

# 空间双波段成像光谱仪红外光学系统的设计\*

杨新军<sup>1</sup> 王肇圻<sup>1</sup> 孙强<sup>2</sup> 卢振武<sup>2</sup>

(1 南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

(2 中国科学院长春光机与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

**摘要** 分析了空间双波段成像光谱仪光学系统的光学特性, 提出利用光学材料间焦距位移系数的互补性, 实现光学系统消热差、消色差设计方法, 建立了一组既消热差又消色差的方程组. 给出了利用这种方法设计的视场角  $10^\circ$ , 焦距 100 mm,  $F$  数为 1.98, 温度范围在  $-20^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ , 工作波长为  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  和  $8 \sim 11 \mu\text{m}$  具有 100% 冷光阑效应的双波段消热差、消色差光学系统, 分析了系统各波段传递函数、波前差及像面位移随温度变化关系.

**关键词** 空间光学; 红外光学系统; 双波段; 消热差; 光学设计

**中图分类号** TH74; O435.2

**文献标识码** A

## 0 引言

空间环境中工作的光学系统要经受非常大的环境温度变化, 典型的可达  $-20^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ . 空间光学系统由于光学材料与结构材料的热不稳定性, 当环境温度变化时将引起焦距变化, 像面位移, 成像质量恶化. 因此, 在设计空间环境中使用的光学系统尤其是红外光学系统时, 应充分重视温度变化对光学系统性能的影响. 于是空间光学系统的消热差技术得到重视和发展<sup>[1,2]</sup>.

单波段成像技术从单元-线阵-焦平面的发展已经趋于完善, 但在获取信息方面由于局限于单一波段因此仍有很大不足. 如文献[3]中给出棕黑色粘土土壤和棕黑色沙土土壤的光谱, 从光谱图中可以看出, 两种土壤在中红外波段有相同的光谱特性 (MWIR), 而在长红外波段 (LWIR) 有较大差异, 因此只有通过双波段测量才能将两种土壤区分开; 在军事应用中, 由于目标的伪装, 单一波段的信息减弱, 辐射波段移动等, 使成像系统不能探测到目标存在或探测的准确度下降. 因此在国外, 很早就提出了双波段成像系统的研究<sup>[4-6]</sup>. 一般双波段热成像系统可以由两种方式构成: 一是两个分别响应不同波段的探测器组件共用一个光学系统构成<sup>[7,8]</sup>, 二是用一个能响应两个波段的双波段探测器共用一个光学系统构成<sup>[9]</sup>. 后者由于结构紧凑, 便于安装, 更受人们的青睐, 于是空间光学系统双波段消色差技术得到重视和发展<sup>[10]</sup>.

由于绝大多数热成像系统都在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  和  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  这两个大气窗口工作, 所以国内外研制的多数

双波段探测器都工作在这两个波段. 国内主要有昆明物理研究所、上海技术物理研究所和华北光电技术研究所从事双波段探测器的研究, 典型的产品如华北光电技术研究所研制的光敏元面积  $25 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m}$ , 光敏元中心间距  $56 \mu\text{m}$ ,  $2 \times 144$  元双波段焦平面探测器<sup>[11]</sup>等. 相比之下国外在这方面研究起步早, 技术也比较先进, 最近报道有: 规格  $512 \times 512$  元, 光敏元尺寸  $12.5 \mu\text{m} \times 12.5 \mu\text{m}$ , 光敏元间距  $25 \mu\text{m}$  的 InSb 双波段焦平面探测器<sup>[12]</sup>. 所设计的空间光学系统应具有与探测器相匹配的分辨率和像面尺寸.

对双波段消热差、消色差光学系统设计, 由于双波段焦平面探测器发展的限制, 研究起步较晚, 设计理论有待进一步发展. Tamagawa 和 Tajime<sup>[13]</sup> 提出利用投影无热差图设计双波段无热差光学系统, 该方法比较直观. 本文提出利用光学材料间焦距位移系数的互补性, 实现双波段消热差、消色差光学系统的设计方法, 导出一组既消热差又消色差的方程组, 并利用该方法设计了实例. 分析了设计实例各波段传递函数、波前差及像面位移随温度变化关系并与文献[14]带衍射透镜的双波段消色差系统进行了比较.

