

文章编号: 0253-2239(2010)10-3027-07

实现两档长焦距的空间遥感光学系统设计

贺应红 马 臻 赵葆常 常凌颖 陈立武 马小龙 易红伟

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要 设计了一个无运动部件、结构紧凑并实现两档焦距的折反射混合式空间光学系统。长、短焦前组共用一个 Ritchey-Chrétien(R-C)反射系统,使用分光棱镜对光路分光,由两路后组透射系统对前组进行缩放实现两档焦距。长焦焦距为 4700 mm, F 数为 13.4,短焦焦距为 2350 mm, F 数为 6.7。在光机设计上,还考虑了对温度变化敏感的间隔使用热膨胀系数小的材料;为了减小反射镜面形变化,采用了热性能好的材料作为反射镜基底,并对相机在空间环境下温度变化在 (19 ± 3) °C 范围内进行了像质分析,设计结果能满足使用要求。

关键词 光学设计;空间遥感;两档焦距;分光器;温度影响

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103010.3027

Optical System Design of Space Sensor with Two Long Focal Length Lens

He Yinghong Ma Zhen Zhao Baochang Chang Lingying Chen Liwu

Ma Xiaolong Yi Hongwei

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract A compact space optical system without moving parts which can get two focal lengths is designed. Ritchey-Chrétien (R-C) mirror is common for long-focus system and short-focus system. A splitter prism is used for splitting the light into two beams relayed by transmitting optical system. The focal length is 4700 mm and F number is 13.4 for the long-focus system, and the focal length is 2350 mm and F number is 6.7 for the short-focus system. Some measure is taken to make sure the less degradation of MTF for thermal distortion, such as a kind of material with small thermal expansion using correction between the primer mirror and the second mirror and material with good thermal property as mirror substrate for reduce surface distortion. The modulation transfer function (MTF) of optical system in condition of (19 ± 3) °C is analyzed, which shows a good result for user's requirement.

Key words optical design; space remote sensor; two focal lengths for an optical system; splitter prism; temperature effect

1 引 言

随着光学技术和电子技术的发展,对空间光学遥感器的技术指标要求也越来越高,大视场、高分辨率的光学遥感相机在空间光学中的需求日益增强^[1]。在地面上为了实现大视场、高分辨率的技术指标,常常设计一个变焦距的镜头,当需要扩大视场搜索目标时,使用短焦距,而需要对确定的目标高分辨率成像时,则使用长焦距^[2~4]。在空间光学里,为了提高空间光学遥感器的可靠性,需要尽量减少运动部件,同时满足空间设备要求体积小、重量轻和功

耗小的特点。本文根据某一空间遥感器技术指标要求设计了一个实现两档焦距的折反射混合光路系统。该光学系统结构紧凑、无运动部件,其长焦、短焦光路共用 R-C 反射系统,使用分光棱镜将反射光束分为两路后,再分别由两路透射光学系统实现两种不同焦距。

2 光学系统设计

2.1 光学设计指标

光学系统所要求的两档焦距分别为 2350 mm

收稿日期: 2009-12-16; 收到修改稿日期: 2010-01-14

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724006)资助课题。

作者简介: 贺应红(1977—),女,硕士,工程师,主要从事空间光学系统设计方面的研究。E-mail: heyingshong@opt.ac.cn

和 4700 mm, 对应的 F 数分别为 6.5, 13, 视场角为 $1.2^\circ \times 0.6^\circ, 0.6^\circ \times 0.3^\circ$, 光谱范围为 450~900 nm, 探测器像元大小为 $13 \mu\text{m}$ 。

