

基于波前编码的红外光学系统消热差设计研究

张发强^{1*}, 冯斌², 李洪顺³

¹西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032;

²西北工业大学自动化学院信息融合技术教育部重点实验室, 陕西 西安 710072;

³解放军 31697 部队, 辽宁 大连 116103

摘要 消热差是红外光学系统设计的重要环节之一, 本文介绍使用波前编码技术进行红外光学系统消热差设计的原理及方法, 分析波前编码的基本原理, 给出波前编码光学系统调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 的表达式。在此基础上, 以三片式长波红外光学系统为例, 利用 ZEMAX 光学设计软件分析其在常温 (+20 °C)、-40 °C 和 +60 °C 下的成像质量。分析结果表明, 该系统在常温下的成像质量接近衍射极限, 但是当温度在 -40 ~ +60 °C 之间变化时, MTF 值迅速下降且出现零点, 说明系统的成像质量急剧恶化, 不再满足使用要求。加入波前编码相位版进行消热差设计后, MTF 值对温度不再敏感, 在不同温度下可以得到较为清晰的目标图像, 表明波前编码技术可以实现红外光学系统的消热差设计。

关键词 几何光学; 红外光学系统; 波前编码; 消热差; 调制传递函数; 相位版

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2208001

Research on Athermalization Design of Infrared Optical System Based on Wavefront Coding

Zhang Faqiang^{1*}, Feng Bin², Li Hongshun³

¹Department of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China;

²Key Laboratory of Information Fusion Technology of Ministry of Education, School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;

³Unit 31697 of PLA, Dalian, Shenyang 116103, China

Abstract Athermalization is one of the important aspects of infrared optical system design. This article introduces the principle and method of athermalization design of infrared optical system using wavefront coding technology, analyzes the basic principles of wavefront coding, and gives the expression of modulation transfer function (MTF) of wavefront coding optical system. On this basis, the image quality of the three-plate long-wave infrared optical system at room temperature (+20 °C), -40 °C and +60 °C is analyzed by using ZEMAX optical design software. The analysis results show that the imaging quality of the system is close to the diffraction limit at room temperature, but when the temperature changes between -40 °C and +60 °C, the MTF value decreases rapidly and appears zero, indicating that the imaging quality of the system deteriorates sharply and no longer meets the requirements of use. The MTF value is no longer sensitive to temperature when the wavefront coding phase plate is added to the design of dethermal error, and a clearer target image can be obtained at different temperatures, indicating that the wavefront coding technology can realize the athermalization design of the infrared optical system.

Key words geometric optics; infrared optical system; wavefront coding; athermalization; modulation transfer function; phase plate

OCIS codes 080.3620; 090.1995; 100.2550

收稿日期: 2020-11-28; 修回日期: 2020-12-28; 录用日期: 2021-01-27

基金项目: 2020 年度航天科学技术基金(2020-HT-XG)

通信作者: *zhruai_1981@163.com

1 引言

近年来,红外光学系统在军事、工业和医疗等领域获得了广泛的应用。红外光学系统一般工作温度范围较宽,并且红外光学材料的折射率温度系数较大,如常用的单晶锗的折射率温度系数为 $3.96 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,而常用的可见光 K9 玻璃则只有 $2.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,前者是后者的 100 多倍^[1-2]。在红外光学系统中,温度对折射率的影响尤为明显,即容易发生热离焦的现象,这个现象会严重影响红外光学系统的成像质量,所以在设计红外光学系统的过程中,通常需要进行消热差的设计^[3-5]。

传统的消热差方法主要有机械被动式、机电主动式和光学被动式三种,但是这三种方法都存在一定的缺点。机械被动式和机电主动式虽然容易实现,但是都只能补偿像面位移,无法进行焦距的补偿,而且需要使用机械装置,使得系统复杂化,体积和质量均增加,可靠性降低;光学被动式尽管结构简单,外形尺寸小,不需供电,系统可靠性高,但是目前能够满足这种设计方式的红外光学材料种类较少且价格昂贵,而且需要有多种非球面透镜相互配合,设计和加工难度都很大^[6-8]。

与传统的光学设计方法不同,波前编码技术的设计思路是将光学设计和数字图像处理结合,即光数混合技术,该技术属于计算光学研究领域。波前编码技术对光学系统的波面相位进行编码调制突破了传统光学设计的极限,实现了系统对离焦的“不敏感”,从而扩展了系统的焦深范围,将其应用在光学设计中是一个创新。波前编码技术包括光学调制编码和图像复原解码两个步骤,这种结合光学设计和数字图像处理的技术能够在很大的焦深范围内取得接近衍射极限的成像质量,而且相比于机械被动式和机电主动式不需要增加复杂的机械系统,相比于光学被动式不需要增加额外的光学元件,只需在光阑处放置一块经过编码处理的相位版。波前编码技术结

