

基于波前编码的红外光学系统低成本无热化设计*

王艺璇, 仇荣生, 李琪, 坎金艳, 白俊磊

(上海航天控制技术研究所·上海·201109)

摘要: 波前编码技术通过特殊面型的相位板对光束进行编码, 拓展系统焦深, 使之对热离焦不敏感, 再结合数字图像处理, 解码获得清晰图像, 实现无热化设计。将波前编码技术应用在某一长波红外光学系统无热化设计中, 对比了原光学系统和波前编码系统的点扩散函数、光学传递函数、模拟成像质量及公差分析。结果表明, 波前编码技术可以为红外成像系统提供具有价格竞争力的无热化方案, 可使红外光学系统在 -40°C 至 60°C 范围内获得良好且稳定的工作性能。

关键词: 红外光学; 无热化; 波前编码; 低成本

中图分类号: TN215; TN216

文献标志码: A

文章编号: 2096-5974(2020)06-0084-11

Low-Cost Athermalization of Infrared Optical System Based on Wavefront Coding

WANG Yixuan, QIU Rongsheng, LI Qi, KAN Jinyan, BAI Junlei

(Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109)

Abstract: Wavefront coding modulates the beam by a phase mask with a specially designed surface type, the depth of field is extended and the optical system is insensitive to defocus consequently. Then the intermediate blurred image can be turned into a clear image by digital image processing, achieving athermalization. In this paper, wavefront coding is applied on athermalization of a long wave infrared optical system, comparing the point spread function, the modulation transfer function, the image simulation and the tolerance of the wavefront coding system with those of the original optical system. The results show that wavefront coding technology can provide a price competitive athermalization solution for the infrared imaging system, making the system has a good and stable performance in a temperature range of -40°C to 60°C .

Keywords: infrared optics; athermalization; wavefront coding; low-cost

0 引言

由于空间探测和国防军事等应用领域的环境温度变化较大, 应用于该领域的光电探测系统必须在较大温度范围内具有良好且稳定的工作性能。然而, 环境温度的变化对于光学系统的稳定性而言是一个不可忽略的因素, 具体表现在: 温度变化会引起光学材料及空气折射率的变化(用折射率温度变化系数 dn/dt 表示); 光学元件的外形, 如曲率半径、厚度、面形等也会随温度而改变;

此外, 空气间隔及装配材料的热胀冷缩也是必须要考虑的因素。这些热效应会使光学系统产生热离焦及相应的像差, 导致成像质量和系统整体稳定性下降。

光学系统的热效应是一个普遍的特性, 而红外光学系统的热效应尤为严重, 这是由于红外光学材料的 dn/dt 至少比可见光材料大一个数量级。相应地, 其热离焦量也比可见光系统大很多^[1]。因此, 为使红外光学系统在较大温度范围内仍能正常工作, 在设计中就必须消除热效应的影响。

* 收稿日期: 2020-06-29; 修回日期: 2020-08-25

作者简介: 王艺璇(1994—), 女, 硕士, 工程师。E-mail: 1849340657@qq.com

目前常用的无热化技术主要有两种^[2-3]: (1) 机械主动式。该技术依靠额外的测温系统,采用较复杂的机械结构实现主动调焦,以补偿由温度变化引入的离焦量。但是,额外的机械结构增大了系统的体积和质量,带来了更高的制作成本;(2) 光学被动式。该技术通过将至少三种不同材料的光学元件组合,结合精心设计的镜头结构件的膨胀特性,以弥补系统的热离焦量。但是,红外光学材料种类相对可见光材料而言较少,适用于空间探测和国防领域且能同时满足加工工艺和无热化要求的红外光学材料更少,光学被动式无热化设计的自由度小,材料成本高。在不增加系统体积、质量及成本的同时,很难通过现有的无热化技术消除由环境温度带来的影响。因此,研究低成本的无热化设计方案可提高红外成像系统在市场中的价格竞争力,对红外光学无热化设计的发展具有重要意义。

无热化设计的本质是减小因温度变化而产生的离焦量。换言之,若能采取某种方法扩大光学系统的焦深,使由温度变化导致的焦面漂移始终在焦深范围内,红外光学系统的无热化问题将迎刃而解。根据焦深公式

$$\Delta L = \frac{4\lambda}{n} \left(\frac{f}{D} \right)^2 \quad (1)$$

式(1)中, λ 表示工作波长; n 表示折射率; f 为透镜焦距; D 为入瞳直径。焦深与 $(f/D)^2$ 成正比,但 f/D 越大,分辨率越小,可见普通成像系统的焦深和分辨率不可兼得,而人们对光学系统分辨率的要求素来很高。波前编码技术恰恰可以在保证成像分辨率的同时,延拓光学系统的焦深。相比传统无热化方法,波前编码系统无需增加额外的光学元件或机械调焦结构,仅通过一块相位板便可实现无热化。因此,波前编码技术在红外光学系统低成本无热化设计中拥有很好的应用前景。本文研究了波前编码系统的工作原理,并将波前编码技术应用在某一长波红外光学系统的无热化设计中。通过对比原光学系统和波前编码系统的点扩散函数、光学传递函数、模拟成像质量及公差分析,证实了波前编码技术可以为红外成像系统提供具有价格竞争力的无热化方案。

1 波前编码系统的工作原理

波前编码系统的工作原理如图1所示,相位板改变了光线应有的传播方向。原本汇聚成一点的光线在焦平面附近变为均匀细光束,即相位板对光束进行了编码,使光学系统的点扩散函数(Point Spread Function, PSF)和传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)在很大焦深范围内可保持一致,在该焦深范围内可形成差异较小的中间模糊图像。通过数字滤波得到清晰的解码图像,从而使光学系统对离焦不敏感,实现延拓焦深的目的^[4-5]。