2.2 光学设计

2.2.1 光学结构选型

空间遥感相机的关键技术是设备体积小、结构紧凑并最终获得质量好的成像, 而解决其结构紧凑与光学成像质量的矛盾是设计成败的关键之一。对于长焦距宽谱段光学系统, 使用全透射式光学系统存在大的二级光谱, 它与系统的焦距成正比, 并且结构很长, 因此本系统不适合使用全透射式光学结构。通常对于这种大视场、长焦距和宽谱段的光学系统, 性能和可实现性较好的形式有共轴三反射镜消像散结构、离轴三反射镜消像散结构、施密特型望远镜、马克苏托夫型和 R-C 系统改正型结构等^[5~8]。对于全反射系统, 由于没有透射光学元件, 因此没有色差和二级光谱, 并且具有结构紧凑的特点。但是这种光路如果要实现两个焦距, 需要做两套相机来满足各自光学指标。而施密特光学系统和马克苏托夫型光学系统则需要使用大口径的透射光学玻璃。R-C 改正型光学系统的反射部分承担了全系统的光焦度, 后组校正镜对系统光焦度贡献非常小, 主要校正视场像差, 通常由要两、三块透镜组成。为了满足空间相机结构紧凑、重量轻、无运动部件的要求, 设计一个折反射混合的光学结构型式, 前组使用 R-C 反射结构作为长、短焦共用, 利用分光棱镜将光路分为两路, 再后接两组透射式系统实现两组长、短焦距, 并分别对两组长、短焦系统校正像差。实现形式有下列两种结构形式, 分别如图 1 和图 2 所示。

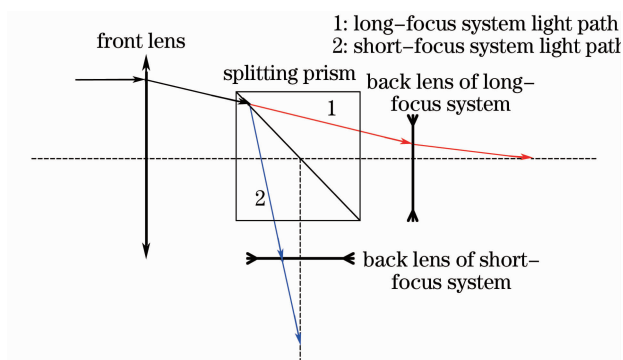


图 1 中间无一次像面的光学原理图

Fig. 1 Imaging principle of optical system without internal image

在图 1 中, 中间无一次像面, 两后组透射系统是负光焦度, 且主面在前组的焦点前, 相对后组而言, 它是虚物成实像。这种系统特点是全系统光学像方

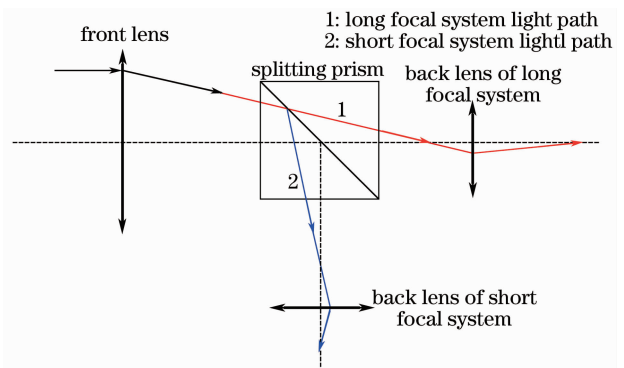


图 2 中间成一次像面光学原理图

Fig. 2 Imaging principle of optical system with a internal image

主面前移, 有利于减小结构尺寸。图 2 结构中, 中间有一次像面, 后组采用正光焦度透射系统, 主面放置在前组的焦点后, 对后组而言, 是实物成实像。这种结构特点是因为有一次像面, 可以在像面上设置视场光阑, 有利于杂光抑止, 缺点是结构筒长很长。由于空间相机对结构尺寸要求严, 故选择图 1 方案。

2.2.2 前组光焦度分配

设计过程中, 首先需要对系统进行光焦度分配。前组承担了较大的光焦度, 两个反射镜都选择易加工的二次双曲面, 以校正孔径像差为主, 视场像差主要由后组校正。前组光焦度的合理分配有利于后组透射系统的设计。如图 3 所示, 为了减轻透射系统的设计难度, 根据像差公式, 应尽量减小后组的孔径偏角:

$$U_p = D/(2f'_{\text{front}}), \quad (1)$$

$$U'_p = D/(2f'_{\text{system}}), \quad (2)$$

$$U_p - U'_p = D/(2f'_{\text{front}}) - D/(2f'_{\text{system}}), \quad (3)$$

式中 D 为全系统的入瞳直径, f'_{front} 为前组反射系统的焦距, f'_{system} 为全系统的焦距, U_p 为入射光到后组的孔径角, U'_p 为出射光孔径角。