合数字图像处理技术可以实现消热差,这是一种简单有效且可靠性较高的红外光学系统消热差方法^[9-12]。

自 1995 年美国科罗拉多大学的 Dowski 和 Cathey 首次将波前编码元件^[13],即相位掩模版引入光学系统中,经过 20 多年的发展波前编码技术取得了丰富的成果。美国的科罗拉多大学和 CMD 公司在波前编码相位版的研制和应用方面进行了大量的研究,此外英国 Heriot-Watt 大学在利用波前编码技术延拓焦深方面展开了大量研究,证明该技术可以降低光学系统的球差并能够增加系统的焦深。国内关于波前编码技术的研究起步较晚,目前浙江大学、哈尔滨工业大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、北京理工大学和天津大学等单位都对波前编码技术进行了相关研究,主要集中在理论和仿真方面,而且对成像特性和相位版优化等进行了较为深入的研究,但与国外相比有一定的差距,国内成熟的波前编码产品较少,大部分在实验研究阶段^[14-15]。

本文采用波前编码技术对红外光学系统进行消热差设计,在分析波前编码原理的基础上结合一套长波红外光学系统进行具体的消热差设计,主要工作包括编码版和解码器的设计,本文的研究对红外光学系统消热差设计的稳定性和系统的轻量化具有一定的指导意义。

2 波前编码消热差方法的基本原理

波前编码方法的基本原理是利用相位掩模版对非相干光的波前进行相位调制,使系统的点扩展函数和光学传递函数在一个较大的焦深范围内对离焦不敏感。由探测器采集编码后模糊程度一致的中间图像,因光学系统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 不具有零区域,所以图像信息没有丢失,此时可以通过数字滤波器对图像进行解码,从而获得较为清晰的像。在二维的情况下,以三次相位版为例,光学系统的归一化光瞳函数^[16-17]为

$$P(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \exp[j\alpha(x^3 + y^3)], & |x| \leq 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: (x, y) 为归一化坐标; α 为三次相位版的参数,用来控制离焦不敏感的程度。

根据稳向法可以得到 MTF 的近似表达式,即

$$H(u, \varphi) = \begin{cases} \left| \frac{\pi}{12\alpha u} \right|^{1/2} \exp\left(\frac{i\alpha u^3}{4}\right) \exp\left(\frac{i\varphi^2 u}{3\alpha}\right), & u \neq 0 \\ 1, & u = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中： u 为空间频率； φ 为离焦参数。由(2)式可以看到相位因子由两项组成，其中第一项是与离焦参数无关的相位因子 $\exp(iau^3/4)$ ，第二项是与离焦参数有关的相位因子 $\exp(i\varphi^2 u/3\alpha)$ ，只要相位版的参数 α 值足够大， $\exp(i\varphi^2 u/3\alpha)$ 值就趋向于 1，第二项相位因子对传递函数的影响可以忽略不计，则(2)式可以简化为

$$H(u, \varphi) \approx \begin{cases} \left| \frac{\pi}{12\alpha u} \right|^{1/2} \exp\left(\frac{iau^3}{4}\right), & u \neq 0 \\ 1, & u = 0 \end{cases} \quad (3)$$

由(3)式可以看到，MTF 值与离焦量 φ 几乎没有关系，即在很大的离焦范围内能够保持 MTF 值不变，这扩大了系统的离焦范围，并且可以利用系统

自身的点扩展函数(Point Spread Function, PSF)作为滤波器，对中间模糊图像进行滤波可以得到比较清晰的成像，即波前编码扩展了光学系统的焦深^[18]。

3 消热差红外光学系统的设计

3.1 普通红外光学系统的热差性能分析

以前期设计的一个长波红外光学系统为例，对其进行波前编码消热差的设计。该系统选用像元数为 320×256 和像元尺寸为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 的非制冷红外焦平面探测器件，其工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ ，相关的设计指标如表 1 所示，其中 FoV 为光学系统的视场， F 为光学系统的系统焦距和通光口径的比值。

表 1 光学系统的指标

Table 1 Indicator of optical system

Operating waveband / μm	Focal length /mm	FoV / $^\circ$	F	Temperature / $^\circ\text{C}$	Nyquist frequency /($\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$)
8-12	45	10	1.5	-40-+60	20

光学系统的光路结构和具体参数分别如图 1 和表 2 所示，其中 STO 和 IMA 分别为光阑面和像面。

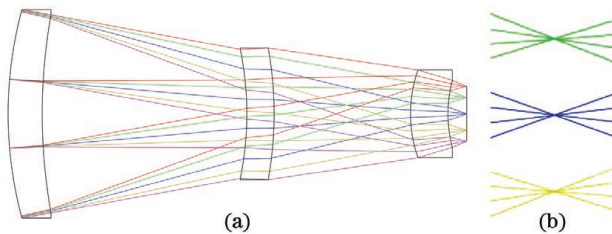


图 1 光学系统的光路结构。(a)整体结构；
(b)焦平面处的光线

Fig. 1 Optical path structure of optical system.

