

红外双波段双视场消热差光学系统设计中消波段间色差条件(方法)的研究

曲 锐 邓 键

西南技术物理研究所, 四川 成都 610041

摘要 通过推导两个波段间由于色散特性差异导致的波段间色差,得到了描述波段间色散能力的波段间色差系数 P ,并结合光学系统光焦度方程、消色差方程和消热差方程,讨论了考虑材料波段间色散能力的消热差光学系统设计方法,完成了一个共光路红外双波段双视场光学系统的无热化设计。该系统 F 数为 2、焦距为 150 mm/50 mm、波长范围为 3.7~4.8 μm 和 7.7~10.3 μm , 共含有 8 片透镜, 3 个非球面, 在 -40 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 各视场均具有较好的成像质量和冷反射特性。

关键词 光学设计; 红外技术; 双波段; 双视场; 消热差

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0122006

Methods of Correcting Between-Band Chromatic Aberration in Infrared Dual-Band Dual-Field of View Athermalized Optical Design

Qu Rui Deng Jian

Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract The between-band chromatic dispersive power P is derived from the derivation of between-band chromatic aberration. A new achrothermal model considering the between-band chromatic aberration is prompted. Then, method of athermalized and multi-band zoom optical system is discussed. Based on this achrothermal model, a dual-band (MWIR/LWIR) dual-field of view optical system under the requirements of $F=2$, 150 mm/50 mm focal length, 3.7~4.8 μm and 7.7~10.3 μm waveband is designed with optical passive athermalization technology. The optical system, which consists of 8 lenses and 3 aspheric surfaces, has good image quality and Narcissus character at each field of view at -40 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$.

Key words optical design; infrared technology; dual-band; dual-field of view; athermalization

OCIS codes 220.3260; 220.2740; 220.1000

1 引 言

在进行多波段集成的光学系统设计时,由于同一材料在不同波段具有不同的色散特性,如材料锗,在长波红外(LWIR)波段具有较大阿贝数,类似于可见光波段的冕牌玻璃,在中波红外(MWIR)波段却具有较小的阿贝数,而可以起到类似于可见光波段中的火石玻璃的作用;不同材料在同一波段也具有不同的色散特性,如 ZnS 在长波红外波段就有着比锗更小的阿贝数,而在中波红外波段二者相近,甚至 ZnS 的阿贝数要小于锗。这样的材料特性给多波段集成光学系统设计中材料的选择带来较大困难^[1]。

而在采用传统的阿贝数、规化色差系数等量对材料的色散特性进行描述时,只能描述材料在单一波段内的色散特性,而无法描述材料在不同波段间的色散特性,导致在具体设计过程中需同时关注两个波段甚至更多波段的色散系数,使得设计过程较为不便。

收稿日期: 2014-07-11; 收到修改稿日期: 2014-09-03

作者简介: 曲 锐(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: qu_rui@foxmail.com

导师简介: 邓 键(1976—),男,博士,高级工程师,主要从事光学系统的设计、装调与检测等方面的研究。

E-mail: warhorse99@sina.com

本文对现有理论模型中存在的问题进行了分析,推导了描述两个波段间由于色散特性差异导致的波段间色差,得到了描述波段间色散能力的波段间色差系数,建立了相应的光学系统设计模型,并给出了设计实例与分析。

2 理论模型

2.1 消色差热差条件

为了便于论述,采用薄透镜理论对所涉及的模型进行描述。

一般的,为了使红外光学系统同时满足消热差和色差的要求,各透镜元件需满足光焦度方程、色差方程和消热差方程^[2-4],即光学系统中各元件需满足:

$$\begin{cases} \varphi = \frac{1}{h_i} \sum h_i \varphi_i \\ L_{1ch} = \frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum h_i^2 C_{1i} \varphi_{1i} \\ L_{2ch} = \frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum h_i^2 C_{2i} \varphi_{2i} \\ \alpha_L L = \frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum h_i^2 T_i \varphi_i \end{cases} \quad (1)$$