## 1 光学系统设计方法

光学材料的折射率不仅与工作波长有关, 还与工作温度有关. 所以透镜的光焦度既因波长而变化, 又随环境温度改变. 光焦度的变化导致像面位移, 使成像质量下降. 定义色散系数  $\omega_i$  和热散系数  $\theta_i$  为

$$\omega_i = -\frac{\Delta\Phi_{i\lambda}}{\Phi_i} = -\frac{(\partial n/\partial\lambda)\Delta\lambda}{n_i - 1}$$
$$\theta_i = \frac{\partial\Phi_i/\partial T}{\Phi_i} = \frac{\partial n/\partial T}{n_i - 1} - \alpha_i \quad (1)$$

式中:  $\Delta\lambda$  为设计波段,  $n_i$  为中心波长折射率,  $\alpha_i$  为

\*国家自然科学基金资助项目(60277021)

Tel: 022-23508332 Email: yangxinjun@eyou.com

收稿日期: 2003-10-23

透镜材料的线性膨胀系数,  $T$  为温度. 对于单个透镜, 当温度或波长发生变化时, 则焦距位移系数为

$$c_f = \frac{(\partial\phi_i/\partial T - \Delta\phi_i)}{\phi_i} \quad (2)$$

对于  $n$  个薄透镜组成的系统, 如各透镜焦距为  $f_i$  总焦距为  $f$ , 则焦距位移系数为

$$c_f = \frac{f}{f_1}c_{f1} + \frac{f}{f_2}c_{f2} + \frac{f}{f_3}c_{f3} + \dots + \frac{f}{f_n}c_{fn} \quad (3)$$

现在我们分析利用焦距位移系数互补性进行双波段消热差、消色差光学系统设计, 考虑各透镜之间被空气分离的情况, 如图 1 所示.

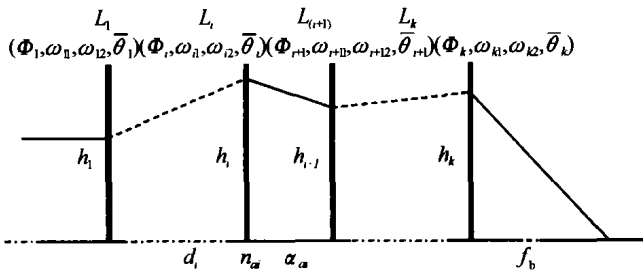


图 1 由  $k$  个透镜构成的光学系统

Fig. 1 Configuration of an optical system containing  $k$  thin lenses separated by  $k-1$  spaces

图中:  $L_i$  表示第  $i$  个透镜, 其光焦度为  $\Phi_i$ , 色差系数分别为  $\omega_{i1}, \omega_{i2}$ , 平均热散射系数为  $\bar{\theta}_i$ <sup>[11]</sup> (光学材料的热散射系数受波段影响很小, 采用平均热散射系数所带来的误差小于 4%), 另外  $d_i, n_{ai}$  和  $\alpha_{ai}$  分别表示第  $i$  个透镜到第  $i+1$  个透镜间轴向距离、折射率和线膨胀系数,  $h_i$  表示第  $i$  个透镜的投射高度,  $f_b$  为系统后焦距.

当各透镜之间被空气分隔时, 假设空气间隔随温度的变化可忽略, 按薄透镜理论可得到下面关系

$$\begin{cases} \frac{1}{f} = \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^k (h_i \Phi_i) \\ \Delta f_{1b} = \left( \frac{1}{h_1 \Phi} \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 \omega_{i1} \Phi_i) \\ \Delta f_{2b} = \left( \frac{1}{h_1 \Phi} \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 \omega_{i2} \Phi_i) \\ \frac{\partial f_b}{\partial \theta} = - \left( \frac{1}{h_1 \Phi} \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 \bar{\theta}_i \Phi_i) \end{cases} \quad (4)$$