(a) Overall structure; (b) rays at focal plane

表 2 光学系统的结构参数

Table 2 Structural parameters of optical system

Surface No.	Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
STO	Standard	58.071	5.000	Ge
2	Standard	81.347	30.000	
3	Standard	-46.575	4.000	ZnSe
4	Standard	-53.309	20.000	
5	Standard	19.138	5.500	Ge
6	Standard	19.091	2.732	
IMA	Standard	Infinity		

为了体现波前编码的效果，元件表面均采用了球面，未使用非球面。从图 1 可以看到，光线通过系统后聚焦在焦平面处，在会聚到焦平面后会以相同的角度发散，这会造成光线的密集程度随光轴的变化而急剧变化，能量的密集程度随之下降，一旦由外界因素造成焦平面偏移，成像质量会出现明显下降，这是普通光学系统不可避免的缺点。

MTF 与光学系统的像差和衍射有关，其能够反映光学系统对景物不同频率成分的强度传递能力，具有客观性和可靠性。本文选用基于 MTF 的优化方法，将 MTF 的变化程度作为系统的衡量准则需要对红外光学系统在不同温度下的 MTF 进行分析，以此来评价光学系统的整体成像质量。本文所选的长波红外光学系统在 $-40, +20, +60 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的 MTF 如图 2 所示。

图 2 中的横坐标为空间频率，取值范围为 $0 \sim 20 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，纵坐标为 MTF 值，代表的是不同空间频率处图像强度对比度。从图 2 可以看到，系统的 MTF 曲线在 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ 的情况下急剧下降，在特征频率为 $20 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处接近于 0，这远远小于衍射限的 MTF 值，而且在 $20 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 以内的 MTF 值出现零点，即系统没有对景物在特定空间频率的强度调制对比度传递能力的度量，而且相关的图像信息丢失，这是光学系统不允许出现的情况。综上可知，温度的变化会严重影响红外光学系统的成像质量，因此对普通长波红外光学系统进行消热

