

红外双波段光学系统被动式消热差设计

江 伦, 胡 源, 董科研, 安 岩, 王 超, 佟首峰

(长春理工大学 空地激光通信国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022)

摘 要: 为提高红外光学系统的目标探测识别能力, 增强其温度适应能力, 在分析红外材料在中波和长波红外波段的色差与热差特性的基础上, 根据系统光焦度分配、双波段轴向消色差和双波段消热差等要求, 利用红外色差图合理选择光学材料组合, 设计了一款中波和长波红外双波段消热差系统, 系统采用非制冷探测器, 工作波段为 3~5 μm 和 8~12 μm , 由 4 片透镜组成, 焦距为 50 mm, 相对空间为 1:1.25, 全视场角为 14°, 总长 67.9 mm。设计结果表明: 在温度范围 -50~60 °C 范围内, 在空间频率为 17 lp/mm 处, 系统在中波和长波波段的 MTF 值均大于 0.4, 表明系统有较强的温度适应性。

关键词: 被动消热差; 红外双波段; 光学设计

中图分类号: TH74 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)11-3353-05

Passive athermal design of dual-band infrared optical system

Jiang Lun, Hu Yuan, Dong Keyan, An Yan, Wang Chao, Tong Shoufeng

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aero and Ground Laser Communication Technology,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to improve the target detection and recognition ability and enhance the environment adaptability of infrared optical system, thermal and chromatic properties of infrared optical materials in MLIR and LWIR were analyzed, according to the requirements of optical power distribution, axial achromatic aberration and athermal aberration in the dual infrared band, properly lens materials were choosed based on the infrared chromatic diagram. And a dual-band infrared athermal optical system was designed. The system based on no cooled staring detector, the wavelength spectrum was 3~5 μm and 8~12 μm , The system consisted of four lenses, the effective focal length was 50 mm, the relative aperture was 1:1.25, the field view was 14° and the total optical focal length was just 67.9 mm. The result shows that between -50~60 °C and at the modulation transform function of 17 lp/mm is greater than 0.4 both in MWIR and LWIR, which prove that the system can work correctly at a large temperature range.

Key words: passive athermal; infrared dual-band; optical design

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(91338116)

作者简介: 江伦(1984-), 男, 讲师, 主要从事光学设计和激光通信方面的研究。Email: jlciomp@163.com

0 引言

目前的红外侦察系统工作波段主要有两个,即中波红外(3~5 μm)和长波红外(8~12 μm),这两种系统的应用范围和特点不同,中波红外系统主要用于观测温度较高的目标,如飞机、坦克和舰船等,而长波红外系统主要用于观测常温物体,形成物体的轮廓影像^[1]。另外,在靠近热源和存在杂散辐射的情况下,长波红外比中波红外侦察能力强,而在湿热环境下,中波红外观测优势比较明显^[2]。为充分利用这两个波段红外光学系统各自的观测能力和优势,提高侦察系统的侦察能力,世界各国均开展了红外双波段系统的研究热潮,目前有三种方式实现红外双波段系统,第一种由中波和长波两套热像系统组成,这种方式系统较复杂^[3];第二种是中波和长波红外探测器共用一个光学系统,通过分光方式实现中波和长波波段各自的探测^[4];第三种采用能同时响应中波和长波红外的红外双色探测器,光学系统采用红外双波段设计^[5]。随着双色探测器的发展日趋成熟,第三种结构以其结构紧凑、便于安装的优势逐渐成为红外双波段的主要发展方向。

红外光学材料折射率受温度变化影响较大,环境温度变化时会产生热像差,必须进行消热差设计。目前主要有机械被动式、机械主动式和光学被动式三种消热差方法,其中光学被动式消热差方法通过匹配透镜与镜头结构件之间的热性能参数消除热差,从而保证良好的成像质量。该方法无需供电,不引入运动元件,具有质量轻、体积小、可靠性好等优点。国外 Tamagawa 等人引入色差系数和热差系数,利用投影物热差图来进行红外系统的消热差设计^[6-7]。国内申碧云^[8]和张春艳等人利用光学被动式无热化设计方法,分别设计了红外双波段消热差系统。孙强^[9]和张欣婷^[10]等人利用衍射元件设计了红外双波段的消热差系统,但前者涉及到系统衍射效率低的问题,后者衍射元件的加工和装配较复杂,系统实现难度较大。