式中 φ_i 分别为各透镜的光焦度, φ 为光学系统光焦度, φ_{1i} 、 φ_{2i} 分别为每块透镜在两个不同波段的光焦度, h_i 为近轴孔径光线在各透镜表面的入射高, C_{1i} 、 C_{2i} 为每块透镜的在两个不同波段的归化色差系数,其值等于阿贝数的倒数, L_{1ch} 和 L_{2ch} 为两个不同波段波段内的位置色差, T_i 为各透镜的归化热差系数,其值为 $\left(\frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_g\right)$, n 为透镜材料的折射率, dn/dt 为透镜材料的折射率/温度系数, α_g 为透镜材料的膨胀系数, α_L 为镜筒材料的线膨胀系数, L 为镜筒长度。

虽然上述模型在一定程度上可以解决双波光学系统设计中的各波段内色差和热差问题,但其仍存在如下问题:

上述模型只考虑了两个波段各自波段内色差的校正,但没有考虑两个或多个波段波段间的色差校正,不能保证光学系统在同一像面位置对两个或多个不同波段成像质量良好;采用归化色差系数的描述虽然可以表征材料在某一波段中的色散特性^[3,5],但不能让人直观地认识到材料在两个或多个波段波段间的色散能力,造成材料选择上的困难。

虽然采用不同的方式方法求解上述模型^[2,4,6-7],可以部分地解决双波段光学系统材料选择中的问题,但仍未能给出一个具体的参量来表征材料在两个不同波段的色散特性差异,而且求解过程中都未能说明波段间色差的表征与校正问题。

2.2 消波段间色差条件

下述推导中,用下标 1c 表示波段一的中心波长位置,用下标 2c 表示波段二的中心波长位置,如 λ_{1c} 、 λ_{2c} 分别为各波段中心波长, ℓ_{1c} 、 ℓ'_{1c} 、 n_{1c} 、 φ_{1c} 分别表示对应波段一中心波长的物距、像距、材料折射率、元件光焦度。

考虑薄透镜成像关系^[8]:

$$\frac{1}{\ell'} - \frac{1}{\ell} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{f} \quad (2)$$

分别对两个不同波段应用上述关系式

$$\frac{1}{\ell'_{1c}} - \frac{1}{\ell_{1c}} = (n_{1c} - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \varphi_{1c} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\ell'_{2c}} - \frac{1}{\ell_{2c}} = (n_{2c} - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \varphi_{2c} \quad (4)$$

(3)式和(4)式相减,得

$$\frac{\ell'_{2c} - \ell'_{1c}}{\ell'_{1c} \ell'_{2c}} - \frac{\ell_{2c} - \ell_{1c}}{\ell_{1c} \ell_{2c}} = (n_{1c} - n_{2c}) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{(n_{1c} - n_{2c})}{(n_{1c} - 1)} \varphi_{1c}, \quad (5)$$

考虑 $\ell'_{1c} \approx \ell'_{2c} = \ell'$ 、 $\ell_{1c} \approx \ell_{2c} = \ell$ ，对(5)式左端作一阶近似，得

$$\frac{\ell'_{2c} - \ell'_{1c}}{\ell'^2} - \frac{\ell_{2c} - \ell_{1c}}{\ell^2} = (n_{1c} - n_{2c}) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{(n_{1c} - n_{2c})}{(n_{1c} - 1)} \varphi_{1c}. \quad (6)$$

若定义波段间色差系数为 P ，并有

$$P = \frac{(n_{1c} - n_{2c})}{(n_{1c} - 1)}, \quad (7)$$

记波段间色差为 L'_p ，则有

$$L'_p \frac{y^2}{\ell'^2} - L_p \frac{y^2}{\ell^2} = y^2 P \varphi \quad \text{or} \quad L'_p u'^2 - L_p u^2 = y^2 P \varphi, \quad (8)$$