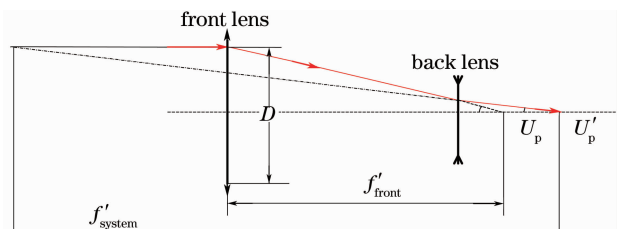


图 3 光学成像简图

Fig. 3 Drawing of optical imaging

由(3)式可知, 对于长、短焦系统的焦距是确定的, 为了减小孔径偏角, 则尽量使前组焦距 f'_{front} 增大, 考虑短焦焦距为 2350 mm, 其后组是负光焦度, 因此前组焦距确定为短焦系统的焦距。因此, 对于

短焦距系统来说,后组透射部分对短焦系统几乎无光焦度贡献,主要作用是平衡像差,对全系统不放大,其焦距值为 -397 mm 。而长焦距系统,后组透射部分是对前组放大了两倍,并和前组、分光棱镜一起校正色差,其焦距为 -150 mm 。

2.2.3 后组透射系统玻璃选配

后组光学系统由于焦距长,光谱范围广,因此消二级光谱是后组透射系统的重点。二级光谱是高级色差的一种,它是由于光学系统工作波段变大所致,它与相对孔径的平方和焦距的一次方成正比,其几何度量是对两端色光校正色差后与主色光之间的位置差。

对于宽波段的光学系统在满足光焦度要求的前提下校正位置色差的条件为

$$C_1 = \sum_{i=1}^n h_i^2 (\phi_i / \nu_i) = 0. \quad (4)$$

同时校正二级光谱的条件为

$$\sum_{i=1}^n h_i^2 (\phi_i / \nu_i) P_i = 0. \quad (5)$$

消二级光谱通常选择三种玻璃,通过合适的光焦度分配达到同时校正色差和二级光谱。本文消二级光谱的方法是选取两种玻璃材料 LAK2 和 TF3,它们在光学系统工作波段范围内具有很接近的部分色散系数 P_i ,同时又具有一定的阿贝数之差,系统中的光焦度分配满足消色差的条件下,二级光谱自动校正到最小值^[9,10]。

部分色散系数的公式为

$$P(\lambda) = \frac{n_{450} - n_{\lambda}}{n_{450} - n_{900}}. \quad (6)$$

从表 1 可以看出,选取 LAK2 和 TF3 两种光学材料,在各个波长上的部分色散系数非常接近,所以系统对于在 $450 \sim 900\text{ nm}$ 二条谱线校正色差后,二级光谱一定非常小。

表 1 LAK2 与 TF3 的部分色散系数之差值

Table 1 Difference of partial dispersion coefficient of LAK2 and TF3

Wavelength λ / nm	Difference of partial dispersion coefficient / 10^{-3}
480	3.37
550	3.7
650	1.96
750	0.31
850	0.14

2.2.4 光学系统的设计结果

最终设计的结构如图 4 所示。光学系统最大口径即为主镜的外径 361.5 mm ,遮拦比为 0.3 ,系统总长为 740 mm 。系统中共用了两个胶合件,分别是分光棱镜和长焦后组的一组透镜,其中分光棱镜边长为 65 mm ,胶合透镜的外径为 45 mm 。对于这样尺寸的胶合件,在系统处于一定的温控范围,不存在脱胶风险。

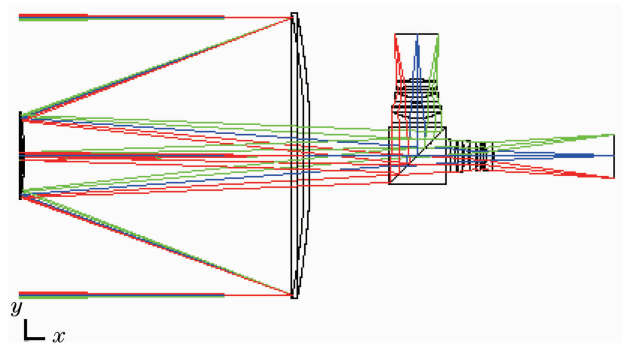


图 4 光学系统光路图

Fig. 4 Layout of optical system

2.3 光学系统的像质评价

对于成像系统来说,传递函数(MTF)是主要的评价手段,而畸变则反映成像系统对目标的变形程度。光学系统的短焦、长焦的传递函数曲线及像散、畸变曲线如图 5 和图 6 所示。