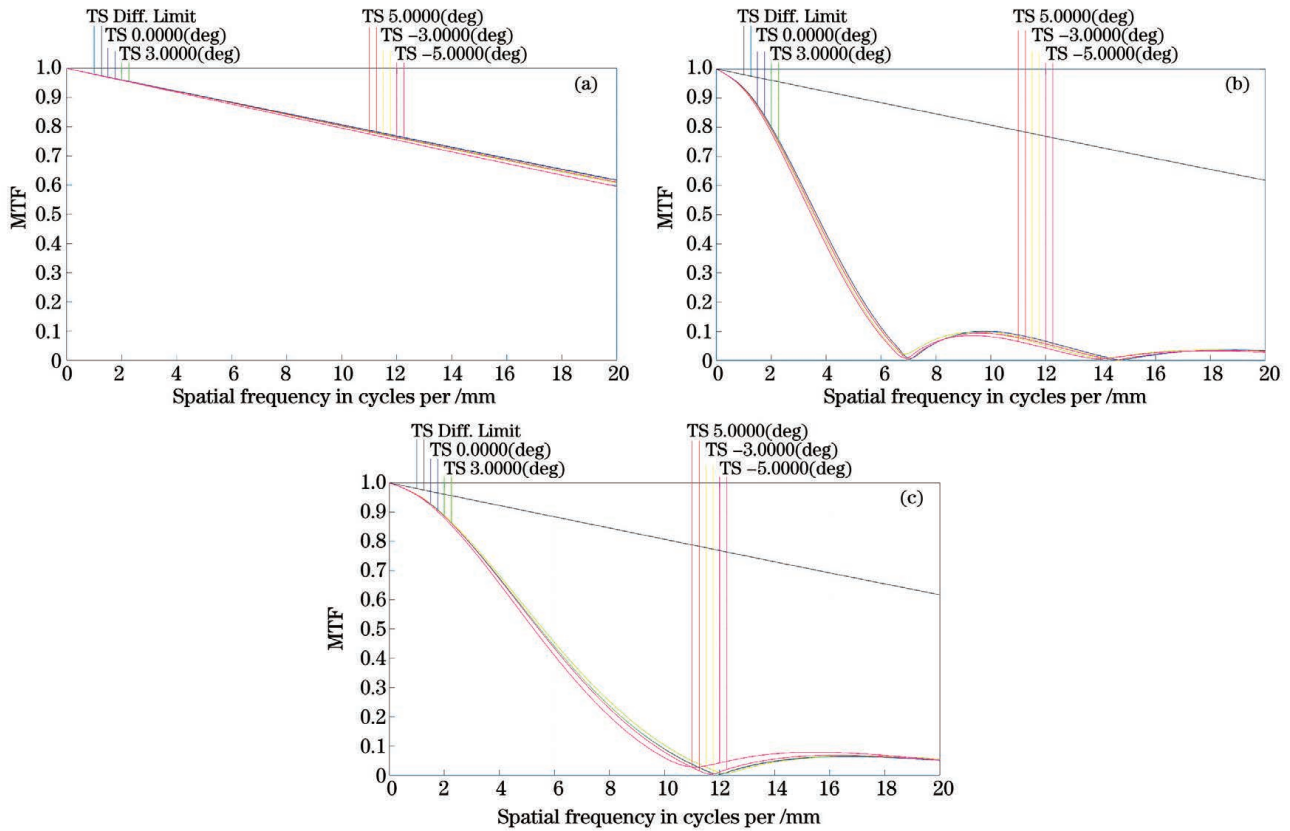


图 2 普通红外光学系统在不同温度下的 MTF 曲线。(a) +20 °C ;(b) -40 °C ;(c) +60 °C

Fig. 2 MTF curves of ordinary infrared optical systems at different temperatures. (a) +20 °C ;(b) -40 °C ;(c) +60 °C

差设计是有必要的。

3.2 编码相位版设计和成像质量评价

本文的波前编码系统采用的是非对称三次相位版,非对称相位版相对于对称相位版在降低光学系统对离焦敏感的能力方面更为优越,并且目前非对称三次相位版的制作检测也比较成熟。根据第 2 节的理论分析,对于三次相位版的设计主要是求出其合适的相位参数 α 以控制光学系统对离焦的不敏感程度。具体利用 ZEMAX 软件自带的扩展宏程序 (ZEMAX Programming Language, ZPL) 和 MATLAB 软件进行相位版参数的求解和数据处理,相位版一般插在系统光阑处,利用 ZEMAX 软件中的扩展多项式进行相位版的模拟,其实质是在不同视场中采集不同温度下 MTF 每一线对的数值,再与常温状态的 MTF 每一线对的数值进行比较,从而计算出合适的相位版参数 α ^[19]。

以 MTF 为评价标准,按照上述流程求取不同的相位版参数 α ,再获得不同温度下各个视场的 MTF 与常温 (+20 °C) 下 MTF 的误差,并结合 MATLAB 软件进行数据处理,数据处理的原则是在误差最小的情况下,确保光学系统在截止频率处

的 MTF 值大于 0.2 以满足成像要求。不同相位版参数 α 下 MTF 值及其误差曲线如图 3 所示。

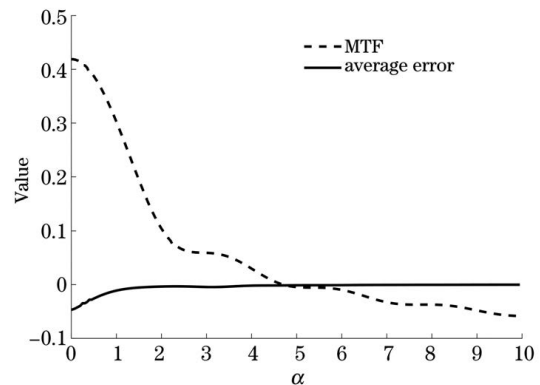


图 3 数据处理图

Fig. 3 Data processing diagram

图 3 中的横坐标为相位版参数 α 的取值,纵坐标分别为 MTF 值和平均误差值。从图 3 可以看到,既要确保在 $20 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 特征频率下的 MTF 值大于 0.2,又要确保在不同温度和常温下的 MTF 误差值趋近于 0,最后确定三次相位版参数 α 值为 4.8,此时 MTF 在不同温度下以及不同视场下的一致性都较其他数值好。

根据计算结果可知,在系统光阑处加入相位版,ZEMAX 软件中选择的表面类型均为扩展多项式,最大项数取 9,其中 x 和 y 的三次方系数均取

4.8,其他项的系数取 0,最终光路结构如图 4 所示,结构参数如表 3 所示,其中各透镜之间的间隔与表 2 相同。

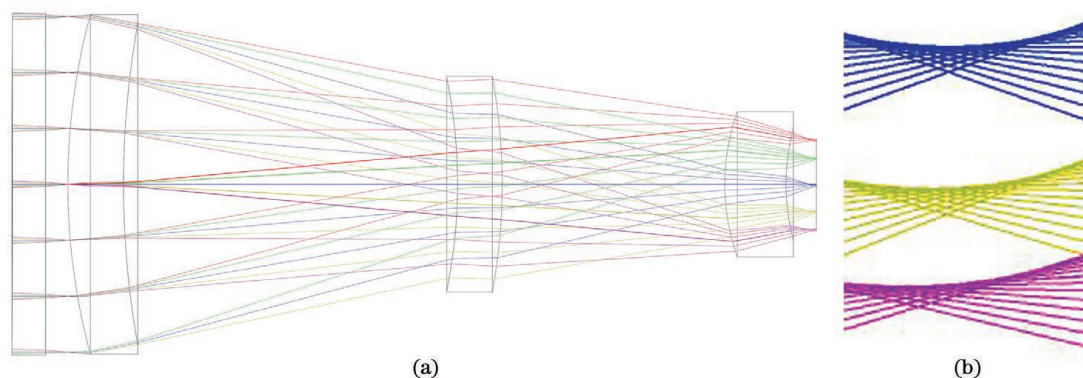


图 4 波前编码红外光学系统的光路结构。(a) 整体结构;(b) 焦平面处光线

Fig. 4 Optical path structure of wavefront coding infrared optical system. (a) Overall structure; (b) rays at focal plane