若光学系统含有 k 个透镜元件，对每个透镜应用上述公式，则有

$$\begin{cases} L'_{p1} u_1'^2 - L_{p1} u_1^2 = y_1^2 P_1 \varphi_1 \\ L'_{p2} u_2'^2 - L_{p2} u_2^2 = y_2^2 P_2 \varphi_2 \\ \dots\dots\dots \\ L'_{pk} u_k'^2 - L_{pk} u_k^2 = y_k^2 P_k \varphi_k \end{cases} \quad (9)$$

将(9)式相加，并考虑 $u'_i = u_{i-1}$ ，有

$$L'_{pk} u_k'^2 - L_{p1} u_1^2 = \sum y_i^2 P_i \varphi_i, \quad (10)$$

此即为薄透镜模型的波段间色差计算公式。若物面位于无穷远处，有 $u_1 = 0$ ，可记为

$$L'_{pk} u_k'^2 = \sum y_i^2 P_i \varphi_i \quad \text{or} \quad L'_{pk} = \frac{1}{u_k'^2} \sum y_i^2 P_i \varphi_i = \frac{1}{(h_1 \varphi)^2} \sum h_i^2 P_i \varphi_i. \quad (11)$$

由于材料在两个波段色散特性的差异导致的波段间位置色差为

$$L'_p = \frac{1}{(h_1 \varphi)^2} \sum h_i^2 P_i \varphi_i. \quad (12)$$

考虑光学系统的艾里判据，即与波段间色差相对应的波像差小于四分之一波长时，可认为光学系统在两个不同波段都成完善像^[9]，此时有

$$|L'_p| \leq 2\lambda_{1c} (F/\#)^2 + 2\lambda_{2c} (F/\#)^2, \quad (13)$$

此即为消波段间色差条件。

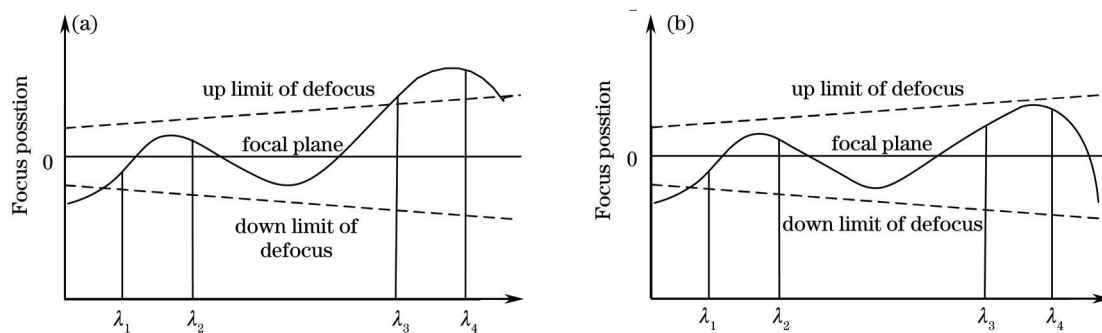


图 1 (a) 校正波段内色差而未校正波段间色差; (b) 波段内和波段间色差都得到校正

Fig. 1 (a) Optical system with only in-band chromatic aberration correction; (b) optical system with both in-band and between-band chromatic aberration correction

由此，可以在光学系统优化设计过程中，加入波段间相对离焦量为控制变量，约束该值小于两个波段焦深之和，对系统优化进行控制。另外，由(13)式也可以看出，减小波段间色差的方法类似于光学系统中减小

位置色差的方法^[10]:使用波段间色差系数较小的材料,控制元件表面光线的入射高,负光焦度元件采用波段间色差系数较大的材料等。

2.3 对设计方法的讨论

结合(1)式和(12)式可得,双波段光学系统设计中需满足光焦度、消波段内色差、消波段间色差和消色差方程组:

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi &= \frac{1}{h_i} \sum h_i \varphi_i, & (14) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} L_{1\text{ch}} &= \frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum h_i^2 C_{1i} \varphi_{1i}, & (15) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} L_{2\text{ch}} &= \frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum h_i^2 C_{2i} \varphi_{2i}, & (16) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} L'_p &= \frac{1}{(h_1 \varphi)^2} \sum h_i^2 P_i \varphi_i, & (17) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_L L &= \frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum h_i^2 T_i \varphi_i, & (18) \end{aligned} \right.$$

注意到(14)~(18)式述方程组(15)~(17)式为光学系统消色差项,在选定了相应材料组合后,该三式并不相互独立;而且,(17)式为不等式方程,满足(13)式即可,故而,使得上述模型可以存在3种材料组合、4种材料组合或5种材料组合的双波段光学系统消色差热差解。

在进行定焦光学系统的设计时,由于整个光学系统各组元相对固定不动,参考上述模型方法,经过选择合理结构型式、选择材料组合、初始结构参数计算、系统优化和像质评价后,通常即可以获得较好的设计结果。

但对于变焦距光学系统,由系统中存在可变组元,在视场(FOV)切换的过程中,光线在元件表面的入射高发生变化,导致系统色差热差等都可能发生较大变化。为避免将上述消色差方程与变焦距光学系统初始结构参数求解相混合,以致设计过程变得复杂,较好的解决方法是获得系统各镜组光焦度分配后,对变焦系统各镜组进行单独消色差热差,再组合消色差和热差。前固定组通常承担主要光焦度,进行单独的消色差设计;后固定组和中继组等其它固定镜组则主要起补偿前组剩余像差的作用,同时承担部分光焦度;而变倍组镜片通常较少,不能进行单独消色差设计,此时,需要尽量选择波段间色散能力较弱的材料或材料组合,以保证变倍组引入的色差尽可能小^[11]。

3 设计实例与分析

选用一个具体设计实例对上述方法进行说明讨论。设计实例中所选用3.7~4.8 μm和7.7~10.3 μm双色红外焦平面探测器,像元数为320 pixel×256 pixel,单个像元尺寸为30 μm×30 μm,探测器焦平面对角线长度为12.32 mm,镜筒材料采用普通铝合金材料。具体设计指标如表1所示。为了缩短光学系统总长,采用一次成像的方式进行设计,采用轴向移动式两档变倍系统结构作为双视场变焦光学系统的初始结构。利用双视场变焦初始结构求解方法对各组元光焦度进行分配^[12-13]。

表1 设计指标

Table 1 Design requirements

Parameter	Value
Work wavelength /μm	3.7~4.8 & 7.7~10.3
Field of view	3.6°×2.9°/10.9°×8.7°
Effective focal length /mm	150/50
<i>F</i> -number	2
Overall length /mm	<210
Temperature range /°C	-40~ 60

若只考虑中长波红外双波段,则可定义波段间色差系数为

$$P_{3-12\mu\text{m}} = \frac{(n_{4\mu\text{m}} - n_{10\mu\text{m}})}{(n_{4\mu\text{m}} - 1)} \quad (19)$$

如表2所示,是常用红外中长波双波段材料性能参数表。从表2中可以看出,硅具有较小的波段间色差系数,但硅材料的在长波红外波段的透射率不高,此处不予采用;而BaF₂虽然有较大的波段间色散系数,可以用于波段间色差的校正,但由于BaF₂对波长大于10 μm的红外辐射透过率较低,故此处也不予采用^[14-15]。

