

一种宽温双光谱红外搜索跟踪系统的设计

沈满德[†] 任欢欢

(武汉纺织大学电子与电气工程学院, 武汉 430073)

(2012年10月3日收到; 2013年1月4日收到修改稿)

基于谐衍射光学元件特殊的色差和热差特性, 将谐衍射元件应用于红外搜索成像系统中, 设计了一个双光谱宽温度范围的红外搜索跟踪成像系统, 该系统工作波段为 3.7—4.8 μm 和 8.7—11.3 μm , F 数为 2.5, 有效焦距为 200 mm, 全视场角为 5°, 环境温度为 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. 设计结果表明, 使用谐衍射透镜不仅可以使系统在两个波段范围成像优良, 而且结构简单紧凑、透射比高、具有良好的消热差特性.

关键词: 光谱成像, 红外搜索, 热差

PACS: 07.50.Ls, 07.57.Hm, 07.60.Hv

DOI: 10.7498/aps.62.090702

1 引言

红外搜索跟踪系统是利用目标自身的热辐射特征进行监测并连续跟踪目标 (如低高空飞机和水面舰船), 可用于雷达补盲, 是一种重要的雷达辅助设备, 目前的红外探测光学系统大多数工作在单一波段, 由于红外系统使用地域的不同、气候温度的改变、目标的伪装变化等, 单一波段的系统获取信息减弱, 成像系统探测准确度下降^[1,2]. 利用中/长波红外双光谱代替单波段探测系统探测目标, 可提高系统在复杂环境下的目标识别与抗干扰能力, 红外搜索跟踪系统通常都工作在恶劣环境下, 这就要求系统在很宽温度范围内有稳定的光学性能^[3-5]. 在红外波段可选用的光学材料种类很少, 且红外材料的折射率温度变化系数都非常大, 温度发生变化时光学元件的曲率、厚度和间隔及结构件材料的热胀冷缩, 将引起系统焦距变化、像面离焦和成像质量恶化等, 导致系统性能的急剧下降. Sweeney、Sommargren 分别提出了谐衍射透镜 (harmonic diffractive lenses) 的概念^[6], 谐衍射透镜可以在一系列分离波长处获得相同光焦距. 陈津津等人报道了一种红外搜索跟踪光学系统但未考虑温度对光学性能的影响^[7]. 薛慧等人报道的红外搜索跟踪光学系统结构复杂, 且只能在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ — 60

$^{\circ}\text{C}$ 的温度内正常工作难以在较宽的温度环境中使用^[8], 且以上两种系统均为单光谱红外搜索跟踪系统, 不能实现双光谱探测. 本文分析了谐衍射光学元件的成像理论, 提出了投影消热差图的设计方法, 利用投影消热差图筛选出适合双光谱光学系统的最佳组合, 并将谐衍射光学元件用于红外搜索成像系统中, 通过合理分配各个透镜的光焦距, 实现了红外搜索跟踪成像系统在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内双光谱探测.

2 投影消热差图设计方法和谐衍射光学成像理论

2.1 投影消热差图设计方法

在红外双光谱光学系统的设计中, Yasuhisa Tamagawa 提出了平面投影消热差图的设计方法^[9]. 对于双光谱红外光学系统, 其初始结构参数在满足系统光焦距方程的同时, 还要满足两个光谱的同时消色差和消热差. 系统由若干透镜组成, 其中第 i 个透镜的规划热差系数 T_i 和色差系数 C_i 为

$$T_i = -\alpha_i + \frac{1}{n-1}(d_n/d_T - nd_{n0}/d_T), \quad (1)$$

[†] 通讯作者. E-mail: opticaldesign@126.com

$$C_i = \frac{n_1^- n_2}{n-1}, \quad (2)$$

其中, n 为中心波长时的折射率, α_i 为透镜材料的线膨胀系数, n_1, n_2 为波长为 λ_1, λ_2 时的折射率, $d_n/d_T, d_{n0}/d_T$ 为透镜材料和介质的折射率温度系数.