文中根据红外双波段消热差系统在光焦度分配、双波段轴向消色差、双波段消热差等方面的要求,在分析红外材料在中波和长波红外波段的色差与热差特性的基础上,利用红外色差图合理选择红外光学材料组合,设计了基于柯克三片式结构的双波段红外消热差系统,系统采用 AMTIR1、锗和硫化锌三种红外光学材料,引入非球面校正相对孔径增

大引起的高级像差,通过合理的材料选择和光焦度分配可实现系统在-50 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$ 范围内成像质量好。该系统可以有效剔除目标的伪装信息,提高目标的探测和识别能力,降低系统的虚警率。

1 技术指标要求

系统选用的探测器为对中波和长波红外波段均能响应的 HgCdTe 探测器,像元数为 320×256,像元尺寸为 30 μm ×30 μm ,即光学系统像高为 12.3 mm,要求系统在该红外双波段消热差设计指标如表 1 所示。

表 1 光学设计参数

| Parameter | Value |
|---------------------------------------|-----------|
| Wavelength/ μm | 3-5, 8-12 |
| FOV/ $^{\circ}$ | 14 |
| Effective length/mm | 50 |
| $F/\text{No.}$ | $F/1.25$ |
| Entrance pupil diameter/mm | 40 |
| Temperature range/ $^{\circ}\text{C}$ | -50-60 |

2 设计原理

为使系统在中波和长波红外满足消热差设计,需选择合适的镜头光学材料和机械结构材料组合。使得光学系统在双波段的轴向色差为零,温度变化时光学元件产生的离焦与机械结构产生的离焦抵消,从而使得整个系统不产生温度离焦,故系统光焦度分配需满足总光焦度分配、双波段消轴向色差和消热差设计方程,即:

光焦度分配要求

$$\varphi = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^k (h_i \varphi_i) \quad (1)$$

双波段消色差要求

$$\Delta f_{\text{wb}} = \left(\frac{1}{h_1 \varphi} \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 C_{1i} \varphi_i) = 0 \quad (2)$$

$$\Delta f_{\text{wb}}^f = \left(\frac{1}{h_1 \varphi} \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 C_{2i} \varphi_i) = 0 \quad (3)$$

消热差要求

$$\frac{\partial f_{\text{wb}}}{\partial T} = - \left(\frac{1}{h_1 \varphi} \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 T_{1i} \varphi_i) = \alpha_h L \quad (4)$$

$$\frac{\partial f_{2p}}{\partial T} = - \left(\frac{1}{h_1 \varphi} \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 T_{2i} \varphi_i) = \alpha_h L \quad (5)$$

式中: i 表示第 i 块透镜; φ 及 φ_i 表示透镜的光焦度; k 为透镜总的数目; h_i 表示轴上视场近轴光线在各透镜上的入射高; C_{1i} 和 C_{2i} 表示透镜在中波红外和长波红外的归一化色差系数, 为阿贝数的倒数; α_h 为系统外部机械材料的线膨胀系数; L 为机械结构构件的长度; T_{1i} 和 T_{2i} 为透镜的热差系数:

$$T = \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_g [0, 1] \quad (6)$$

式中: dn/dt 为折射率随温度的变化率; n 为透镜的折射率; α_g 为透镜材料的热膨胀系数。对于红外双波段消热差系统, 需同时满足公式(1)~(5), 其中公式(2)、(3)指中波和长波波段的消轴向色差, 公式(4)、(5)指中波和长波波段的光学元件的离焦与机械结构产生的离焦一致。

在中波和长波红外均能工作的红外材料主要有以下几种, 其色差系统和热差系数如表 2 所示^[6]。

表 2 常用红外材料在 3~5 μm 和 8~12 μm 色差系数和热差系数表

Tab.2 Chromatic and thermal properties of infrared materials at 3-5 μm and 8-12 μm

| Material | 3-5 μm | | 8-12 μm | |
|----------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| | Chromatic coefficient | Thermal coefficient/°C | Chromatic coefficient | Thermal coefficient/°C |
| Ge | 9.11×10^{-3} | 1.26×10^{-4} | 1.16×10^{-3} | 1.27×10^{-4} |
| ZnSe | 5.65×10^{-3} | 3.62×10^{-5} | 1.73×10^{-2} | 3.63×10^{-5} |
| ZnS | 8.79×10^{-3} | 2.77×10^{-5} | 4.41×10^{-2} | 2.76×10^{-5} |
| GaAs | 6.9×10^{-3} | 7.16×10^{-5} | 9.31×10^{-3} | 6.78×10^{-5} |
| AMTIR-1 | 4.75×10^{-3} | 3.89×10^{-5} | 8.95×10^{-3} | 3.61×10^{-5} |
| CdTe | 6.13×10^{-3} | 5.28×10^{-5} | 5.78×10^{-3} | 5.34×10^{-5} |