表2 常用中长波红外双波段材料性能参数表

Table 2 Performance of some typical infrared dual-band materials

Material	Index of refraction		Chromatic dispersive power		Thermal dispersive power	Between-band chromatic dispersive power
	$n_{4\mu\text{m}}$	$n_{10\mu\text{m}}$	$C_{3.0-5.0\mu\text{m}} / \%$	$C_{8.0-12.0\mu\text{m}} / \%$	$T / (10^{-5} / \text{K})$	$P_{3.0-12.0\mu\text{m}} / \%$
Germanium	4.0224	4.0036	0.99	0.10	12.61	0.63
Silicon	3.4254	3.4177	0.50	0.05	6.07	0.32
ZnSe	2.4331	2.4067	0.50	1.71	3.77	1.88
ZnS	2.2501	2.1983	0.91	4.36	3.02	4.32
IRG205	2.6239	2.6052	0.57	0.92	3.00	1.15
GASIR-1	2.5100	2.4944	0.51	0.84	1.98	1.03
AMTIR-1	2.5146	2.4981	0.50	0.91	3.61	1.09
GaAs	3.3070	3.2781	0.68	1.53	5.58	1.27
BaF ₂	1.4567	1.4144	2.22	5.91	-5.51	9.26

采用常用的ZnSe、ZnS和锗三种材料的组合作前固定组,单独消除热差、两个波段间色差和各自波段内色差,并可残余少量热差和色差;采用波段间色差能力较弱的锗材料作变倍组,以保证系统在两个不同视场位置时都具较小的残余波段间色差;后固定组采用校正波段间色差和系统残余热差能力较强的材料组合GaAs、锗、ZnS和IRG205。其中,ZnS的波段间色散能力较强,主要用于校正残余波段间色差;具有较大热差系数的锗用于补偿系统残余热差;而GaAs和IRG205主要用来校正各自波段内色差和热差。

采用CodeV软件对上述光学系统进行优化分析^[16],优化结果如图2所示。所述光学系统中共含有三个平面和三个非球面,其中,非球面分别位于第9面、第13面和第16面,主要用来校正系统残余高级像差。另外,通过弯曲不合适表面及镀制双波段红外减反膜的方法,在每个表面反射率都为1%的情况下,整个光学系统在窄视场时,中波红外冷反射产生温差(NITD)(<0.2 K),长波红外NITD(<0.3 K);宽视场时中波红外NITD(<0.4 K),长波红外NITD(<0.8 K),满足工程化应用要求。另外,长短焦位置,系统光阑皆固定于探测器冷光阑上,保证了系统具有100%冷光阑效率。