假设各透镜之间的间隔随温度变化可以被忽略, 按照薄透镜理论可得

$$\sum_{i=1}^j h_i \phi_i = \phi, \quad (3)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 C_{1i} \phi_i) = \partial f_{1b}^T, \quad (4)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 C_{2i} \phi_i) = \partial f_{2b}^T, \quad (5)$$

$$-\left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 T_{1i} \phi_i) = \frac{\partial f_{1b}^T}{\partial T}, \quad (6)$$

$$-\left(\frac{1}{h_2 \phi}\right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 T_{2i} \phi_i) = \frac{\partial f_{2b}^T}{\partial T}, \quad (7)$$

其中, h_i 为光线在透镜各个表面的入射高度, ϕ_i 为各个透镜光焦度, ϕ 为系统总光焦度, C_{1i}, C_{2i} 和 T_{1i}, T_{2i} 分别为波长 λ_1, λ_2 时的色差系数和的热差系数, $\partial f_{1b}^T, \partial f_{2b}^T$ 为 λ_1, λ_2 时的焦距, $\frac{\partial f_{1b}^T}{\partial T}, \frac{\partial f_{2b}^T}{\partial T}$ 为 λ_1, λ_2 时的焦随温度的变化.

分析常用材料在两个波段下的 T, C 值, 因为在 3—5 μm 和 8—12 μm 光谱处各个光谱位置的 T, C 值相差很小, 故我们用平均值来表征其温度和色散特性, 对于中、长波红外, 常用红外材料的温度和色散特性如表 1 所示 [10].

表 1 几种常用红外光学材料中、长波红外下的 T, C 值

玻璃类型	3—5 μm		8—12 μm		T
	C_1	T_1	C_1	T_1	
Ge	9.11×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.16×10^{-3}	1.27×10^{-4}	1.265×10^{-4}
ZnSe	5.65×10^{-3}	3.62×10^{-3}	1.73×10^{-2}	3.63×10^{-5}	3.625×10^{-5}
ZnS	8.79×10^{-3}	2.77×10^{-3}	4.41×10^{-2}	2.76×10^{-5}	2.765×10^{-5}
GaAs	6.90×10^{-3}	7.18×10^{-3}	9.31×10^{-3}	6.78×10^{-5}	6.98×10^{-5}
AMTIR1	4.75×10^{-3}	3.89×10^{-3}	8.95×10^{-3}	3.61×10^{-5}	3.75×10^{-5}

由表 1 可知, 光学材料的规划热差系数受波段影响很小, 可以采用平均规划热差系数来进行设计, 由 (6) 和 (7) 式可得

$$\frac{\partial f_b}{\partial T} = -\left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 T_i \phi_i). \quad (8)$$

这样, 可以用三维图来表示材料的色散性能和热性能. 红外材料中能够在中波和长波中使用的几种常用材料为 Ge, ZnSe, ZnS, GaAs 和 AMTIR1, 图 1 给出了中、长波光红外的消热差图 [10].

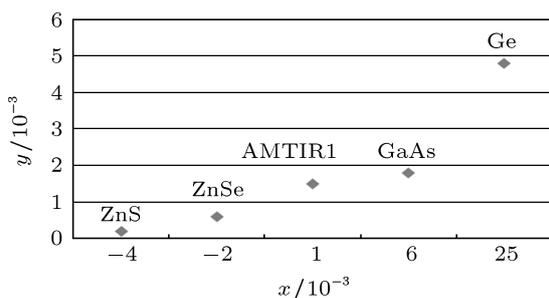


图 1 中、长波光红外的投影消热差图

2.2 谐衍射光学成像理论

对于谐衍射元件, 环带光程差为 $p\lambda_0$, 其中 λ_0 为设计波长, p 为正整数, 总相位深度 h 为 [11]

$$h = p\lambda_0 / (n - n_0), \quad (9)$$

其中, n 和 n_0 分别为介质和环境的折射率. 一般情况下, 系统工作在空气环境中, $n_0 = 1$, 则

$$h = p\lambda_0 / (n - 1). \quad (10)$$

当采用薄透镜模型时, 衍射光学元件的第 k 个环带半径为 [12]

$$r_m = \sqrt{(f_0 + kp\lambda_0)^2 - f_0^2}, \quad (11)$$

其中 r_m 为第 k 个环带的径向距离, f_0 为 λ_0 对应的焦距.

谐衍射元件的焦距为 [13]

$$f = \frac{p\lambda_0}{m\lambda} f_0, \quad (12)$$

式中, m 是波长 λ 对应的谐振级次, 当 $m\lambda = p\lambda_0$ 时,

即不同波长其 m 级谐振光波均会聚到共同的焦点 f_0 处.