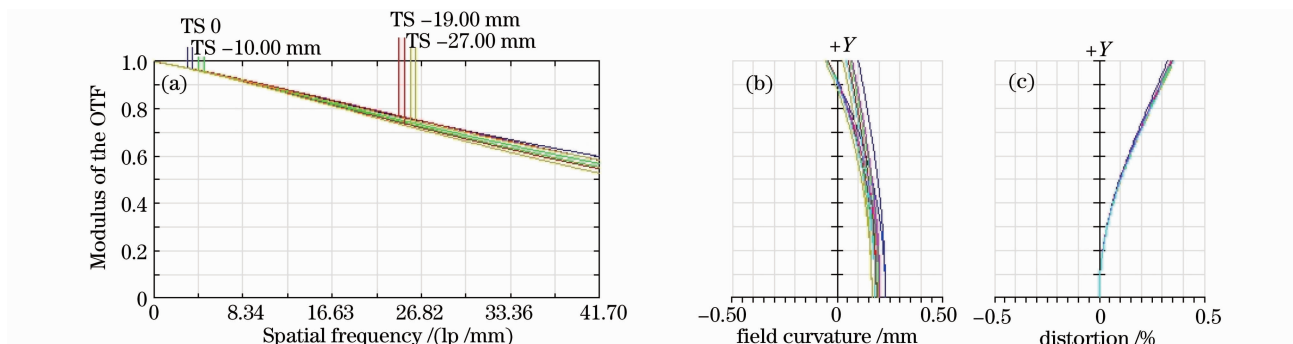


图 5 短焦系统的传递函数及像散、畸变曲线。(a)传递函数;(b)像散及(c)畸变曲线

Fig. 5 MTF and astigmatic and distortion curve of short-focus system. (a) MTF; (b) astigmatic and (c) distortion curve

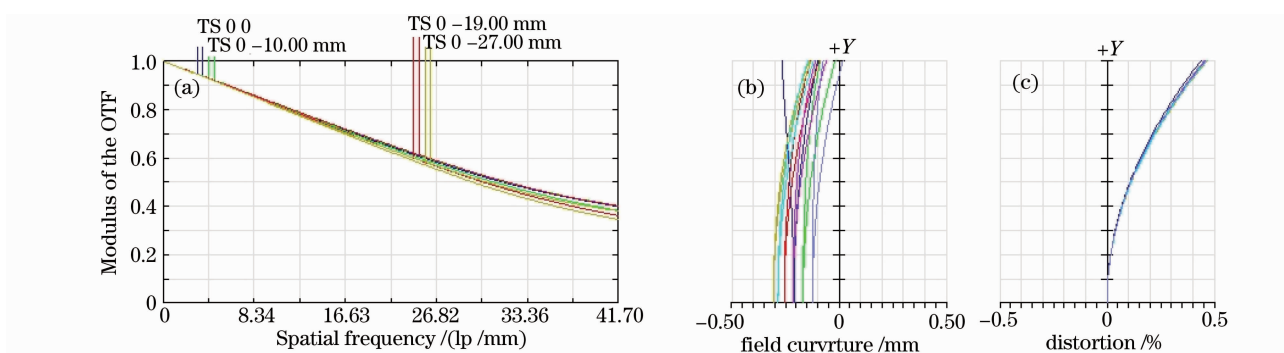


图 6 长焦系统的传递函数、像散和畸变曲线。(a)传递函数;(b)像散及(c)畸变曲线

Fig. 6 MTF and astigmatic and distort curve of long-focus system. (a) MTF; (b) astigmatic and (c) distortion curve