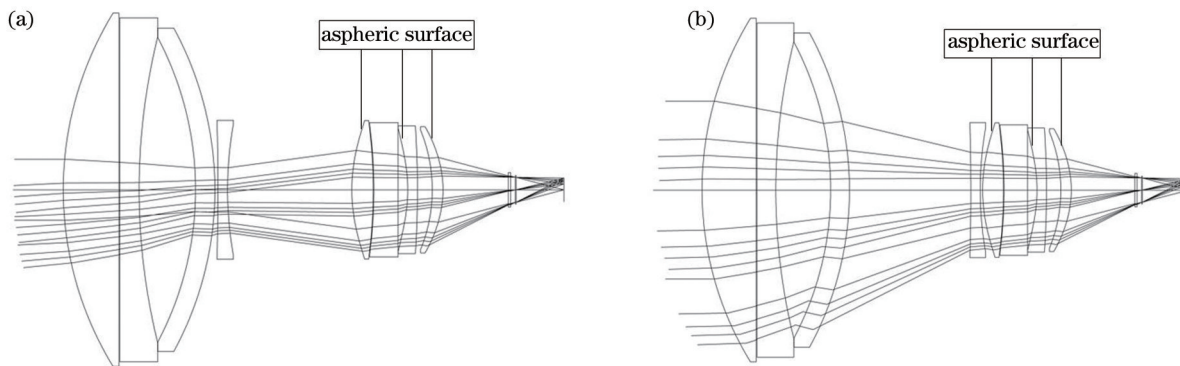


图2 共光路红外双波段双视场消热差光学系统示意图。(a)长焦;(b)短焦

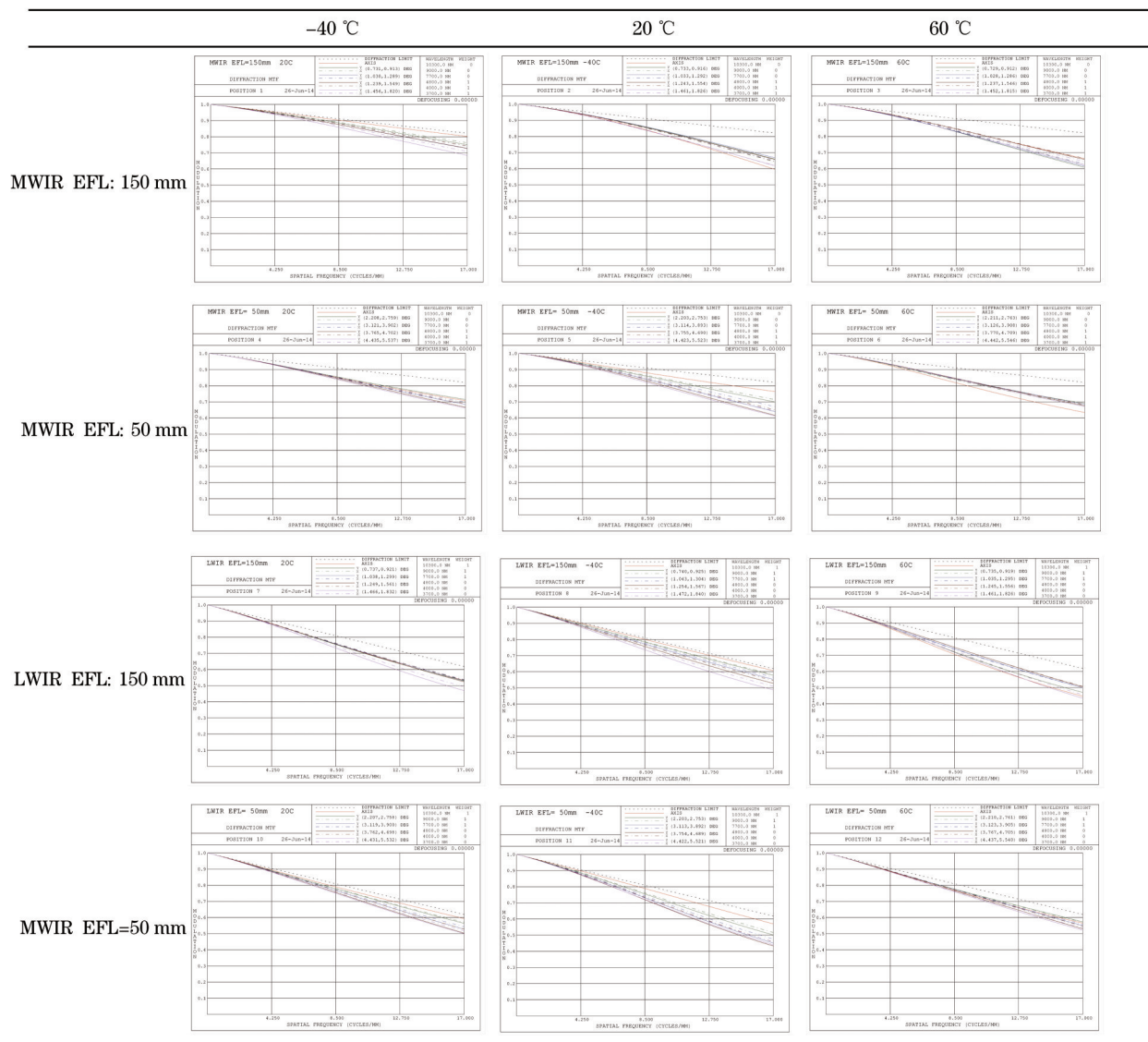
Fig.2 Diagram of dual-band dual-FOV athermalized optical system. (a) Long focus; (b) short focus