谐衍射元件的衍射效率可表示为^[14]

$$\eta = \sin^2 c^2 \left\{ \frac{\lambda_0}{\lambda} \left[\frac{n(\lambda - 1)}{n(\lambda_0 - 1)} \right] p - m \right\}, \quad (13)$$

可以看出, 当

$$\lambda = \frac{p\lambda_0}{m} \quad (14)$$

时, 衍射效率可达到 100%.

谐衍射元件的色散和普通衍射元件的色散相同^[15], 为

$$V = \frac{\lambda_{\text{mid}}}{\lambda_{\text{short}} - \lambda_{\text{long}}}. \quad (15)$$

温度变化主要引起谐衍射透镜结构上 r_m 和 h 及折射率 n 和 n_0 的变化, 谐衍射元件光热膨胀系数为^[16,17]

$$\begin{aligned} x_{f,h} &= \frac{1}{f} \frac{df}{dT} \\ &= \alpha_g - \frac{1}{(n - n_0)n_0} \left(n_0 \frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

折射元件的光热膨胀系数为

$$\begin{aligned} x_{f,r} &= \alpha_g - \frac{1}{(n - n_0)n_0} \\ &\quad \times \left(n_0 \frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

普通衍射元件的光热膨胀系数为

$$x_{f,d} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT}. \quad (18)$$

可以看出 (16) 式和 (17), (18) 式形式相同, 也即谐衍射元件的光热膨胀系数介于折射元件和衍射元件的光热膨胀系数之间. 当 p 值较小的时候 $h(n - n_0)$ 变化可以忽略不计, 其光热膨胀系数和普通衍射元件的光热膨胀系数相近; 反之, 其光热膨胀系数逐渐和普通折射透镜的光热膨胀系数相近.

3 系统设计与性能分析

基于空间探测和军事的特殊应用, 并考虑双光谱红外搜索跟踪成像系统在两个波段均有较高的衍射效率, 根据上述 (9)—(14) 式, 确定谐衍射透镜的设计波长 $\lambda_0 = 10.0 \mu\text{m}$, $p = 2$, 对应级次 $m = 2, 3, 4, 5$ 时的谐振波长分别为 $10.0 \mu\text{m}, 6.67 \mu\text{m}, 5.0 \mu\text{m}, 4.0 \mu\text{m}$, 取 $m = 2$ 和 $m = 4$ 时, 对应波长 $\lambda = 10.0 \mu\text{m}$ 和 $\lambda = 4.0 \mu\text{m}$, 选择 $3.7\text{--}4.8 \mu\text{m}$ 和 $8.7\text{--}11.3 \mu\text{m}$ 作为工作波段, 相对孔径为 $1/2.5$, 有

效焦距为 200 mm , 全视场角为 5° , 工作温度为 $-80^\circ\text{C}\text{--}200^\circ\text{C}$, 镜筒选用线膨胀系数为 $8.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 的钛合金. 基于双光谱红外搜索跟踪成像系统使用的特殊性且保证实现系统的轻量化, 拟采用三片式结构. 由于系统要求可以在双光谱内同时成像并校正像差, 因为每一片透镜的焦距、面型、曲率半径和厚度等参数都是确定的, 故选择的红外材料必须在中波红外和长波红外每个波长处的折射率值变化不是很大, 并结合投影消热差图设计方法, 由图 1 可以得知, AMTIR1、ZnS 和 Ge 三种材料起始点近似在同一条直线上, 因此我们选用这三种红外玻璃作为透镜的材料. 确定透镜材料后, 由于衍射面的光焦度很小, 因此在设计中先假定衍射面的光焦度为“零”, 计算得出三片元件的光焦度, 确定了光学系统的初始结构, 并将谐衍射面加入系统中利用谐衍射光学元件特殊的色散特性来更好协调消各个波段内的像差, 然后应用 Zemax 光学设计软件利用自带的像差评价函数进行优化调整各个镜片和谐衍射面的光焦度分配, 图 2 给出了设计的谐衍射双光谱红外搜索跟踪光学系统图, 系统为三片式结构, 总长为 146.67 mm , 其中第二个镜子的后表面是高次非球面, 第三片镜子的后表面为是谐衍射面, 谐衍射光学元件的厚度为 5 mm .