从传递函数曲线可以看出,短焦系统的视场平均传递函数为 0.65,长焦系统的各视场的传递函数接近衍射极限,平均传递函数为 0.38,考虑到加工和装配因素,传递函数降为理论传递函数的 0.8,探测器的 MTF 为 0.5,最终短焦系统的视场平均函数为 0.26,长焦系统的视场平均函数能达到 0.15。从畸变曲线可以看出,最大视场的畸变均小于 0.5%。

3 光学系统温度变化对成像质量的影响分析

温度变化对空间相机成像质量影响是空间任务成败的关键。对于大口径、高分辨率的光学系统,对温度变化非常敏感。一方面,主结构和光学元件的温度变化使光学系统的光学间隔发生变化,光学主轴发生倾斜;另一方面,光学元件内部的温度变化使得光学元件的面形发生变化,透镜内的温度变化还将引起折射率的改变^[11,12]。在光学系统中,温度变化影响的参量主要包括光学间隔、半径和光学折射率等。假设温度范围内材料的膨胀系数为线形,则各个间隔的热变化量按照下式计算:

间隔尺寸 L 的变化量 ΔL 为

$$\Delta L = L \times \sigma_m, \quad (7)$$

材料折射率 n 的变化量 Δn 为

$$\Delta n = \frac{dn}{dT} \Delta T, \quad (8)$$

曲率半径 R 的变化量 ΔR 为

$$\Delta R = R \times \sigma_m, \quad (9)$$

式中 σ_m 为间隔或玻璃材料的线膨胀系数, dn/dT 为玻璃材料的温度折射率系数。

设计的光学系统中,由于焦距较长,为了使结构紧凑,主次镜的间隔设计较短,使得次镜的放大率较大,导致主次镜的距离变化对系统成像质量的影响

较大。为了减小温度变化对主次镜间隔的影响,控制措施是选用了膨胀系数较小的碳纤维材料作为主、次镜的连接。而为了尽量减小非球面的面形变化,采用了热性能优良的材料来制作反射镜。对于后组透射系统,折射材料的热温度系数较差,不过因温度变化对系统的影响要小于主次镜的间隔变化和主次镜的面形变化的影响,在温度变化范围不大的情况下,对整个系统的像质影响较小,当温度变化范围较大的时候,对像质的影响较大。由于空间相机都有温控系统,温度变化范围一般不会很大。对相机在温控变化范围内,考虑了相机光机结构变形包括结构热变形导致的光学元件刚性位移以及光学元件在温度环境改变时的参数变化,包括光学间隔、半径和光学折射率等的变化,在光学软件 Zemax 里进行了温度分析。