令  $\Phi'_i = (h_i/h_1) \Phi_i, \omega'_{i1} = (h_i/h_1) \omega_{i1}, \omega'_{i2} = (h_i/h_1) \omega_{i2}$  和  $\bar{\theta}'_i = (h_i/h_1) \bar{\theta}_i$ , 利用不同光学材料间焦距位移系数的互补性得消热差、消色差方程为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k \Phi'_i = \Phi, \sum_{i=1}^k \omega'_{i1} \Phi'_i = 0, \sum_{i=1}^k \omega'_{i2} \Phi'_i = 0, \\ \sum_{i=1}^k \bar{\theta}'_i \Phi'_i = -\alpha_h \Phi \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\alpha_h$  为支撑透镜的机械结构的热膨胀系数. 对于由不同材料构成的分离双透镜, 由式(5)得到

$$\Phi = \Phi'_1 + \Phi'_2, \frac{(\bar{\theta}'_1 \Phi'_1 + \bar{\theta}'_2 \Phi'_2)}{\Phi} =$$

$$-\alpha_h, \frac{\omega'_{11} \Phi'_1 + \omega'_{12} \Phi'_2}{\Phi} = 0, \frac{\omega'_{21} \Phi'_1 + \omega'_{22} \Phi'_2}{\Phi} = 0 \quad (6)$$

满足式(6)的两透镜光焦度为

$$\begin{cases} \Phi'_1 = \frac{\bar{\theta}'_2 + \alpha_h}{\bar{\theta}'_2 - \bar{\theta}'_1} \Phi, \Phi'_2 = \frac{\bar{\theta}'_1 + \alpha_h}{\bar{\theta}'_1 - \bar{\theta}'_2} \Phi, \\ \text{且 } \frac{\Phi'_2}{\Phi'_1} = -\frac{\omega'_{11}}{\omega'_{12}} = -\frac{\omega'_{21}}{\omega'_{22}} \end{cases} \quad (7)$$

对于由两种以上材料及两个以上透镜构成的多透镜系统可以按双透镜合成, 并不断重复得到各个透镜的光焦度. 再利用对所设计光学系统像差特性要求, 给出系统的像差特性参量  $\bar{P}_o, \bar{W}_o$ , 就可以大致计算出光学系统的初始结构参量.

## 2 设计实例和分析比较

由上述方法, 设计了适用于中红外波段 (3 ~ 5  $\mu\text{m}$ ) 和长红外波段 (8 ~ 11  $\mu\text{m}$ ), 视场角  $10^\circ$ , 焦距 100 mm,  $F$  数为 1.98 双波段消热差光学系统, 表 1 是 3 ~ 5  $\mu\text{m}$  和 8 ~ 11  $\mu\text{m}$  波段一些常用红外材料的  $\theta, \omega$  值. 由于本文设计的系统由两种材料构成, 从表 1 可以看出基本满足式(7)的只有 Ge 和 Silicon 两种材料. 考虑到第一透镜 (Silicon 透镜) 为正透镜, 第二透镜 (Ge 透镜) 为负透镜, 故  $h_1 > h_2$ , 取  $h_2 = 2/3 h_1$ , 由式(7)求得两透镜光焦度为  $\Phi'_1 = 1.134\Phi, \Phi'_2 = -0.134\Phi$ . 而为了进一步消除系统的球差、彗差和像散, 在保持第一透镜的光焦度不变的情况下, 将其分成前后两组, 形成匹兹万 (Petzval) 型系统<sup>[15]</sup>.

表 1 3 ~ 5  $\mu\text{m}$  和 8 ~ 11  $\mu\text{m}$  波段一些常用红外材料的  $\theta, \omega$  值

| Materials | 3 ~ 5 $\mu\text{m}$   |                       | $\bar{\theta} (/^\circ\text{C})$ |
|-----------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|
|           | $\omega_1$            | $\omega_2$            |                                  |
| Ge        | $9.11 \times 10^{-3}$ | $8.98 \times 10^{-4}$ | $-1.33 \times 10^{-4}$           |
| ZnSe      | $5.65 \times 10^{-3}$ | $1.22 \times 10^{-2}$ | $-3.62 \times 10^{-5}$           |
| ZnS       | $8.79 \times 10^{-3}$ | $3.05 \times 10^{-2}$ | $-2.76 \times 10^{-5}$           |
| GaAs      | $6.9 \times 10^{-3}$  | $6.66 \times 10^{-3}$ | $-6.78 \times 10^{-5}$           |
| AMTIR-1   | $4.75 \times 10^{-3}$ | $6.34 \times 10^{-3}$ | $-3.62 \times 10^{-5}$           |
| Silicon   | $4.39 \times 10^{-3}$ | $4.31 \times 10^{-4}$ | $-6.14 \times 10^{-5}$           |

