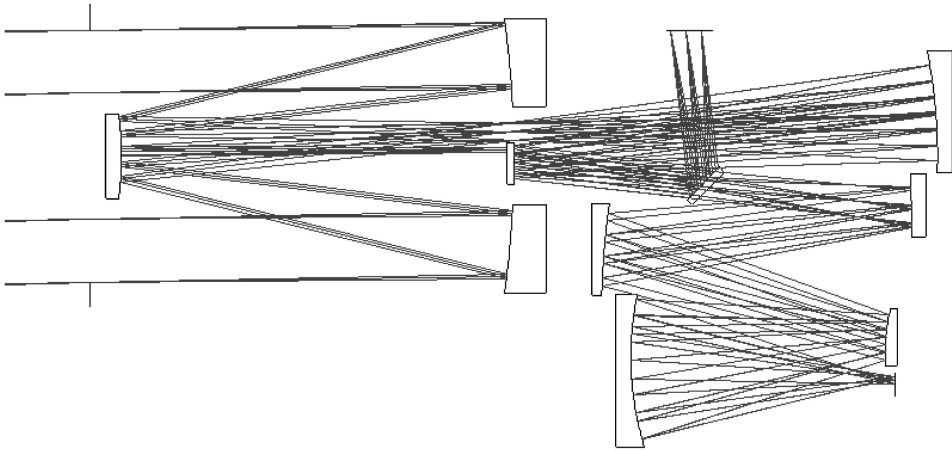


图 9 一体化光学系统

Fig. 9 Integrative optical system

体相机的装调、校准或者检测都具有一定的难度。但随着加工、检测技术的不断发展,此类一体化光学系统将会更加普遍,技术也将更加成熟。

参 考 文 献

1 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen, *et al.*. Optical system design of space camera with large  $F$  number and long focal length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2093-2097.  
李旭阳, 李英才, 马 臻, 等. 大  $F$  数长焦距空间相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 2093-2097.

- 2 Wang Xiaokun. Optical design of a high resolution space camera[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122001.  
王孝坤. 一种高分辨力空间相机的光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122001.
- 3 Fan Xuewu, Chen Rongli, Li Yingcai, *et al.*. Study on the three reflective optical system having secondary image surface [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(8): 1001-1003.  
樊学武, 陈荣利, 李英才, 等. 具有二次像面的三反射光学系统的研究[J]. 光子学报, 2003, 32(8): 1001-1003.
- 4 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei, *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2680-2683.  
郭永祥, 李英才, 梁天梅, 等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2680-2683.
- 5 Pan Junhua. The Optical design of large-diameter infrared imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12): 1475-1478.  
潘君骅. 大口径红外成像系统的光学设计[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1475-1478.
- 6 Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie, *et al.*. Design of a low  $F$ -number compact a thermalizing infrared optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322003.  
曲贺盟, 张 新, 王灵杰, 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322003.
- 7 Xia Chunqiu, Zhong Xing, Jin Guang. Design of the off-axis four mirrors system by differential equations[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0922002.  
夏春秋, 钟 兴, 金 光. 基于微分方程方法的离轴四反光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0922002.
- 8 Pan Junhua. The design manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004: 10-21, 130-141.  
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 10-21, 130-141.
- 9 Liang Shitong, Yang Jianfeng, Xue Bin, *et al.*. Aberration analysis and design of four-mirror reflective optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3300-3305.  
梁士通, 杨建峰, 薛 彬, 等. 四反射镜光学系统像差分析与设计[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3300-3305.
- 10 Guo Yongxiang, Li Yongqiang, Liao Zhibo, *et al.*. Novel design of off-axis three reflective optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2): 547-548.  
郭永祥, 李永强, 廖志波, 等. 新型离轴三反射光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 547-548.
- 11 Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.*. Optical design and stray light analysis for ultraviolet board width off-axis four mirrors optical system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0216001.  
朱 杨, 张 新, 伍雁雄, 等. 紫外宽幅离轴四反光学系统设计及其杂散光分析[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0216001.
- 12 Yang Lihua, Fan Xuewu, Zou Gangyi, *et al.*. Optical design of visible/infrared integrative camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 30(9): 2680-2683.  
杨利华, 樊学武, 邹刚毅, 等. 可见光红外一体化两用相机的光学设计[J]. 红外与激光工程, 2010, 30(9): 2680-2683.