表 3 波前编码红外光学系统的结构参数

Table 3 Structural parameters of wavefront coding infrared optical system

Parameter	1	2(STO)	3	4
Type	Extended polynomial	Standard	Standard	Standard
Radius /mm	∞	58.071	-46.575	19.138
Thickness /mm	∞	81.347	-53.309	19.091
Thickness /mm	3.0	5.0	4.0	5.5
Glass	ZnSe	Ge	ZnSe	Ge
Semi-diameter	15.29	15.19	9.65	6.50

从图 4 可以看到,光线经过相位版调制后,在焦平面处没有明确会聚于一点,而是在焦平面附近形成一束均匀的细光束,因此系统生成一个模糊的像,并且在焦点附近比较大的区域内光线结构十分稳定,能量均匀分布,如果系统的焦平面出现偏移,那么在像空间的一定范围内,系统的成像也不会出现太大变化。经过波前编码后红外光学系统的 MTF 曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看到,虽然温度发生了改变,但系统的 MTF 一致性较好,在截止频率为 $20 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处 MTF 值约为 0.2,而且没有出现零点,说明目标信息能够很好地传递进成像系统中,即温度的变化不再是影响系统成像质量的主导因素,实现了对红外光学系统的无热化处理。

下面从系统的 PSF 角度来分析波前编码对红外光学系统的影响,不同温度下普通红外光学系统和波前编码红外光学系统的 PSF 如图 6 所示。

图 6 为光学系统像面上的 PSF,其中横坐标轴和纵坐标轴表示在像面上横向和纵向的取样大小,

可以看出普通红外光学系统在焦点处 PSF 的相对辐射强度近似于 1,当温度发生变化时,PSF 的峰值辐射强度急剧下降,弥散斑的半径也迅速增大;波前编码系统由于加入相位版,所以光线变得不集中,不同温度下的 PSF 分布趋于一致且相对稳定,说明波前编码光学系统的性能随温度的变化很小,趋于一种稳定状态,达到了消热差的目的。

根据上面的分析,由红外光学系统波前编码前后的 MTF 和 PSF 对比可以看到,不论是在频域上的 MTF,还是在时域上的 PSF,都证明了波前编码可以在较大的温度范围内实现红外光学系统的消热差设计。

3.3 解码器设计及图像复原

加入相位版后,红外光学系统的 MTF 在一定范围内对离焦不敏感,但是 MTF 值却出现下降,其所成的像是一个模糊程度一致的像,为此需要进行图像复原,即对中间模糊图像进行滤波解码以得到清晰的图像。解码的方法一般利用傅里叶变换在频域中进行,其中卷积核采用波前编码系统在 $+20 \text{ }^\circ\text{C}$