3.1 短焦距系统随温度变化像质分析

短焦距系统中的温度变化对系统的传递函数 MTF 影响如图 7 所示。

各个温度下 4 个视场的系统光学 MTF 平均值如表 2 所示,尼奎斯特频率为 41.7 lp/mm。

相机短焦系统焦距及后截距随温度变化所引起的变化如图 8 所示。

表 2 短焦系统在不同温度下的 MTF

Table 2 Average MTF of short-focus system at different temperature

Temperature / °C	Average of MTF
16	0.51
18	0.55
20	0.58
22	0.575

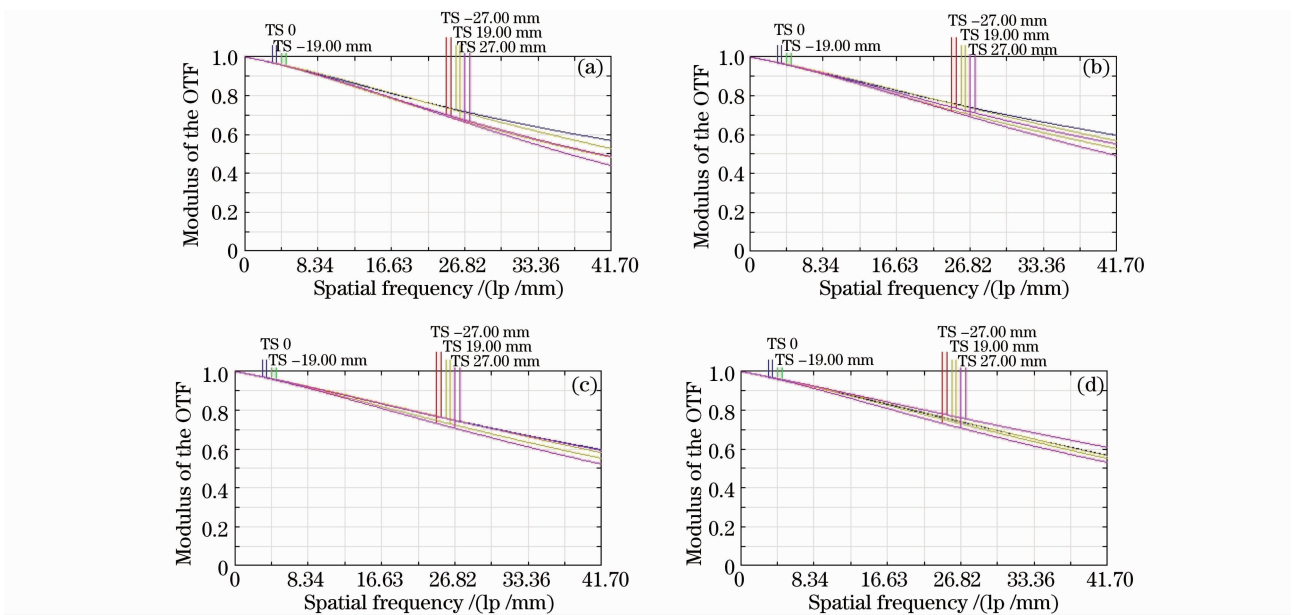


图 7 短焦系统在各温度下的 MTF。(a) 16 °C；(b) 18 °C；(c) 20 °C；(d) 22 °C

Fig. 7 MTF of short-focus system at different temperature. (a) 16 °C；(b) 18 °C；(c) 20 °C；(d) 22 °C

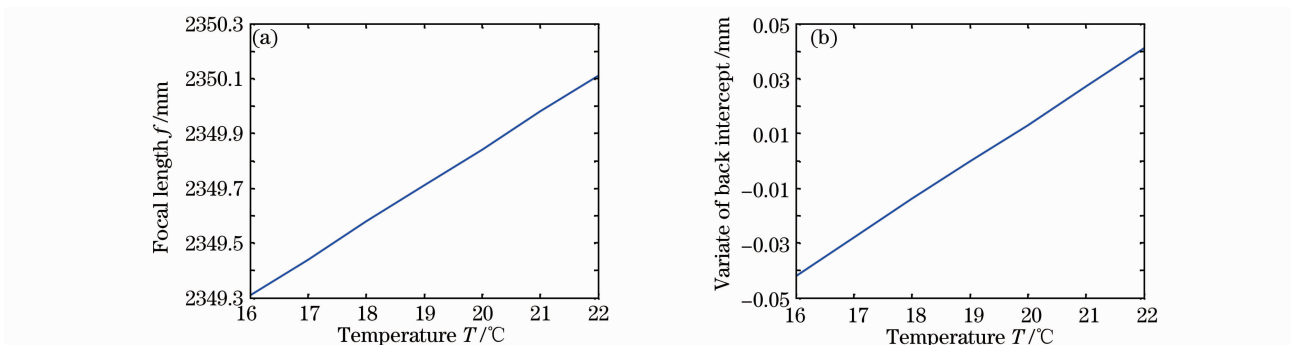


图 8 短焦系统焦距(a)和后截距的变化量(b)随温度的变化情况

Fig. 8 Focal length (a) and variate of back intercept (b) at different temperature of short-focus system

从 MTF 曲线可以看出，中心温度的成像质量最好，两端温度的成像质量逐渐变差，但是在整个 $(19 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ 温度环境下成像质量变化极小。

相机焦距和光学系统后截距在工作温度范围内随温度线性变化，其中焦距变化幅度约为 $\pm 0.02\%$ ，光学系统后截距变化约为 $\pm 0.042 \text{ mm}$ ，在焦深范围内。

综上所述，可以认为在正常热控情况下相机的成像能力不受温度环境的影响。

3.2 长焦距系统随温度变化像质分析

长焦距系统中的温度变化对系统的传递函数 MTF 影响如图 9 所示。

各个温度下 4 个视场的系统光学 MTF 平均值

如表 3 所示，尼奎斯特频率为 41.7 lp/mm 。

相机长焦系统焦距及后截距随温度变化所引起的变化如图 10 所示。

表 3 长焦系统在不同温度下的 MTF 平均值
Table 3 Average MTF of long-focus system at different temperature