利用 Focus Software 公司的 ZEMAX-EE 光学设计软件优化实现了具有较好热稳定性的双波段光学系统, 本系统经过两次成像使系统的出瞳与位于双波段焦平面探测器前的冷屏重合, 实现冷光栏效率为 100%. 图 2 为系统光路图, 该系统共由三片元件组成, 透镜 1 材料为硅 (Silicon), 透镜 2 材料为锗 (Ge), 透镜 3 材料为 (Silicon), 第四片为杜瓦瓶窗口, 根据参考文献[6]中的商用致冷器的参数, 冷光栏放在第三个透镜后像平面前 26 mm 处, 第五片为探测器焦平面阵列. 图 3、图 4 分别为两个波段系统的调制传递函数 (MTF) 和波前差随温度的变化关系. 从图中可以看出, 在  $20^\circ\text{C}$  时, 设计系统在中

波(3~5 μm)和长波(8~11 μm)两个波段上都基本达到衍射极限,在3~5 μm 波段全视场调制传递函数值对应空间频率30 lp/mm 为0.7;在8~11 μm 波段全视场调制传递函数值对应空间频率30 lp/mm 为0.5. 与文献[12]相比,其在3.7~4.3 μm 波段全视场调制传递函数值对应空间频率18 lp/mm 为0.7;在8.7~11.5 μm 波段全视场调制传递函数值对应空间频率18 lp/mm 为0.5. 对于红外系统最小可分辨温差是最主要的性能参量,而最小可分辨