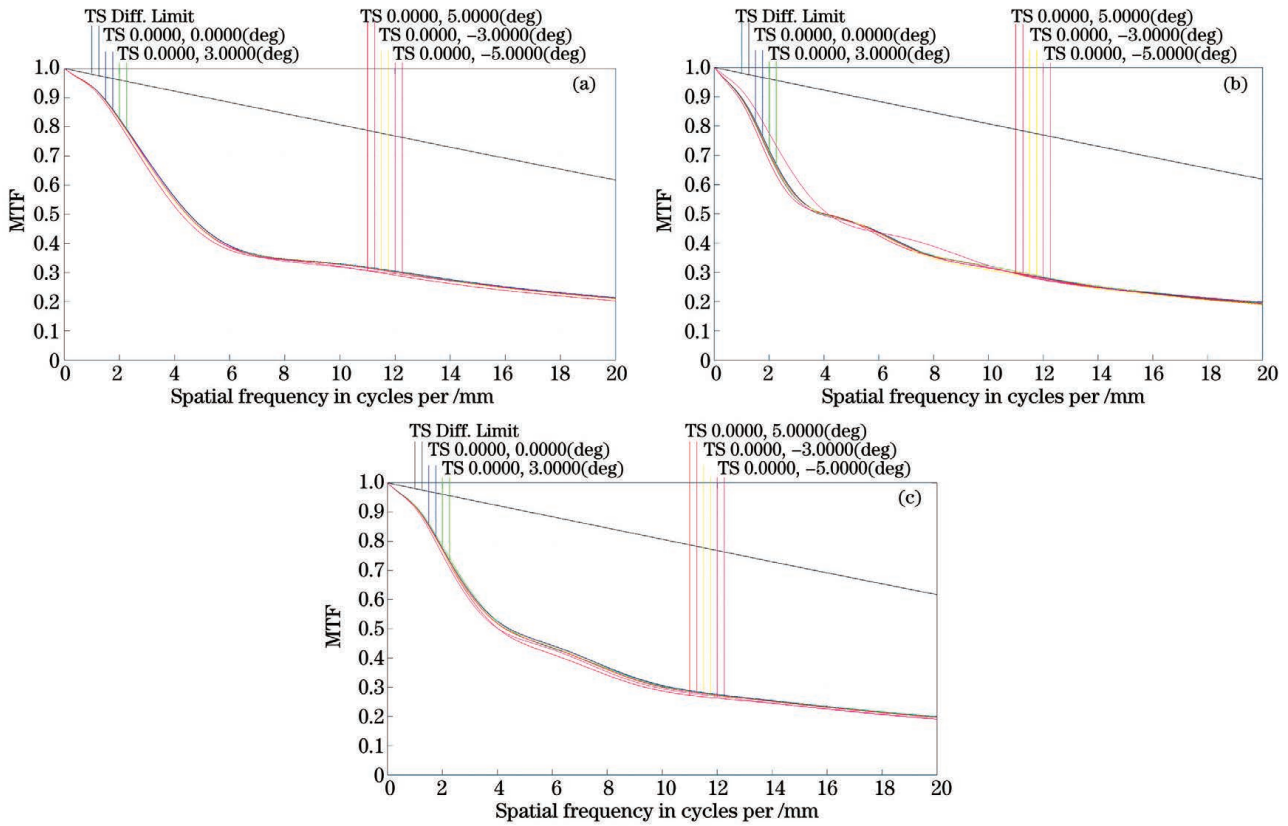


图 5 波前编码红外光学系统在不同温度下的 MTF 曲线。(a) +20 °C ;(b) -40 °C ;(c) +60 °C

Fig. 5 MTF curves of wavefront coding infrared optical systems at different temperatures. (a) +20 °C ; (b) -40 °C ; (c) +60 °C

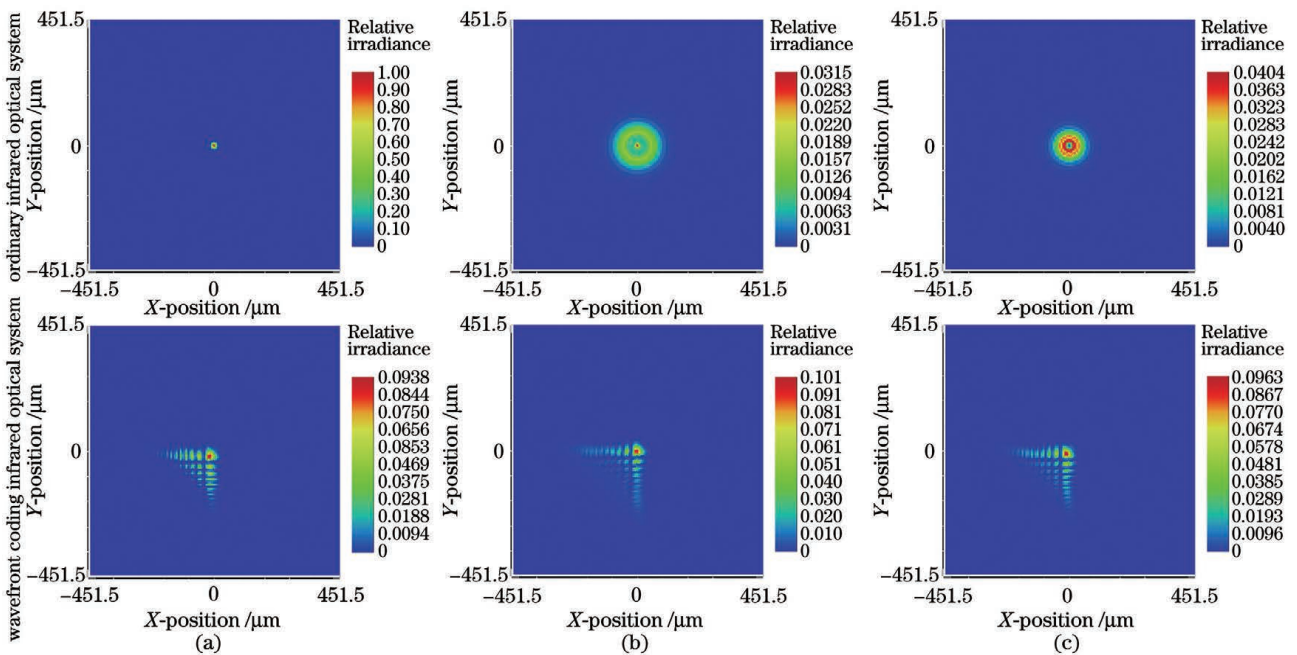


图 6 普通红外光学系统和波前编码红外光学系统的 PSF。(a) +20 °C ;(b) -40 °C ;(c) +60 °C

Fig. 6 PSF of ordinary infrared optical system and wavefront coding infrared optical system. (a) +20 °C ; (b) -40 °C ; (c) +60 °C