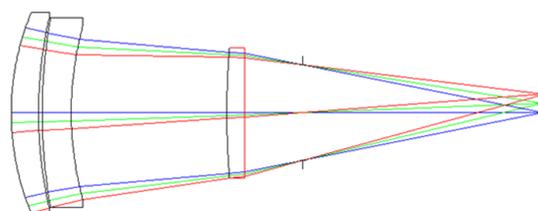


图 2 双光谱红外搜索跟踪系统实物图

图 3 和图 4 中的 (a)—(c) 分别给出了谐衍射双光谱红外搜索跟踪系统 $3.7\text{--}4.8 \mu\text{m}$ 光谱和 $8.7\text{--}11.3 \mu\text{m}$ 光谱处在 $-80^\circ\text{C}, 60^\circ\text{C}, 200^\circ\text{C}$ 的调制传递函数曲线 (Modulation Transfer Function, MTF), 图 3 和图 4 中横坐标为空间频率, 纵坐标为调制传递函数值, 从图中可以看出在空间频率 14 lp/mm 处, $3.7\text{--}4.8 \mu\text{m}$ 波段处在温度变化范围内边缘视场的传函值均在 0.35 以上, $8.7\text{--}11.3 \mu\text{m}$ 波段处在温度变化范围内边缘视场的传函值几乎都在 0.4 以上, 轴上视场的传函值接近系统在该波段的衍射极限 (衍射极限值为 0.55). 系统在两个光谱均能优质成像, 表明其满足 $-80^\circ\text{V}\text{--}200^\circ\text{C}$ 的宽温度范围的多波段设计.

图 5 和图 6 的 (a)—(c) 给出了系统分别工作于光谱范围 3.7—4.8 μm 和 8.7—11.3 μm 在 -80°C , 60°C , 200°C 的轴向色差曲线, 系统的最大轴向色差为 0.22 μm 和 0.24 μm , 表明在仅用三片镜子实现双光谱成像且成像质量良好的前提下, 两个光谱的色差已经校正得较好.

图 7 给出了谐衍射面的位相及周期同径向距离的关系曲线, 谐衍射面最大线频率为 1.12 periods/mm, 对应最小周期线宽为 0.89 mm, 若每个周期刻蚀 8 个台阶, 此时对应的最小特征尺寸为 111.25 μm , 这样尺寸的衍射面完全可以用金刚石车削工艺加工.