Temperature / °C	Average of MTF
16	0.33
18	0.35
20	0.38
22	0.33

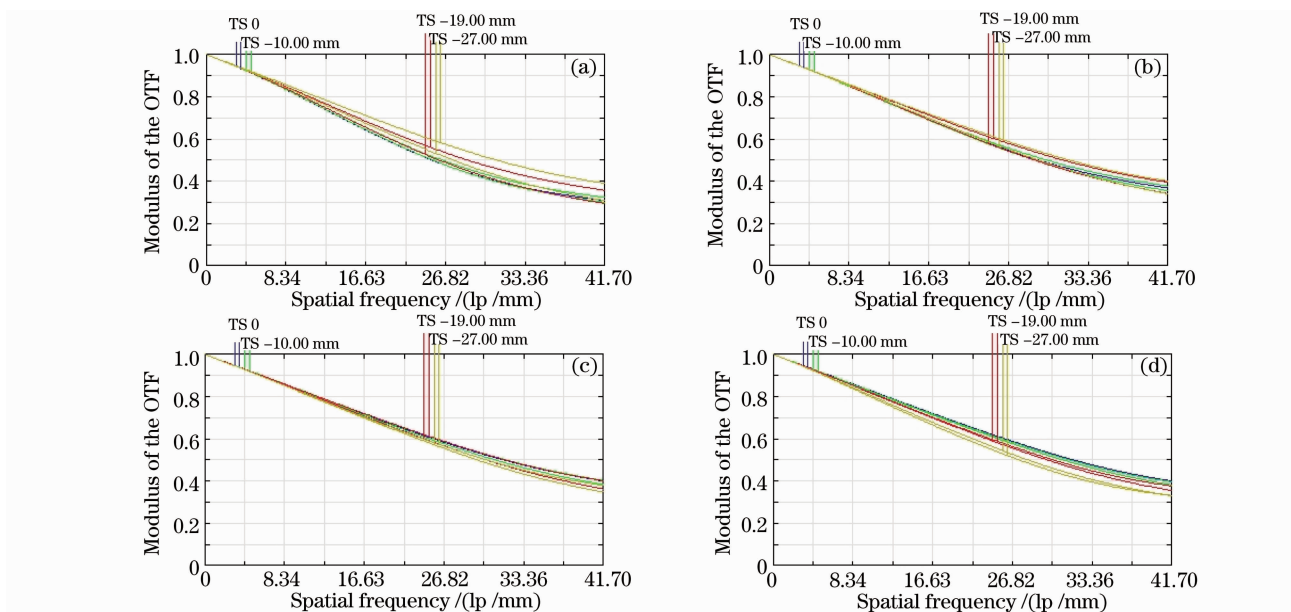


图 9 长焦系统在各温度下的 MTF。(a) 16 °C；(b) 18 °C；(c) 20 °C；(d) 22 °C

Fig. 9 MTF of long-focus system at different temperature. (a) 16 °C；(b) 18 °C；(c) 20 °C；(d) 22 °C