温度下的 PSF, 编写相应的 MATLAB 程序, 实现对红外探测器所输出的模糊程度一致的中间图像进行

复原^[20]。普通红外光学系统和波前编码红外光学系统的成像结果如图 7 所示, 其中第一行和第二行

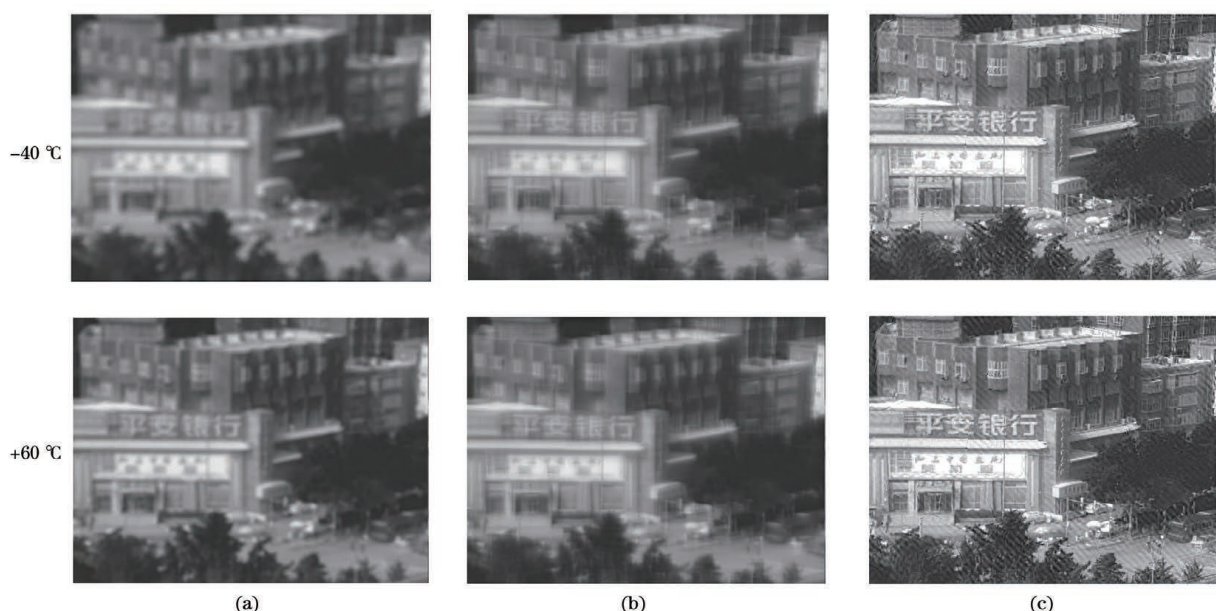


图 7 普通红外光学系统和波前编码红外光学系统的成像结果。(a) 普通系统成像图;(b) 编码系统中间图;(c) 编码系统复原图

Fig. 7 Imaging results of ordinary infrared optical system and wavefront coding infrared optical system. (a) Imaging diagram of ordinary system; (b) intermediate diagram of coding system; (c) restoration diagram of coding system

分别是在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下的输出图像。

从图 7 可以看到,普通红外光学系统一旦温度发生变化,就会出现图像模糊的情况,这表明该系统无法对物体细节进行成像;在加入波前编码相位版后,虽然不同温度下采集的图像都是模糊图像,但是模糊程度基本一致,利用滤波器进行解码复原后可以得到清晰的解码图像。因此,相对于普通红外光学系统,波前编码红外光学系统受到温度变化的影响可以忽略,也就意味着波前编码实现了系统的无热化处理。

4 结 论

红外光学系统受到温度的影响较大,当温度发生变化时,系统会发生明显的热离焦现象,成像质量急剧恶化。采用波前编码技术可以扩展光学系统的焦深范围,能够克服由温度变化引起的系统热离焦。从所设计的普通红外光学系统和波前编码红外光学系统的对比分析可以看到,在加入波前编码相位版后,当改变系统的工作温度时,系统的 MTF 一致性较好,可以得到模糊程度一致的中间图像,结合维纳滤波对其进行图像复原可以得到较清晰的目标图像,使该红外光学系统的成像质量在 $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内得到了极大的改善,满足使用要求。波前编码红外光学系统的体积小且可靠性高,可以工作在温度范围较大的红外探测系统中。