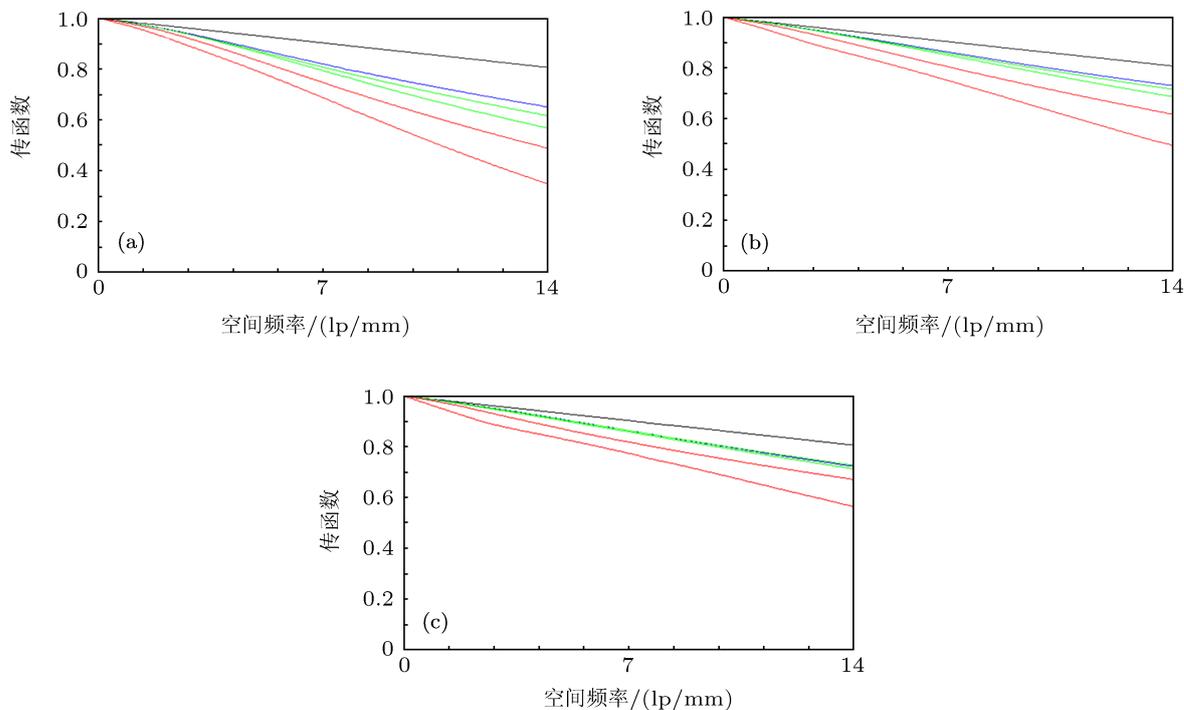


图 3 3.7—4.8 μm 波段各温度处的传函曲线 (a) -80°C ; (b) 60°C ; (c) 200°C

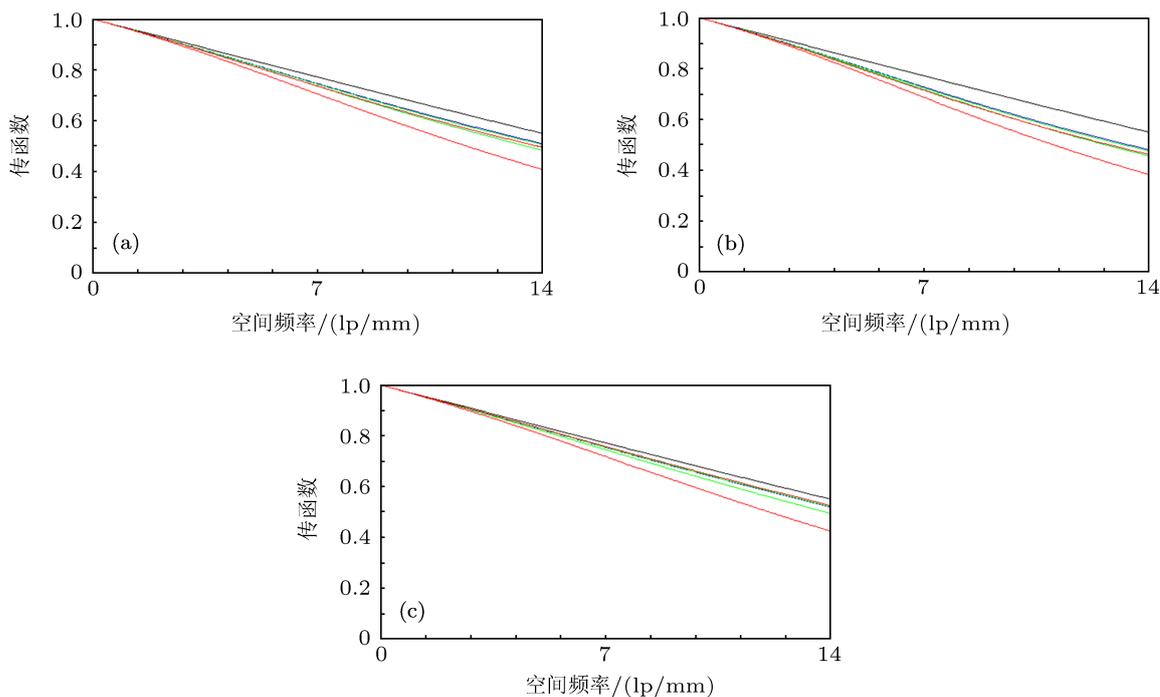


图 4 8.7—11.3 μm 波段各温度处的传函曲线 (a) -80°C ; (b) 60°C ; (c) 200°C

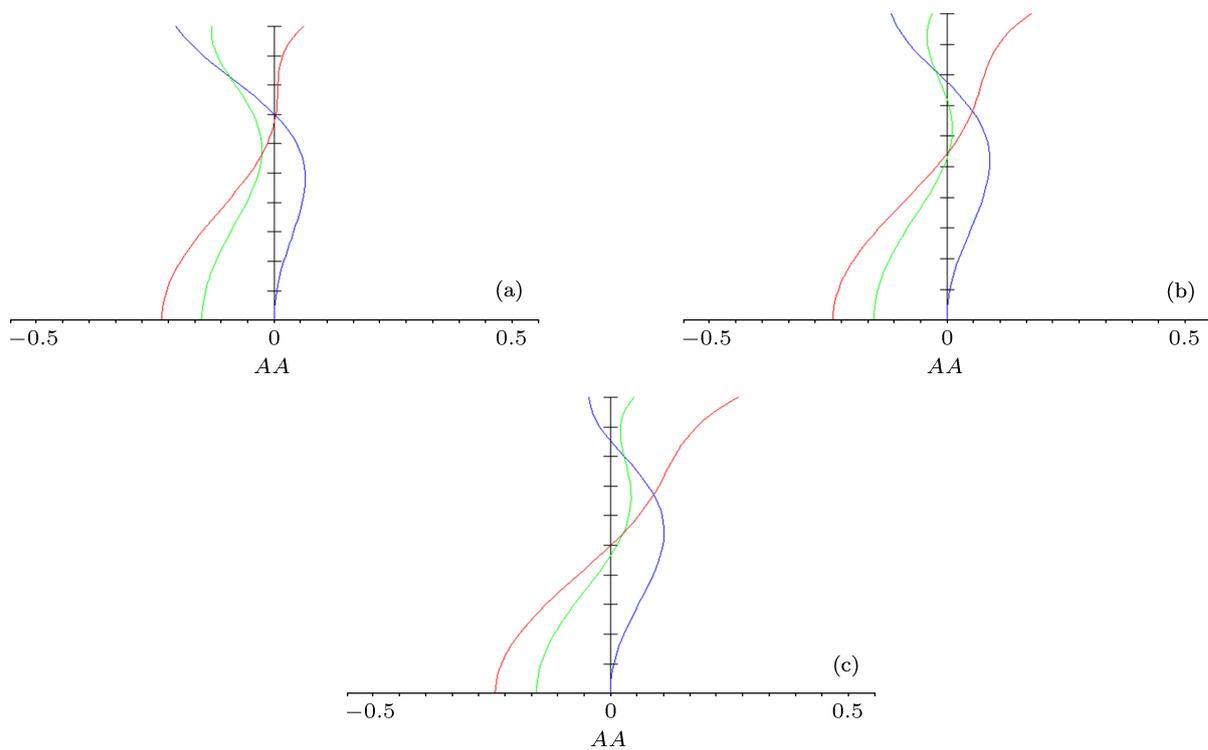


图5 3.7—4.8 μm 波段各温度处的轴向色差曲线 (a) -80 °C; (b) 60 °C; (c) 200 °C