从表中可以看出, 红外材料在中波和长波热差系数差别很小, 故上面公式(4)和(5)可合为一个方程, 其热差系数取两个波段的平均值来计算求解初始结构。

3 设计过程及结果

首先确定系统采用的透镜材料, 在选择系统透镜材料时, 需首先考虑光焦度和消色差的条件, 即先满足公式(1)~(3)。具体将所有常用红外材料表征在

色差图上, 如图 1 所示。

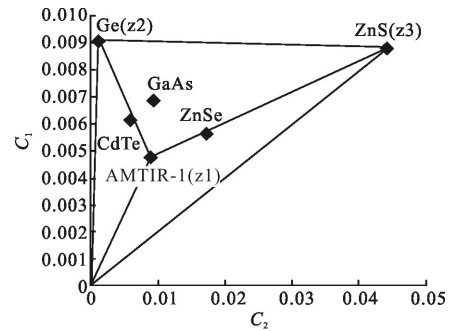


图 1 常用红外材料色差图

Fig.1 Chromatic diagram of usual IR materials

图 1 纵坐标和横坐标分别是中波红外和长波红外色差系数。该方法选取材料的原则是希望所选材料在图上组成的三角形面积较大, 且形状不过于扁平(光焦度大, 像差校正困难)^[1,6], 依据上述原则, 同时考虑材料的可用性, 系统采用 AMTIR1、Ge、Zns 三种材料。

另外根据系统的设计指标选定系统的初始结构, 系统具有一定的视场角, 可选择柯克三片式结构作为其初始结构, 所选材料中硫化锌折射率最低, 可放置在系统中间做负透镜, 系统中色差校正较困难, 需在系统前面采用两片不同材料的透镜组主要校正系统的色差, 系统要求的相对孔径较大, 超过柯克三片式的极限能力, 需采用非球面矫正由于相对孔径大导致的高级像差。机械结构件采用金属铝, 其热膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

在求解初始结构时, 将透镜组前两片看成密接透镜组, 两者间隔可忽略。同时考虑使各透镜光线偏折较小, 取 $h_2 \approx h_1, h_3 = 0.8h_1, h_4 = 0.9h_1$, 系统光焦度 $\varphi = 0.02$, 机械材料热膨胀系数 α_L 为 $23.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 初步取机械壳体长度 L 为 50 mm。将上述数据代入公式(1)~(5)中, 可得到各个透镜的光焦度分别为 0.047 6, -0.015 8, -0.014 4, -0.000 3, 假设前透镜组与第三片透镜, 第三与第四片透镜之间的间隔相等, 则其间隔可求得为 $d_{23} = d_{34} = \frac{h_2 - h_3}{(\varphi_1 + \varphi_2)h_1}$, 设置合理的优化函数, 优化系统镜头。

经优化后的镜头如图 2 所示, 系统一共有四片透镜, 依次采用的材料是 AMTIR1、锗、硫化锌、AMTIR1, 第一片透镜和第二片透镜的第一个表面使用的非球面, 非球面的二次曲面系数分别为 0.000 194 和 -0.007 24, 系统的光学总长为 67.9 mm。光学系统的主要参数如表 3 所示。

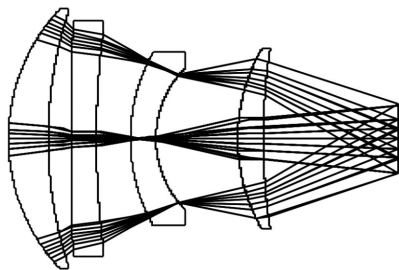


图 2 红外双波段光学系统光路图

Fig.2 Optical layout of IR dual-band optical system

表 3 红外双波段光学系统参数表

Tab.3 Parameters of dual-band infrared optical system

| Parameter | Value |
|-------------------------------------|-----------|
| Wavelength/ μm | 3-5, 8-12 |
| FOV/($^\circ$) | 14 |
| Effective length/mm | 50 |
| Image size/mm | 12.3 |
| F/No. | F/1.25 |
| Overall length/mm | 67.9 |
| Backfocal length/mm | 23.15 |
| Temperature range/ $^\circ\text{C}$ | -50-60 |

