

大视场可见红外一体化光学系统设计

王臣臣^{1,2}, 邹刚毅^{1,2}, 庞志海¹, 李瑞昌^{1,2}, 樊学武¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 使用光学设计软件设计了一种大视场可见红外一体化反射式光学系统, 可见光和红外视场的大小分别为 5.2° 和 5.12° 。在光学系统的轨道高度为 675 km 的情况下, 可对地面目标进行 61.3 km 和 60.36 km 的大幅宽观测。在光学系统采用偏视场设计将可见光和红外光的视场进行分离, 可以实现双光路、双波段、双视场同时成像观测, 避免了使用分光装置对光能量吸收造成损失, 提高了光能利用率。可见光系统选用一个焦距为 9 000 mm 的三反系统, 红外光学系统选用两个三反系统, 后置三反系统的入瞳与前置三反系统的出瞳位置重合, 系统总焦距为 2 025 mm。经过优化, 可见光系统的 MTF 在 50 lp/mm 达到 0.45 以上, 红外系统的 MTF 在 25 lp/mm 达到 0.65 以上, 成像质量均达到衍射极限。

关键词: 大视场; 可见光; 红外光; 偏视场

中图分类号: O435 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1018003

Design of large field for visible/infrared integrated optical system

Wang Chenchen^{1,2}, Zou Gangyi^{1,2}, Pang Zhihai¹, Li Ruichang^{1,2}, Fan Xuewu¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A visible infrared integrated optical system of a large field of view is designed by using optical software, and the FOVs of the visible system and infrared system are 5.2 degrees and 5.12 degrees respectively. The orbit of the system is 675 kilometers, and have a large width of 61.3 kilometers and 60.36 kilometers respectively can be observed. The system uses a partial field to separate the field of visible light and infrared light respectively, and realize dual optical paths, dual bands and double fields of view imaging at the same time, which improve utility of visible light and infrared light by avoid the use of dividing light elements. Visible light system selects a three mirror system with a focal length of 9 000 mm. The infrared system uses two three mirror systems with a total focal length of 2 025 mm, and the entrance pupil of the rear system has the same position and size with the exit pupil of the former system. After optimizing, the modulation transfer function of the visible system is more than 0.45 at 50 lp/mm, and the infrared system's modulation transfer function is above 0.65 at 25 lp/mm respectively. The imaging quality of both systems reaches the diffraction limit.

Key words: large field; visible light; infrared light; partial field

收稿日期: 2016-02-01; 修订日期: 2016-03-09

作者简介: 王臣臣(1987-), 男, 博士生, 主要从事光学检测、光学设计方面的研究。Email: wangchenchen@opt.ac.cn

导师简介: 樊学武(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学设计、光学检测方面的研究。Email: fanxuewu@opt.ac.cn

0 引言

红外光穿透云雾能力强,可以对经过伪装的目标进行识别^[1],观测时间不受白天黑夜限制,在成像领域得到广泛的应用。但红外波长较长,分辨率低,不能对被测目标进行高分辨率观测。相比较红外光,可见光波长较短,可以获得高分辨率图像^[2],但在夜晚等光照不好的条件下不能对地进行良好观测。可以在白天光照条件比较好的情况下使用可见光波段进行成像观测;在夜晚或者光照条件差的情况下使用红外光学系统进行成像观测来获得被测物体的信息,弥补可见光学系统在夜晚不能进行良好成像观测的不足,对被测物体进行全天时成像观测,获得被测物体的更多信息,提高观测效率^[3],因此研制可见红外一体化光学系统非常必要。