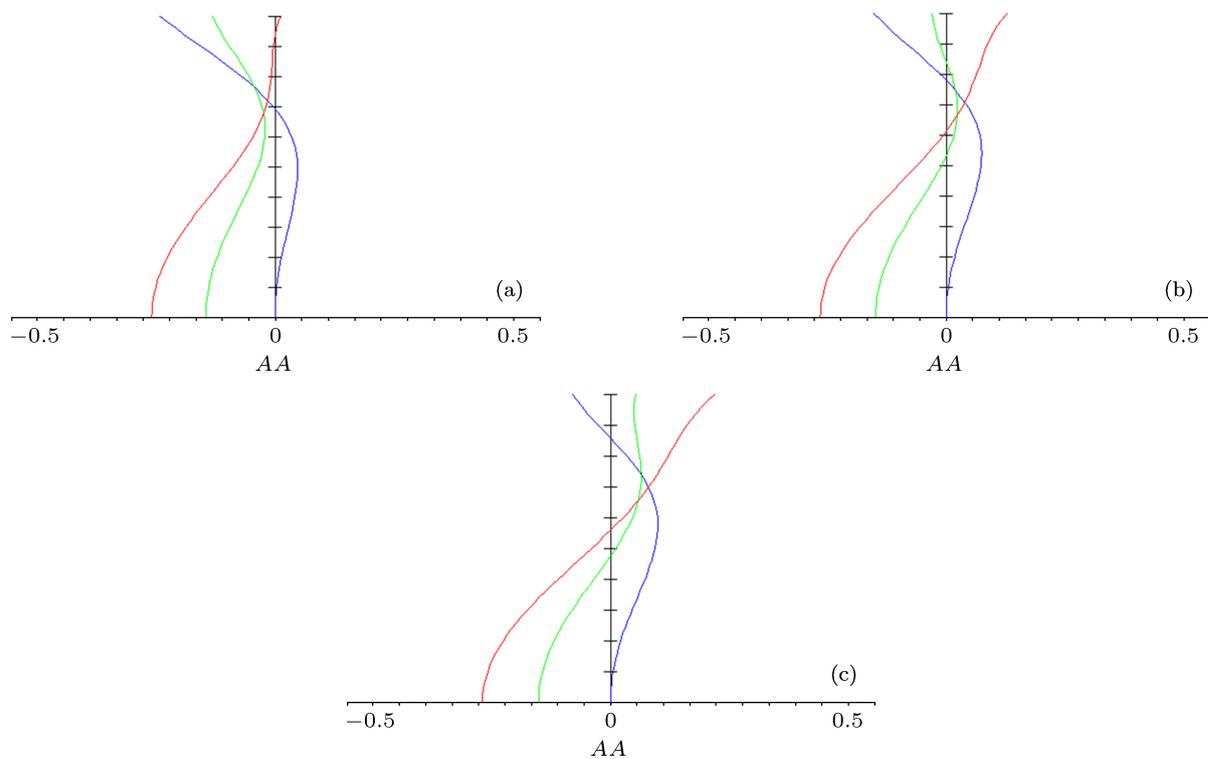


图6 8.7—11.3 μm 波段各温度处的轴向色差曲线 (a) -80 °C; (b) 60 °C; (c) 200 °C

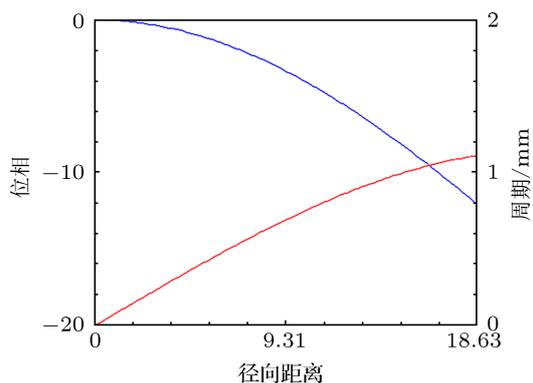


图7 衍射射面位相及周期和径向距离的关系

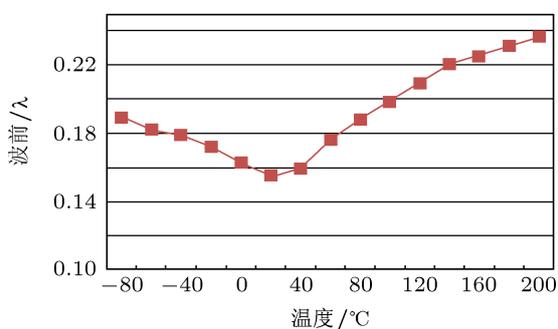


图8 3.7—4.8 μm 波段波像差与环境温度的关系

图8和9是系统分别工作在光谱范围3.7—4.8 μm和8.7—11.3 μm光谱时,在-80 °C—200 °C温度范围内光学系统波像差随环境温度的变化,由图可知系统-80 °C—200 °C温度范围内在两个波段的波像差稳定,按照“瑞利判据”,当实际波面与理想波面的最大差别不超过 $\lambda/4$ 时,该波面可看作无缺陷的,即该系统实现了减热差.根据光学系统焦深 $\delta = \pm 2\lambda(F/\#)^2$,可知系统3.7—4.8 μm光谱和8.7—11.3 μm光谱处的焦深分别为52.5 μm,125 μm,而双光谱光学系统在3.7—4.8 μm光谱和

8.7—11.3 μm光谱的最大离焦量为36.9 μm,46.9 μm,两个波段位置的最大离焦量均小于对应的焦深,系统满足要求.