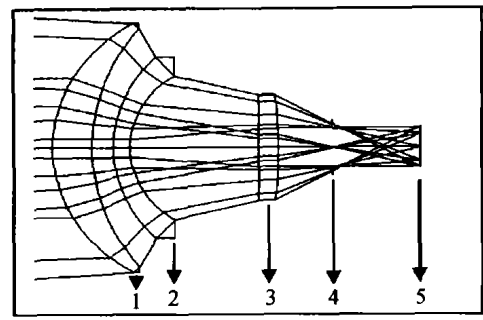


图2 系统光路图  
Fig. 2 Optical system layout

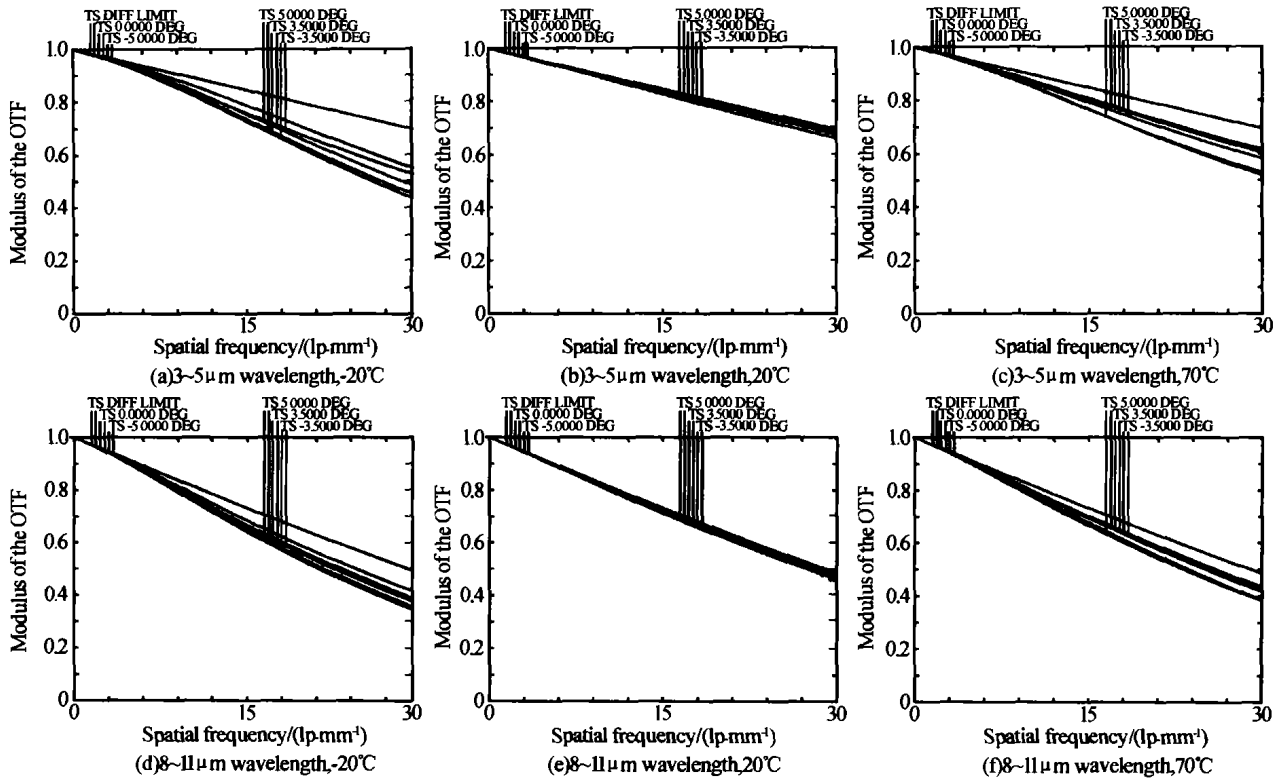


图3 双波段消热差、消色差系统 MTF 曲线  
Fig. 3 MTF of the dual-band athermalized system

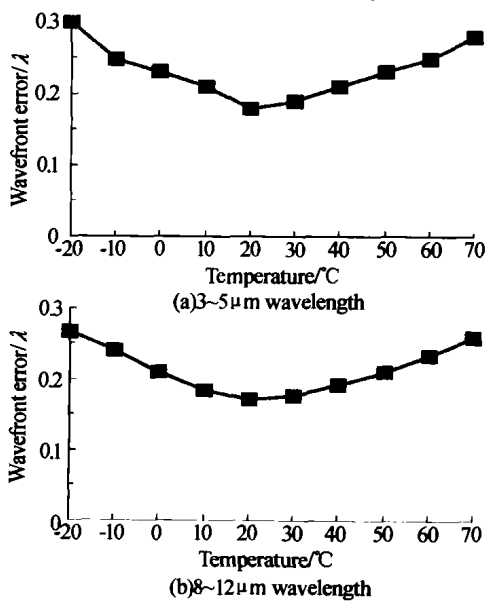


图4 波前差随温度的变化曲线  
Fig. 4 Dependence of wavefront aberration different and temperature

温差与系统调制传递函数成正比,因此文献[12]调制传递函数比较低必然影响其实际应用. 另外本文设计实例在温度变化时(-20°C~70°C),0.7 视场内的调制传递函数值与设计值之差(TS ± 3.5DEG 与 TS DIFF. LIMIT 之差)为0.05 左右,全视场内的调制传递函数值与设计值之差(TS ± 5DEG 与 TS DIFF. LIMIT 之差)为0.1 左右,设计结果已接近衍射极限.

图4 给出了对于不同的波段系统在-20°C~70°C 的温度范围内的波前差同温度的关系曲线,从这曲线中,能够看出系统在温度变化时(-20°C~70°C),对于两个波段波前差都基本小于各个通道的中心波长的1/4 倍,小于像质评价“瑞利判据”的标准,即当实际波面与理想波面的最大差别不超过λ/4 时,此波面可看作无缺陷的.

对于不同波段设计系统的像面位移随温度变化

关系以及不同温度(  $-20^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$  )两个波段间的像面位移如表 2 所示. 从表 2 的数据可以看出, 对于两个波段在不同温度下设计系统的像面位移以及

不同温度(  $-20^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$  )两个波段间的像面位移都很小, 可控制在微米量级.