图 3、图 4 分别是系统在温度 20°C 时的 MTF 图和畸变图,用来评价系统的成像性能。

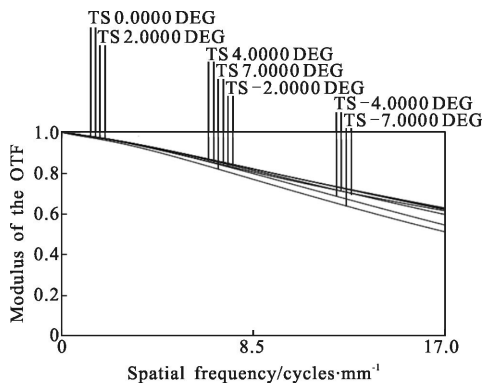


图 3 调制传输函数曲线

Fig.3 Modulation transfer function curves

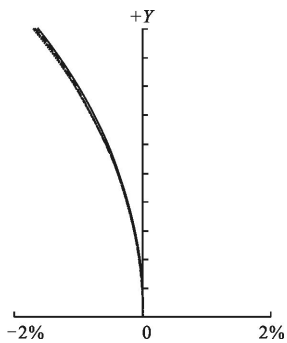
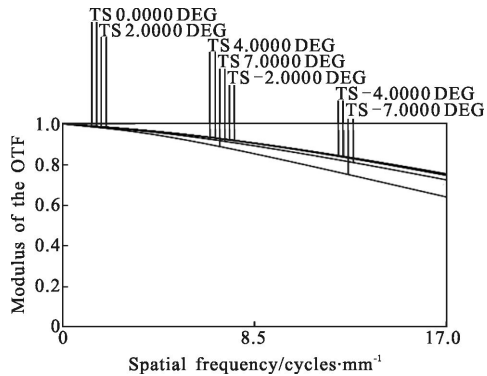