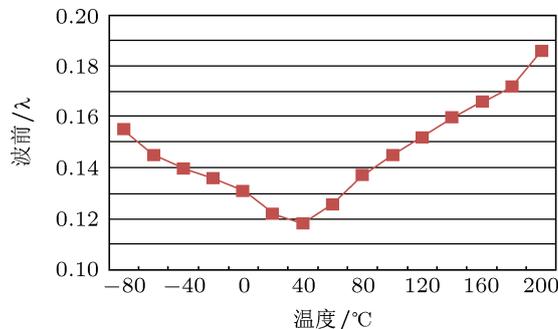


图9 8.7—11.3 μm 波段波像差与环境温度的关系

4 结论

本文讨论了投影消热差图设计方法和衍射元件特性及其光学成像理论,利用衍射光学元件特殊的色散原理和热特性,将衍射光学元件应用于红外搜索跟踪成像系统中,研制了一个仅用三片式并采用钛合金镜筒和常用红外光学材料的简单轻量化结构实现了红外搜索跟踪成像系统在双光谱宽温度范围内成像优良,系统可以在3.7—4.8 μm和8.7—11.3 μm双光谱范围对视野内的目标进行搜索跟踪,且在环境温度-80 °C—200 °C中依然能够稳定工作,衍射面为平面,特征尺寸较大,有利于加工制作,衍射光学双光谱红外搜索跟踪成像系统不仅能在中、长波双光谱内有很好的成像性能和消热差要求,而且使得结构紧凑简单、片数少、透射率高、体积小、重量轻、宽工作温度范围.

- [1] Zhang Y *Infrared and Laser Engineering*. **38** 583 (in Chinese) [张渊 红外与激光工程 **38** 583]
- [2] Wolf E, Born M 1981 *Principles of Optics* (Cambridge: Cambridge University) p439—450
- [3] Zhang X D, Li R G *Laser&Infrared*. **40** 801 (in Chinese) [张兴德, 李荣刚 激光与红外 **40** 8013]
- [4] Sun J X, Sun Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3900 (in Chinese) [孙金霞, 孙强 2007 物理学报 **56** 3900]
- [5] Smith D J, Gupta N 2005 *Proc. SPIE* **5881** 06
- [6] Sweeney, Sommargren 1995 *Applied Optics*. **14** 2469
- [7] Chen J J, Zhao J S 6008 *Infrared Technology*. **30** 279 (in Chinese) [陈津津, 赵劲松 6008 红外技术 **30** 279]
- [8] Xue H 6010 *Acta Optica Sinica*. **30** 2383 (in Chinese) [薛慧 6010 光学学报 **30** 2383]
- [9] Yasuhisa Tamagawa 2005 *Applied Optics*. **14** 2462
- [10] Tamagawa Y, Tajime T 2006 *Opt Eng*. **35** 3001
- [11] Sun Q, Yu B, Lu Z W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 756 (in Chinese) [孙强, 于斌, 卢振武 2004 物理学报 **53** 756]
- [12] Dong K Y, Sun Q, Li Y D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4602 (in Chinese) [董科研, 孙强, 李永大 2006 物理学报 **55** 4602]
- [13] Dubreuil D, Baudrand J, Abergel A, Bensammar S, Cretolle J B, Dargent P, Galdemard P 2003 *Proc. SPIE* **4850** 564
- [14] Davila P S, Bolcar M R, Bos B J, Bean B, Wilson M E 2006 *Proc. SPIE* **6265** 12
- [15] Lyons D M 1995 *Proc. SPIE* **2480** 123
- [16] Faklis D, Morris G M 1995 *Appl. Opt.* **34** 2462
- [17] Jamieson T H 2005 *Opt. Eng.* **20** 156

Design of an infrared dual-band search and tracking system operating in widen temperature range

Shen Man-De[†] Ren Huan-Huan

(Wuhan Textile University, Wuhan 430073, China)

(Received 3 October 2012; revised manuscript received 4 January 2013)

Abstract

Because a harmonic diffractive optical element has special achromatism and athermalization, it can be applied to infrared dual-band search and tracking optical system. In this paper, we make the device that can be used in the wavelength ranges 3.7—4.8 μm and 8.7—11.3 μm ; It has an efficient focal length 200 mm, the F /number 2.5, the full field of view is 5° . The environment temperature can be changed between -80°C — 200°C . The practical design shows that the system not only shows good image quality in mid-and long-wave, but also the advantages of compact structure, high rates of transmission and athermalization.

Keywords: spectral imaging, infrared searching, athermalization

PACS: 07.50.Ls, 07.57.Hm, 07.60.Hv

DOI: 10.7498/aps.62.090702

[†] Corresponding author. E-mail: opticaldesign@126.com