在轨道高度一定的情况下,由于视场大小的限制,可见红外一体化光学系统对地观测的面积大小受到限制。同时大多数可见红外一体光学系统使用光学元件对不同波长的光进行分离,造成光能量的损失。韩国的 Kompsat 系列对地观测卫星,视场角大小为 1.77°,扫描幅宽为 15 km×15 km;快鸟系列卫星的视场角大小为 2.97°,扫描幅宽为 16.5 km×16.5 km;IKONOS-2 视场角大小为 1.55°,扫描幅宽为 13 km×13 km;以色列的 EROS-1 视场角大小为 2°,扫描幅宽为 12.5 km×12.5 km。以上可见红外光学系统对地进行观测能够实现的探测幅宽均在 10 km 以上,对于需要进行大幅宽扫描则不能满足。同时光学系统使用光学元件对可见光和红外光进行分离,一定程度上降低了光能利用率。文中设计了一款大视场可见红外一体化光学系统,根据提出的系统指标,可见光学系统采用三反系统进行设计;红外光学系统使用六个反射镜进行设计,其中与可见系统共用三个反射镜。系统采用偏视场将可见光和红外视场进行分开,没有使用分色镜,视场角达到 5.2°,可实现对地进行 60 km×12 km 的大幅宽扫描,保证了光学系统对被测目标进行大视场扫描的同时也提高了光学系统对能量的利用,实现对地高时效、大幅宽扫描。

1 光学系统参数的选择

由公式 $s' = \frac{H \cdot a}{f'}$ 可知,光学系统的分辨率大小

s' 与轨道 H 和像元尺寸 a 成正比,与焦距 f' 大小成反比^[4]。根据指标要求, H 为 675 km,可见光和红外光的分辨率分别为 0.75 m 和 5 m,探测器像元尺寸大小分别为 10 μm×10 μm、25 μm×25 μm,通过计算可得出可见光系统和红外光学系统的焦距分别为 9 000 mm 和 2 025 mm。

根据系统的指标要求,探测到的地面幅宽 $W=60$ km。将地面幅宽以及轨道高度代入到地面幅宽、轨道高度以及系统的有效视场角之间的关系式^[4]: $W=2 \times H \times \tan \omega$,可以得到光学系统的有效视场角为 $2\omega=5.1^\circ$ 。根据拼接 CCD 的布局,可见光视场选择为 $5.1^\circ \times 1^\circ$,红外视场选择为 $5.1^\circ \times 0.5^\circ$,对角线视场分别为 5.2° 和 5.12° 。

通过以上计算,可见光光学系统和红外光学系统的参数如表 1 所示。

表 1 光学系统设计参数

Tab.1 Design parameters of optical system

	Focal length/mm	Aperture /mm	Field of view	Wavelength /μm
Visible	9 000	700	5.1°×1°	0.4-0.9
Infrared	2 025	700	5.1°×0.5°	3-5

光学系统设计中视场为矩形视场,采用偏视场设计。通过偏视场设计使可见光和红外光光路分开,可单独进行探测,也可同时进行探测,互不影响。不使用二向分色镜进行分光,减少了光学元件的使用,避免光线通过二向分色镜进行反射或透射造成能量损失。

2 光学系统初始结构的选择

在进行光学系统初始结构的选择时,一般有三种结构可以进行选择:折射式、折反式和反射式^[1]。折射式光学系统的视场角一般可以设计的相对较大,但焦距比较长的系统会产生系统长度过长以及二级光谱等问题^[1]。折反式光学系统存在体积大、口径受限的缺点。反射式光学系统由于无色差,可以在紫外波段到红外波段进行成像^[5-9];反射镜数量少,借助折转镜对光路折叠,结构紧凑、质量小,因此在空间光学领域的应用特别广泛^[5-9]。

考虑到光学系统在设计时需要体积紧凑、质量小,所以选择反射式光学系统。图 1 所示为三反系统的初始结构图, M_1 、 M_2 、 M_3 三块反射镜组成了整个光学系统, 其中 R_1 、 R_2 、 R_3 分别为 M_1 、 M_2 、 M_3 的半径, d_1 为 M_1 到 M_2 的距离, d_2 为 M_2 到 M_3 的距离, k_1 、 k_2 、 k_3 分别为三个反射面的二次非球面系数^[10]。