对上述光学系统不同温度不同视场的调制传递函数(MTF)评价对比如表3所示,图中横轴最大值为截止频率17 lp/mm。结果表明,所设计的光学系统在不同温度不同视场且截止频率为17 lp/mm处,MTF均大于

0.4,表明该系统具有较好的成像质量,也证明了上述设计方法的可行性。

表 3 不同温度不同视场下 MTF 评价曲线对比表

Table 3 MTF comparison of dual FOV dual band optical system at -40 °C, 20 °C and 60 °C



4 结 论

通过引入波段间色差和表征材料波段间色散能力的波段间色散系数,降低了双波段或多波段光学系统的设计难度。建立了一种考虑了波段间色差的多波段光学系统设计模型,并讨论了相应光学系统的设计方法,通过该模型方法获得的红外双波段双视场光学系统,体积小、结构紧凑、透射率高,在全温度范围内都具有较好的成像质量和冷反射特性,可望在红外预警、观瞄跟踪等领域获得广泛应用。设计实例同时表明,该模型方法可用于类似要求光学系统的设计。

参 考 文 献

- 1 Jay N Vizgaitis. Optical concepts for dual band infrared continuous zoom lenses [C]. SPIE, 2010, 7652: 76522E.
- 2 Y Tamagawa, T Tajime. Dual-band optical systems with a projective athermal chart: design [J]. Appl Opt, 1997, 36(1): 297-301.
- 3 Y Tamagawa, T Tajime. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart [J]. Optical Engineering, 1996, 35(10): 3001-3006.
- 4 Zhang Chunyan, Shen Weimin. Design of an athermalized MWIR and LWIR dual band optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1323-1328.

- 张春艳, 沈为民. 中波和长波红外双波段消热差光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1323-1328.
- 5 Hu Yuxi, Zhou Shaoxiang, Xiangli Bing, *et al.*. Design of athermal optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1386-1391.
- 胡玉禧, 周绍祥, 相里斌, 等. 消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1386-1391.
- 6 N A Thompson. Optical design of common aperture, common focal plane, multispectral optics for military applications [J]. Optical Engineering, 2013, 52(6): 61308.
- 7 S Scott, H Eric, C Amber, *et al.*. Refractive lens design for simultaneous SWIR and LWIR imaging [C]. SPIE, 2011, 8012: 801224.
- 8 R Kingslake, R B Johnson. Lens Design Fundamentals [M]. Burlington: Academic Press, 2010. 137-167.
- 9 R E Fischer, B Tadic-Galeb, P R Yoder, *et al.*. Optical System Design [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 2000. 49-58.
- 10 J S Warren. Modern Optical Engineering: the Design of Optical Systems [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 2008. 473-494.
- 11 Deng Jian, Wu Hui, Zhong Xiaobing, *et al.*. Common optical path common focal plane infrared dual-band zoom optical system China, CN103197407A [P]. 2013-07-10.
- 邓 键, 吴 辉, 钟小兵, 等. 共光路红外双波段共焦面变焦光学系统: 中国, CN103197407A [P]. 2013-07-10.
- 12 N A Muhammad, H A Muhammad. A step-zoom dual field of view IR telescope [C]. SPIE, 2002, 4832: 328-333.
- 13 K H Lee. First-order computation for re-imaging IR optical systems [C]. SPIE, 2003, 5076: 123-129.
- 14 M J Weber. Handbook of Optical Materials [M]. New York: CRC Press, 2003.
- 15 W Moriaki, K Keiei, S Tahkhisa. Physical Properties and Data of Optical Materials [M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2009.
- 若木守明, K Keiei, S Tahkhisa, 等. 光学材料手册[M].北京: 化学工业出版社, 2009.
- 16 Optical Research Associates. Code V Reference Manual [M]. Pasadena: Optical Research Associates, 2009.

栏目编辑: 韩 峰