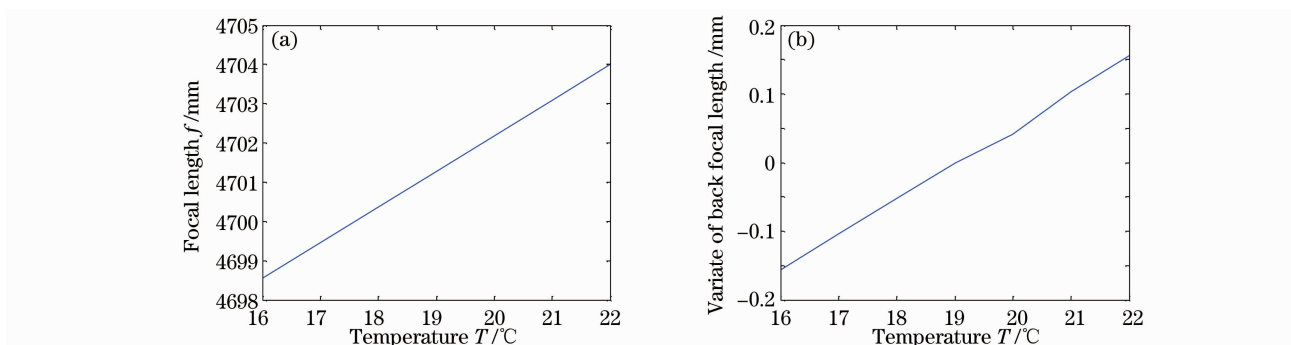


图 10 长焦系统焦距(a)和后截距变化量(b)随温度的变化情况

Fig. 10 Focal length (a) and variate of back focal length (b) at different temperature of long-focus system

中心温度的成像质量最好,两端温度的成像质量逐渐变差,但在整个 $(19 \pm 3)^\circ\text{C}$ 温度范围内对成像质量变化极小。

相机焦距和光学系统后截距在工作温度范围内随温度线性变化,其中焦距变化幅度约为 $\pm 0.06\%$,光学系统后截距变化约为 $\pm 0.16\text{ mm}$ 。

综上所述,可以认为在正常热控情况下相机的成像能力不受温度环境的影响。

4 结 论

设计的一个光学系统实现两档焦距的折反射混合式空间遥感光学系统,长、短焦前组共用一个 R-C 反射系统,利用棱镜分光路,再分别由两路后组透射光学系统对前组缩放实现两个焦距。该系统可以利用短焦来扩大视场范围搜索目标,目标锁定后使用

长焦对目标高分辨率成像,特点是无运动部件,结构紧凑,可适用于空间搜索、跟踪和侦察等设备。

参 考 文 献

- Jiang Jinshan *et al.*. Space Science and Application[M]. Beijing: Science Publication, 2001
姜景山 等. 空间科学与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- Tao Chuankan. Zoom Lens Design [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988
陶纯堪. 变焦距光学系统设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988
- Xu Liang, Zhang Guoyu, Gao Yujun *et al.*. Design of $8 \times$ uncooled thermal infrared hybrid refractive-diffractive continuous-zoom lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 478~481
徐 亮, 张国玉, 高玉军 等. 8 倍非制冷型红外折/衍射连续变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 478~481
- Wang Chunyan, Wang Zhijian, Zhou Qingcai. Solving the cam curve of the compensating group about zoom lens using dynamic optical theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 891~894
王春艳, 王志坚, 周庆才. 应用动态光学理论求解变焦光学系统

- 补偿组凸轮廓线[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 891~894
- 5 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of The Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: SuZhou University Press, 2004
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
- 6 M. Lampton, M. Sholl. Comparison of on-axis three-mirror-anastigmat telescopes[C]. SPIE, 2007, **6687**: 66870S
- 7 Liang Minyong, Liao Ningfang, Feng Jie *et al.*. Design and optimization of three cylindrical reflectors optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1359~1363
梁敏勇, 廖宁放, 冯洁等. 三反射式柱面光学系统设计及优化[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1359~1363
- 8 Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Research on long focal length on-axis TMA system for high resolution remote sensing [C]. SPIE, 2007, **6722**: 67220R
- 9 Li Yuyao, Tang Yong, Lin Zhaoheng *et al.*. Design of apochromatism objective lens of aerial camera based on large frame array CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3183~3185
李玉瑶, 唐勇, 林昭珩等. 基于大面阵 CCD 的复消色差航空相机物镜设计[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3183~3185
- 10 Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Chen Liwu *et al.*. Design of the wide bands Fourier lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 468~473
赵葆常, 杨建峰, 陈立武等. 干涉成像光谱仪中宽谱段傅氏光学系统设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 468~473
- 11 Wu Qingwen, Lu Zesheng, Lu 'e *et al.*. Thermal analysis for a space remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(2): 205~208
吴清文, 卢泽生, 卢锷等. 空间光学遥感器热分析 [J]. 光学精密工程, 2002, **10**(2): 205~208
- 12 Chen Rongli, Geng Liyin, Ma Zhen *et al.*. Thermal analysis and design for high resolution space telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 154~157
陈荣利, 耿利寅, 马臻等. 空间相机的热分析和热设计[J]. 光子学报, 2006, **35**(1): 154~157