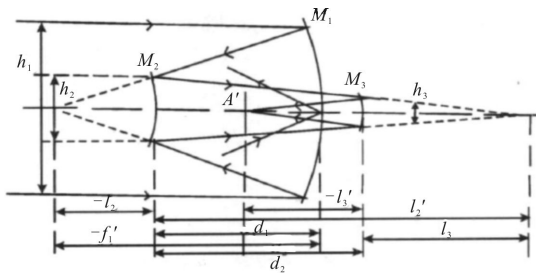


图 1 三反系统初始结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of three mirror initial structure

h_1 、 h_2 、 h_3 分别为 M_1 、 M_2 、 M_3 的口径, f' 为 M_1 的焦距, l_2 为 M_2 的中心点到 M_1 焦点的距离, l_2' 为 M_2 的中心点到 M_1 和 M_2 两镜焦点的距离, l_3 为 M_3 的中心点到 M_1 和 M_2 两镜焦点的距离, l_3' 为 M_3 中心点到系统焦点的距离。

M_2 对 M_1 的遮拦比为:

$$\alpha_1 = \frac{l_2}{f_1'} \approx \frac{h_2}{h_1} \quad (1)$$

M_3 对 M_2 的遮拦比为:

$$\alpha_2 = \frac{l_3}{f_2'} \approx \frac{h_3}{h_2} \quad (2)$$

M_2 的放大率为:

$$\beta_1 = \frac{l_2'}{l_2} \quad (3)$$

M_3 的放大率为:

$$\beta_2 = \frac{l_3'}{l_3} \quad (4)$$

通过高斯成像公式 $\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{R}$, 可以得到初

始光学系统相关结构参数的求解公式:

$$r_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2} f' \quad (5)$$

$$r_2 = \frac{2\alpha_1}{(1 + \beta_1)\beta_2} f' \quad (6)$$

$$r_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{1 + \beta_2} f' \quad (7)$$

$$d_1 = \frac{(1 - \alpha_1)}{\beta_1 \beta_2} f' \quad (8)$$

$$d_2 = \frac{\alpha_1(1 - \alpha_2)}{\beta_2} f' \quad (9)$$

当三反光学系统是一次成像而没有中间像时, M_3 对 M_2 的遮拦比 α_2 与 M_2 的放大率 β_1 和 M_3 的放大率 β_2 之间存在一定的对应关系^[4], 如下所示:

$$0 < \alpha_1 < 1, f' < 0$$

$$\text{当 } \alpha_2 > 1 \text{ 时, } \beta_1 > 0, \beta_2 > 0,$$

$$\text{当 } 0 < \alpha_2 < 1 \text{ 时, } \beta_1 < 0, \beta_2 < 0$$

同时, 孔径光阑放置在 M_1 、 M_2 以及 M_3 三个不同的位置上, 所求解出来的光学系统初始结构的参数也会不同^[4]。当将孔径光阑放置在次镜上时, 可以得到:

$$y_1 = \frac{(1 - \alpha_1)}{\alpha_1 \beta_1 \beta_2} \quad (10)$$

$$y_2 = 0 \quad (11)$$

$$y_3 = \frac{(1 - \alpha_2)}{\beta_2} \quad (12)$$

式中: y 为主光线与镜面上交点距离光轴的距离。在图 1 所表示的反射系统中: $n_1 = n_2' = n_3 = 1, n_1' = n_2 = n_3' = -1$, 可以归一化系统参数, 令 $h_1 = 1, f' = 1$, 半视场角 $w = -1$, 由于物体被放在无穷远处, 可以将入射角设为 0, 即 $u_1 = 0$ 。

根据系统要求:

$$S_I = \sum h \left[\frac{\Delta u}{\Delta(1/n)} \right]^2 + \sum h^4 \frac{k}{R^3} \Delta n = 0 \quad (13)$$

$$S_{II} = \sum y \left[\frac{\Delta u}{\Delta(1/n)} \right]^2 - J \sum \frac{\Delta u}{\Delta(1/n)} \frac{\Delta u}{n} + \sum h^3 y \frac{k}{R^3} \Delta n = 0 \quad (14)$$

$$S_{IV} = \sum \frac{\Delta(nu)}{nn'h} = 0 \quad (15)$$

可求解出 M_1 、 M_2 、 M_3 三个镜子的二次非球面系数 k_1 、 k_2 、 k_3 的数值大小, 从而确定整个系统的初始结构的所有参数^[10]。