表 2 设计实例在两个波段像面位移与温度  $T$  的关系

| $T/^{\circ}\text{C}$ | $f_b/\text{mm}$        |                         | Defocus /mm            |                         | $f_{b(3-5)} - f_{b(8-11)}$<br>(mm) |
|----------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------------|
|                      | (3 ~ 5 $\mu\text{m}$ ) | (8 ~ 11 $\mu\text{m}$ ) | (3 ~ 5 $\mu\text{m}$ ) | (8 ~ 11 $\mu\text{m}$ ) |                                    |
| -20                  | 41.01764               | 41.02041                | 0.0327                 | 0.0341                  | 0.0027                             |
| -10                  | 41.00865               | 41.01123                | 0.0243                 | 0.0243                  | 0.0025                             |
| 0                    | 41.00078               | 41.00316                | 0.0164                 | 0.012                   | 0.0024                             |
| 10                   | 40.99199               | 40.99418                | 0.0077                 | 0.0078                  | 0.0022                             |
| 20                   | 40.98429               | 40.98629                | 0                      | 0                       | 0.002                              |
| 30                   | 40.97665               | 40.97849                | -0.0076                | -0.0078                 | 0.0018                             |
| 40                   | 40.96807               | 40.96969                | -0.0162                | -0.0166                 | 0.0016                             |
| 50                   | 40.95955               | 40.96097                | -0.0247                | -0.0259                 | 0.0014                             |
| 60                   | 40.95106               | 40.95229                | -0.0332                | -0.034                  | 0.0012                             |
| 70                   | 40.94262               | 40.94366                | -0.0416                | -0.0426                 | 0.001                              |

对于华北光电技术研究所研制的光敏元面积  $25\ \mu\text{m} \times 28\ \mu\text{m}$ , 光敏元中心间距  $56\ \mu\text{m}$ ,  $2 \times 144$  元双波段焦平面探测器. 要求的焦平面尺寸应为  $8\ \text{mm}$ , 空间分辨率达到  $18\ \text{lp}/\text{mm}$ ; 对于国外最新报道的  $512 \times 512$  元, 光敏元尺寸  $12.5\ \mu\text{m} \times 12.5\ \mu\text{m}$ , 光敏元间距  $25\ \mu\text{m}$  的 InSb 双波段焦平面探测器, 则要求焦平面尺寸  $18\ \text{mm}$ , 空间分辨率达到  $27\ \text{lp}/\text{mm}$ . 本文设计的光学系统在空间频率为  $30\ \text{lp}/\text{mm}$  时, 全视场调制传递函数值在中波(  $3 \sim 5\ \mu\text{m}$  )波段达 0.6 以上, 在长波(  $8 \sim 11\ \mu\text{m}$  )波段达 0.4 以上, 完全满足国内外最新探测器要求.

### 3 结论

本文提出利用光学材料间焦距位移系数的互补性, 实现双波段消热差、消色差光学系统的设计方法, 导出一组既消热差又消色差的方程组. 利用这种方法设计的视场角  $10^{\circ}$ , 焦距  $100\ \text{mm}$ ,  $F$  数为 1.98, 工作波长为  $3 \sim 5\ \mu\text{m}$  和  $8 \sim 11\ \mu\text{m}$  空间双波段成像光谱仪红外光学系统, 通过分析其两个波段调制传递函数值随温度的变化关系曲线, 发现在  $-20^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$  的温度范围内对于整个视场两个波段的调制传递函数值接近衍射极限, 对应空间频率  $30\ \text{lp}/\text{mm}$ , 都在 0.4 以上; 通过分析两个波段波前差随温度的变化曲线, 发现在  $-20^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$  的温度范围内, 两个波段的波前差都基本小于  $\lambda/4$ , 既小于瑞利判别标准; 通过分析设计系统不同波段、不同温度的像面位移数据, 发现在  $-20^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$  的温度范围内不同波段的像面位移以及两个波段间的像面位移都很小, 可控制在微米量级. 说明设计系统具有非常好的消色差、消热差能力以及良好的成像质量和高的分辨率, 完全满足国内外最新双波段探测器要求.