波前编码技术经过多年的发展,在扩展焦深和无热化设计方面具有巨大的优势,未来的研究重点是如何研制高性能的相位版以提高光学系统的成像质量并应用于航天探测等领域。

参 考 文 献

- [1] An N, Zhang B L, Jin J G, et al. Applying wavefront coding technology on enhancing robustness of space camera[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0911002.
安宁, 张秉隆, 金建高, 等. 应用波前编码技术提高空间相机的稳健性[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0911002.
- [2] Feng B, Shi Z L, Liu H Z, et al. Effect of point spread function position bias in wavefront coding infrared imaging system[J]. Journal of Optics, 2020, 22(2): 025703.
- [3] Li J, Luo X, Wu H P. Design of airborne infrared optical system based on refraction/diffraction hybrid[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(2): 215-223.
李杰, 罗箫, 吴晗平. 基于折/衍混合的机载红外光学系统设计[J]. 激光与红外, 2020, 50(2): 215-223.
- [4] Shen H H, Wang G H, Ding J W, et al. Application of active-athermal compensation to airborne IR optical systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(3): 593-601.
沈宏海, 王国华, 丁金伟, 等. 主动补偿无热化技术在机载红外光学系统中的应用[J]. 光学精密工程,

- 2010, 18(3): 593-601.
- [5] Simpkins J D, Stevenson R L. A spatially varying PSF model for Seidel aberrations and defocus [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8666: 86660F.
- [6] Liu L, Li L. Large aperture off-axis optical system with passive athermalization [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(11): 1428-1432.
刘琳, 李林. 被动消热差的大口径离轴光学系统 [J]. 激光与红外, 2017, 47(11): 1428-1432.
- [7] Jiang Y R, Wang J, Xie Q K, et al. Athermal design of refractive/diffractive hybrid infrared optical system [J]. Optik, 2017(131): 592-597.
- [8] Liu J, Zhang X B, Gao M. Design of cold MWIR/LWIR infrared dual-band/dual-field panoramic optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(3): 456-464.
刘钧, 张玺斌, 高明. 制冷型中/长红外双波段双视场全景光学系统设计 [J]. 应用光学, 2016, 37(3): 456-464.
- [9] Guo C, Geng Y, Zhai Y L, et al. Research progress on parameter-changed computational imaging techniques [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 160001.
郭澄, 耿勇, 翟玉兰, 等. 变参数计算成像技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 160001.
- [10] Jiang K, Jiang B, Liu K, et al. Athermalization of infrared dual field optical system based on wavefront coding [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10256: 102563X.
- [11] Zhou J, Chen S Q, Zhen Z, et al. Double bands missile-borne infrared detection system of extended focus depth based on wavefront coding [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 0404001.
周军, 陈守谦, 甄政, 等. 基于波前编码的大焦深弹载双色红外探测系统 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 0404001.
- [12] Guo X H, Zhao C X, Zhou P, et al. Application and analysis of the extension of depth of field and focus in zoom system [J]. Optical Technique, 2019, 45(3): 263-268.
- 郭小虎, 赵辰霄, 周平, 等. 变焦光学系统的景/焦深延拓及其分析 [J]. 光学技术, 2019, 45(3): 263-268.
- [13] Dowski E R, Cathey W T. Extended depth of field through wave-front coding [J]. Applied Optics, 1995, 34(10): 1859-1866
- [14] Shao X P, Liu F, Li W, et al. Latest progress in computational imaging technology and application [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 0200001.
邵晓鹏, 刘飞, 李伟, 等. 计算成像技术及应用最新进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 0200001.
- [15] Wang F, Wang H, Bian Y M, et al. Applications of deep learning in computational imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111002.
王飞, 王昊, 卞耀明, 等. 深度学习在计算成像中的应用 [J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111002.
- [16] Feng B, Zhang X D, Shi Z L, et al. Reduction of artefacts and noise for a wavefront coding athermalized infrared imaging system [J]. Journal of Optics, 2016, 18(7): 075703.
- [17] Yang L, Chen M, Wang J, et al. Extended depth-of-field of a miniature optical endoscope using wavefront coding [J]. Applied Sciences, 2020, 10(11): 3838.
- [18] Zhang J Y, Huang Y Q, Xiong F B. Iris acquiring optical system design with wavefront coding [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(10): 1022001.
张继艳, 黄元庆, 熊飞兵. 带有波前编码版的虹膜采集光学系统的设计 [J]. 光子学报, 2016, 45(10): 1022001.
- [19] Fan Z G, Fu Q, Chen S Q, et al. New method for pupil phase mask optimization in wavefront coding system [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(1): 1-6.
范志刚, 付强, 陈守谦, 等. 一种优化波前编码系统相位版参数的新方法 [J]. 应用光学, 2011, 32(1): 1-6.
- [20] Feng B, Shi Z L, Zhao Y H, et al. A wide-FoV athermalized infrared imaging system with a two-element lens [J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 87: 11-21.