3 光学系统设计

3.1 可见光系统设计

可见光系统选择的结构是最为常见的共轴三反系统。这里取 $\alpha_1 = 0.1, \alpha_2 = 8.2, \beta_1 = 4.9, \beta_2 = 0.35, f_1' = -9000$, 孔径光阑的位置被放置在次镜上, 经过公式(1)~(15)进行计算, 可以得到可见光光学系统的初始结构参数, 具体参数如表 2 所示。

表 2 可见光学系统初始结构参数

Tab.2 Initial structure parameters of visible optical system

Mirror	Radius/mm	Distance/mm	Conic
PM	-13 898	-3 877	-1.57
SM	-5 102	3 977	-1.004 8
TM	-7 955	-3 977	-0.001 7

在光学设计软件中输入可见光的波长 400~900 nm, 视场 $5.1^\circ \times 1^\circ$ 。确定可见光系统的焦距等特定约束条件后, 对反射镜的半径、距离以及二次项系数进行优化, 可得到可见光光学系统最终的结构参数, 优化后的结构参数如表 3 所示。

表 3 优化后的系统结构参数

Tab.3 Structure parameters of optical system after optimization

Mirror	Radius/mm	Distance/mm	Conic
PM	-14 548	-3 888	-1.58
SM	-5 421	4 693	-0.70
TM	-8 614	-5 633	0.11

从表 3 中可以看出, 主镜为双曲面, 次镜和三镜为椭圆面。

3.2 红外系统设计

红外光学系统使用两个三反系统进行成像, 后置三反系统的入瞳与前置三反系统的出瞳位置重合。红外光学系统的总焦距大小为 2 025 mm, 所以通过计算可以得到后置三反光学系统的放大率为 $\beta = |2\ 025/9\ 000| = 0.225$ 。假设 $\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 2.13, \beta_1 = 0.358$, 得到 $\beta_2 = 0.627$, 根据视场选择后置红外三反系统的焦距 $f_2' = -4\ 100$, 可以计算出后置三反系统的初始结构参数如表 4 所示。

表 4 红外光学系统初始结构参数

Tab.4 Initial structure parameters of infrared optical system

Mirror	Radius/mm	Distance/mm
PM	-36 531	-14 612
SM	-1 926	1 478
TM	-2 147	-1 746

通过对系统的焦距进行约束, 对镜片之间距离、镜片的半径及二次非球面系数进行优化。其中为了降低系统的长度和质量, 增加了平面反射镜 5 进行光路的折叠, 减小整个光学系统的尺寸。优化后的后置反射系统的结构参数如表 5 所示, 整体光学系统结构如图 2 所示。

表 5 后置光学系统结构参数

Tab.5 Structure parameters of rear optical system

Mirror	Radius/mm	Distance /mm	Conic	Decenter
4th mirror	10 536	1 525	-1.54	-2 445
5th mirror	Infinite	-1 926	-	-
6th mirror	-2 613	2 790	1.5	249.9
7th mirror	-3 257	-2 955	0.51	46.89