### 参考文献

- 李林, 王焯. 环境温度对光学系统影响的研究及无热系统设计的现状与展望. 光学技术, 1997, 23(5): 26 ~ 29  
Li L, Wang X. *Optical Technology*, 1997, 23(5): 26 ~ 29
- 孙强, 刘宏波, 王肇圻, 等. 红外折射/衍射超常温光学系统. 光子学报, 2003, 32(4): 466 ~ 469  
Sun Q, Liu H B, Wang Z Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(4): 466 ~ 469
- A number of spectral libraries can be accessed from the Internet from the RSGS. The main web address is <http://speclab.cr.sugs.gov/spectral-lib.html>
- Jamieson T H. Ultrawide waveband optics. *Optical Engineering*, 1984, 23(2): 111 ~ 116
- Jiang H, Qian Y, Rhee K T. High speed dual spectral infrared imaging. *Opt Eng*, 1993, 32(6): 1281 ~ 1283
- Ritter G X, Wilson J N, Davidson J L. Data compression of multispectral image. *SPIE*, 1987, 829: 58 ~ 64
- 樊学武, 马臻, 陈荣利, 等. 红外双波段卡塞格林光学系统设计. 光子学报, 2003, 32(4): 463 ~ 465  
Fan X W, Ma Z, Chen R L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(4): 463 ~ 465
- Huang Haoming, Wang Naique. Two-waveband (  $3 \sim 5\ \mu\text{m}$  and  $8 \sim 12\ \mu\text{m}$  ) thermal imaging system. *SPIE*, 1992, 1814: 119 ~ 129
- Brain S P, Cuthbertson G M. Dual waveband imaging radiometer. *SPIE*, 1986, 685: 129 ~ 137
- Buchdahi H A. Many-color correction of thin doublets. *Applied Optics*, 1985, 24(12): 1878 ~ 1882
- 张艳冰, 喻松林, 东海杰. 双波段红外焦平面探测器. 红外技术, 2000, 20(3): 27 ~ 30  
Zhang Y B, Yu S L, Dong H J. *Infrared Technology*, 2000, 20(3): 27 ~ 30
- Scholl J F, Dereniak E L, Descour M R, et al. Phase grating design for a dual-band snapshot imaging spectrometer. *Applied Optics*, 2003, 42(1): 18 ~ 20

- 13 Tamagawa Y, Tajime T. Dual-band optical system with a projective athermal chart: design. *Applied Optics*, 1997, **36**(1):297 ~ 301
- 14 孙强,王肇圻,卢振武. 谐衍射/折射光学系统实现红外双波段设计. *光学学报*,2004,**24**(6):830 ~ 833  
Sun Q, Wang Z Q, Lu Z W. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6):830 ~ 833
- 15 沈为民,薛鸣球,余建军. 大视场大相对孔径长波红外物镜. *光子学报*,2004,**33**(4):461 ~ 465  
Shen W M, Xue M Q, Yu J J. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):461 ~ 465

## Optical System Design for a Dual-band Space Imaging Spectrometer

Yang Xinjun<sup>1</sup>, Wang Zhaoqi<sup>1</sup>, Sun Qi<sup>2</sup>, Lu Zhenwu<sup>2</sup>

1 *The Key Laboratory of Opt-electronic Information Science and Technology, Institute of Modern Optics, Nankai University, MOE, Tianjin 300071*

2 *State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*

Received date:2003-10-23

**Abstract** Optical features of optical system of a dual-band imaging spectrometer is analyzed. Based on the mutual compensation of optical materials focal plane shift constant, the equations are formulated for athermalization of optical system. A design example of a three lenses optical system with two materials operating in the 3 ~ 5  $\mu\text{m}$  and 8 ~ 11  $\mu\text{m}$  wavelength bands with 100% cold shield efficiency, 10° field of view, 100 mm focal length, 1.98  $F$  number is designed, associated with high optical quality in large working temperature range -20 ~ 70°C. The defocus, wavefront error and modulation transfer function (MTF) of optical system are analyzed.

**Keywords** Space optics; Infrared imaging; Dual-band; Athermalization optical design

**Yang Xinjun** was born in 1969, received his B. S. degree from Hebei University in 1993 and his M. S. degree from Nankai University in 2002. At present, he is a Ph. D. candidate in the Institute of Modern Optics, Nankai University. His research interests include helmet mounted display, binary optics and optical design.