图 4 畸变曲线

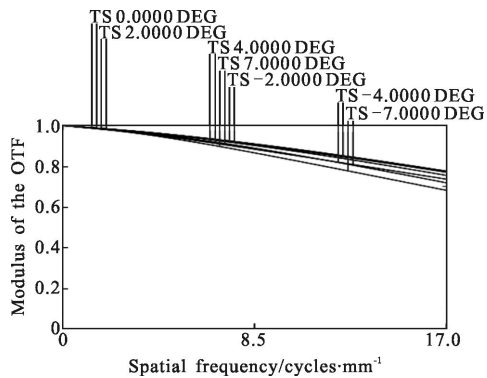
Fig.4 Distortion curves

通过 Zemax 软件模拟光学系统的环境温度变化,分别得到中波和长波红外的 MTF 曲线随温度的变化如图 5、图 6 所示。



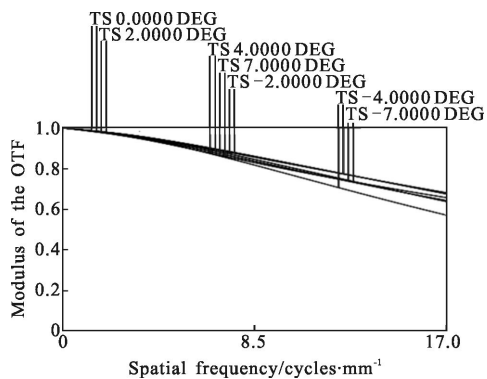
(a) -50°C 时中波红外 MTF 曲线

(a) MTF curves in MWIR at -50°C



(b) 20°C 时中波红外 MTF 曲线

(b) MTF curves in MWIR at 20°C



(c) 60°C 时中波红外 MTF 曲线

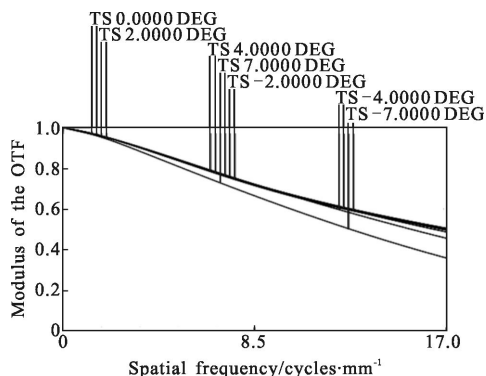
(c) MTF curves in MWIR at 60°C

图 5 不同温度下的中波红外 MTF 曲线

Fig.5 MTF curves in MWIR at different temperatures

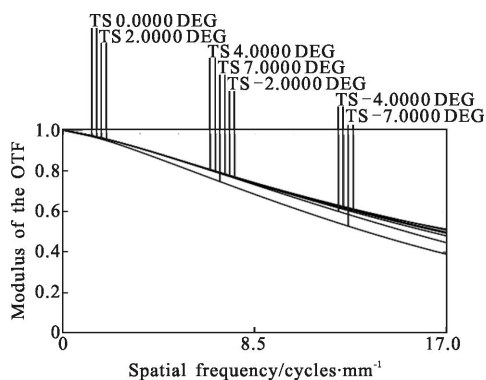
根据分析可知,中波在 -50°C 、 20°C 、 60°C 温度下在空间频率 17 lp/mm 处的 MTF 值分别为 0.69 、 0.71 、 0.65 ,长波在 -50°C 、 20°C 、 60°C 温度下在空间

频率 17lp/mm 处的 MTF 值分别为 0.49、0.5、0.47。



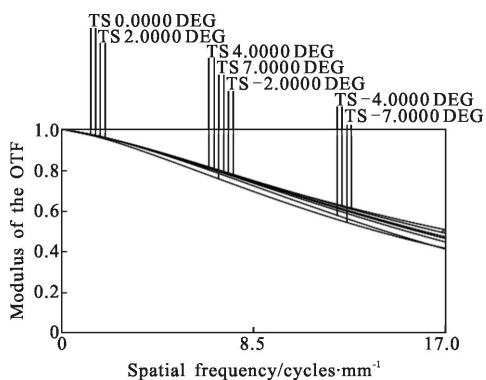
(a) -50 °C 时长波红外 MTF 曲线

(a) MTF curves in LWIR at -50 °C



(b) 20 °C 时长波红外 MTF 曲线

(b) MTF curves in LWIR at 20 °C



(c) 60 °C 时长波红外 MTF 曲线

(c) MTF curves in LWIR at 60 °C

图 6 不同温度下的中波红外 MTF 曲线

Fig.6 MTF curves in LWIR at different temperatures

4 结 论

文中在分析红外材料在中波和长波的色差特性

和热差特性的基础上, 利用光学被动式消热差原理设计了中波和长波红外双波段消热差系统。系统焦距为 50 mm, 视场为 14°, 系统采用了 AMTIR1、硫化锌和锗等三种光学材料, 整个系统含有两个非球面, 系统总长为 67.9 mm, 整个系统能在 -50~60 °C 温度范围内保持成像质量良好, 表明系统可在该温度范围内实现消热差。该镜头可用于导弹导引头或红外热像仪领域, 有利于提高系统探测与识别目标的能力, 降低系统的虚警率。

参考文献:

- [1] Zhang Chunyan, Sheng Weimin. Design of an athermalized MWIR and LWIR duan-band optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1323-1328. (in Chinese)
- [2] Gerald C Holst. *Electro-Optics Imaging System Performance* [M]. New York: SPIE Press, 2003: 345.
- [3] Schreer O, Saenz M L, Peppermuller C, et al. Helicopter-borne dual-band dual-FPA system [C]//SPIE, 2003, 5074: 637-647.
- [4] Fan Xuewu, Ma Zhen, Chen Rongli. The design of cassegrain optic system for double infrared wavebands [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(4): 463-465. (in Chinese)
- [5] Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Sun Qiang. Optical system design for a dual-band space imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(1): 50-54. (in Chinese)
- [6] Yasuhisa Tamagawa, Toru Tajime. Dual-band optical systems with a projective athermal Chart: design [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(1): 297-301.
- [7] Yasuhisa Tamagawa, Toru Tajime. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart [J]. *Opt Eng*, 1996, 35(10): 3001-3006.
- [8] Shen Biyun, Gao Ming. Passive optical athermalization design for infrared optical system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(6): 70-78. (in Chinese)
- [9] Sun Qiang, Wang Zhaoqi, Li Fengyou. Study of an athermal infrared dual band optical system design containing harmonic diffractive element[J]. *Chinese Science Bulle*, 2003, 48(12): 1193-1198.
- [10] Zhang Xinting, An Zhiyong. Design of infrared athermal optical system for dual-band with double-layer harmonic diffraction element [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0622004-1. (in Chinese)