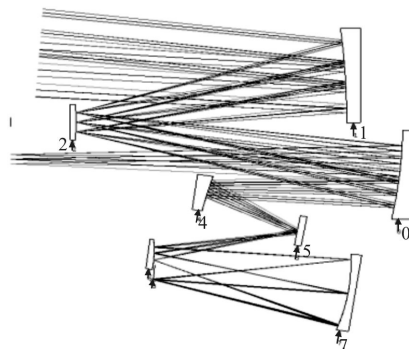


图 2 优化后的整体光学系统结构

Fig.2 Entire optical system structure after optimization

4 光学系统评价

为了评价设计的光学系统成像质量, 选取了图 3 中所表示的视场点, 其中上侧矩形视场为红外光视场, 下侧矩形视场为可见光视场。

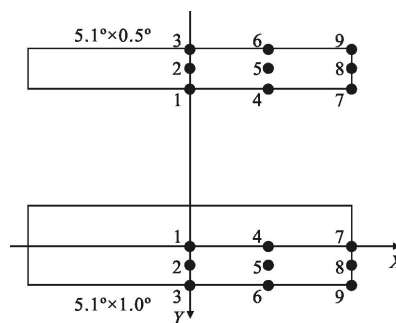


图 3 视场选择示意图

Fig.3 Schematic diagram of field of view

这里选择点列图、传递函数曲线和畸变网格来评价光学系统的成像质量。

由图 4 和图 5 的点列图可以看出,所选择各点视场的光线经过可见光光学系统和红外光学系统后形成的像点的半径均方根值均小于艾里斑的半径。

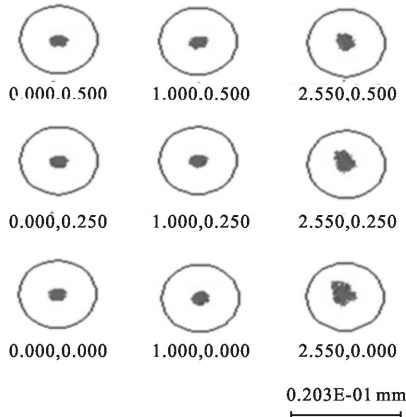


图 4 点列图(可见光)

Fig.4 Spot diagram (visible light)

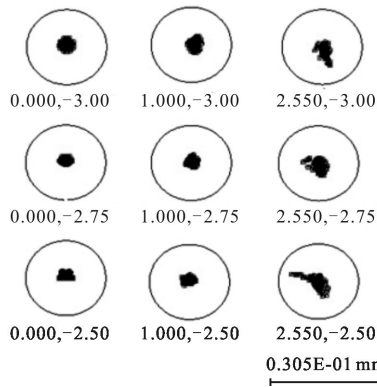


图 5 点列图(红外光)

Fig.5 Spot diagram(infrared light)

图 6 的 MTF 曲线表明,衍射极限在 50 lp/mm 时为 0.462, 可见光视场 (0, 0), (0, 0.25), (0, 0.5), (1, 0), (1, 0.25), (1, 0.5), (2.55, 0), (2.55, 0.25), (2.55, 1)在 50 lp/mm 时分别达到 0.458, 0.459, 0.459, 0.458, 0.458, 0.459, 0.425, 0.455, 0.458, 接近衍射极限;图 7 的 MTF 曲线说明衍射极限在 25 lp/mm 时为 0.665, 红外光视场 (0, -2.5), (0, -2.75), (0, -3), (1, -2.5), (1, -2.75), (1, -3), (2.55, -2.5), (2.55, -2.75), (2.55, -3) 在 25 lp/mm 时分别达到 0.647, 0.648, 0.645, 0.648, 0.648, 0.647, 0.646, 0.649, 0.648, 接近衍射

极限。图 8 表明可见光系统的畸变很小,而图 9 中的畸变网格表明可见光系统的畸变控制较好,红外光系统的边缘视场有畸变,但畸变量不大,成像质量良好。

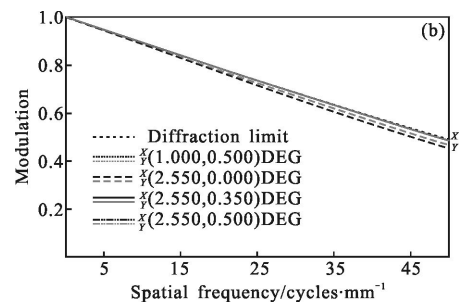
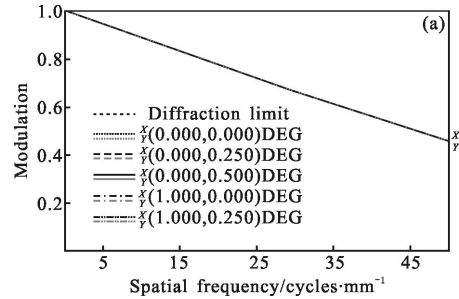


图 6 MTF 曲线图(可见光)

Fig.6 MTF curve diagram(visible light)

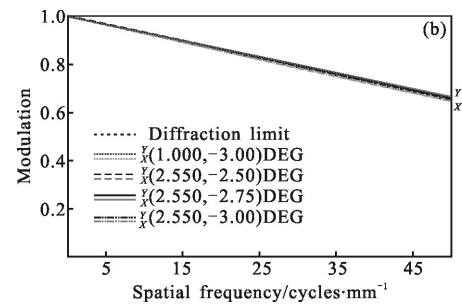
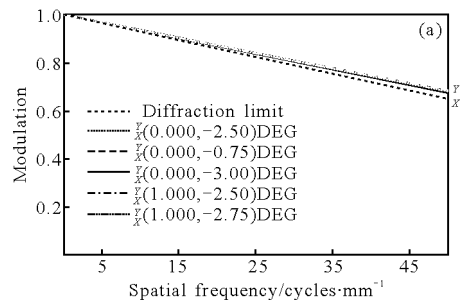


图 7 MTF 曲线图(红外光)

Fig.7 MTF curve diagram (infrared light)

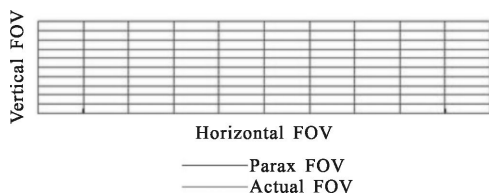


图 8 畸变图(可见光)

Fig.8 Distortion diagram (visible light)

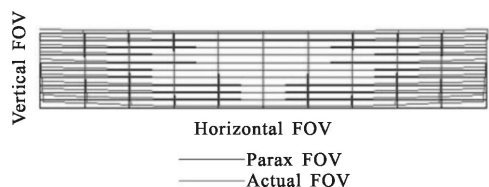


图 9 畸变图(红外光)

Fig.9 Distortion diagram (infrared light)

5 结 论

对可见光与红外光成像特点进行分析, 结合两种光学系统特点设计了一款大视场可见红外一体化光学系统, 实现了光学系统对地进行全天时、大幅宽观测, 有效观测范围达到 60 km 以上。对视场进行偏视场设计, 光学系统实现了双光路、双波段、双视场成像观测, 避免了分光元件的使用, 提高了光学能量利用率。可见光学系统采用三反系统进行设计, 红外光学系统使用两个三反系统设计, 后置光学系统的入瞳与前置光学系统的出瞳的位置相同。进行优化得到的光学系统, 通过对点列图、传递函数和畸变网格进行分析, 成像质量良好。可见光系统的 MTF 在 50 lp/mm 时达到 0.45 以上, 红外系统的 MTF 在 25 lp/mm 时达到 0.65 以上, 成像质量均达到衍射极限, 可以用于对探测目标进行全天时的观测成像。

参考文献:

[1] Wang Haitao, Geng Anbing. Unified infrared imaging optical system of dual spectral[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 489-492. (in Chinese)
王海涛, 耿安兵. 一体化红外双波段成像光学系统 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 489-492.

[2] Bigwood C, Wood A. Two-element lenses for military

applications[J]. *Opt Eng*, 2011, 50(12): 121705.

[3] Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 32-35. (in Chinese)
潘君华. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 32-35.

[4] Cui Enkun. The design of visible and infrared multi-band optical system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optical, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
崔恩坤. 灵巧型可见光/红外多波段共口径光学系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.

[5] 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. (in Chinese)
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.

[6] Yu Linyao, Wei Qun, Zhang Tianyi, et al. Design of long focal catadioptric optical system for multi-guided system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 235-236. (in Chinese)
虞林瑶, 魏群, 张天翼, 等. 中波红外长焦距折反光学系统设计[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 235-236.

[7] Tian Tiejun, Wang Hong. Optical zoom system with long focal length and large aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2371-2373. (in Chinese)
田铁印, 王红. 长焦距大口径连续变焦光学系统 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2371-2373.

[8] Zhang Bao, Cui Enkui, Hong Yongfeng. Infrared MWIR/LWIR dual-FOV common-path optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 396-399. (in Chinese)
张葆, 崔恩坤, 洪永丰. 红外双波段双视场共光路光学系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 396-399.

[9] Gong Dun. Review on mapping space remote sensor optical system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 717-720. (in Chinese)
巩盾. 空间遥感测绘光学系统研究综述 [J]. 中国光学, 2015, 8(5): 717-720.

[10] Fan Xuewu, Ma Zhen, Chen Rongli, et al. Study on three-mirror reflective optic system having one image surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8): 1001-1003. (in Chinese)
樊学武, 马臻, 陈荣利, 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.