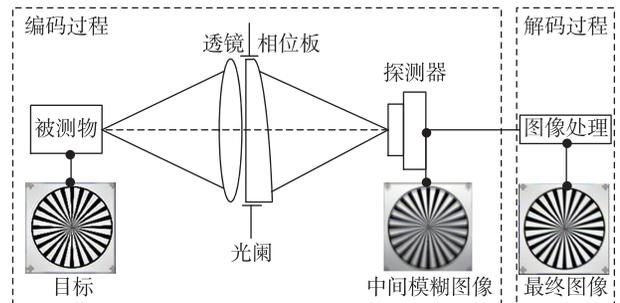


图1 波前编码系统原理图

Fig. 1 Wavefront coding system diagram

基于傅里叶光学理论,采用模糊函数的形式表示光学传递函数,并通过稳相法推导出立方型相位板对离焦不敏感^[6]。相位板的归一化表达式为

$$z = \alpha(x^3 + y^3) \quad (2)$$

式(2)中, x 和 y 为光学表面的坐标位置, $|x| < 1$, $|y| < 1$; z 是光学表面的矢高; α 为立方型相位板系数。

添加立方型相位板的波前编码系统的光学传递函数可由如下公式表示^[7-8]

$$H(u, W_{20}) \approx \sqrt{\frac{\pi}{12|\alpha u|}} \exp\left(j \frac{\alpha u^3}{4}\right) \exp\left(-j \frac{k^2 W_{20}^2 u}{3\alpha}\right) \quad (3)$$

式(3)中, u 为空间频率; k 为波数; W_{20} 为由热离焦导致的波像差。由式(3)可知,光学传递函数的第三项与离焦系数相关。当立方型相位板系数 α 足够大时,可忽略该项,式(3)可近似为

$$H(u, W_{20}) \approx \sqrt{\frac{\pi}{12|\alpha u|}} \exp\left(j \frac{\alpha u^3}{4}\right) \quad (4)$$

增大 α 可减小离焦对波前编码系统光学传递函数的影响, 使之对离焦不敏感, 扩大了光学系统的焦深。这与之前提到的无热化设计的思路相同, 即足够大的焦深可以覆盖由热效应而导致的离焦量, 使不同环境温度下的点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 和传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 保持一致。最后, 使用相同的 PSF 对中间模糊图像进行复原滤波, 进而得到不同温度下的清晰图像, 实现无热化设计。

2 光学系统设计

为了验证波前编码技术在红外光学系统无热化设计中发挥的作用, 首先需设计一个两片式的系统, 将其作为初始光学结构, 再添加相位板进行优化, 得到波前编码无热化光学系统。通过对比优化前后系统的成像性能, 说明将波前编码应用于红外光学系统无热化设计中的优势。

2.1 初始光学结构设计

初始光学结构是一个两片式的长波 ($8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$) 红外光学系统, 如图 2 所示。系统采用非制冷红外探测器, 截止频率为 21 (lp/mm), X 和 Y 方向的视场角分别为 $\pm 3.14^\circ$ 和 $\pm 2.5^\circ$ 。两片透镜材料均为锗, 这样一个由两片相同材料构成的光学系统显然是不能满足无热化设计的要求的。

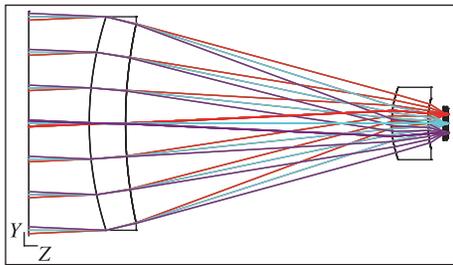


图 2 初始光学结构图

Fig. 2 Initial optical system diagram

当环境温度为 20°C 时, 图 3 (a) 中各视场下的点列图均方根 (Root Mean Square, RMS) 半径均小于艾里斑半径; 当环境温度为 -40°C 和

60°C 时, 图 3 (b) 和图 3 (c) 中的点列图 RMS 半径由微米量级扩大至百微米量级。图 3 右列曲线图说明了不同环境温度下 MTF 与离焦量之间的关系, 曲线图横坐标为离焦量 (单位为 mm), 纵坐标为空间频率 1 (lp/mm) 处的 MTF 值。当环境温度为 20°C 时, MTF 峰值对应的离焦量为零, 说明此时光学系统处于聚焦状态; 当温度为 -40°C 和 60°C 时, MTF 峰值对应的离焦量分别为 0.373mm 和 -0.248mm , 说明此时系统处于热离焦状态。

该系统受温度影响明显, 若想在较大温度范围内获得良好且稳定的工作性能, 就必须进行无热化设计, 使由相位板引入的焦深范围覆盖热离焦量。

2.2 相位板的面型及位置

点扩散函数 PSF 是由光瞳函数的傅里叶变换再取模的平方而得到的^[9], 因此在光学系统的光阑处放置相位板, 可使相位板的编码作用发挥至最大程度, 更容易改变整个光学系统的成像性质, 获得不同温度下一致性较好的 PSF, 有利于解码函数的确定, 以及系统焦深的延拓^[10]。此外, 为了尽可能降低系统的复杂性, 减小光学系统的体积和质量, 将式 (2) 所示的立方型相位板集成在第一片透镜的前表面光阑处, 则该表面的面型方程为

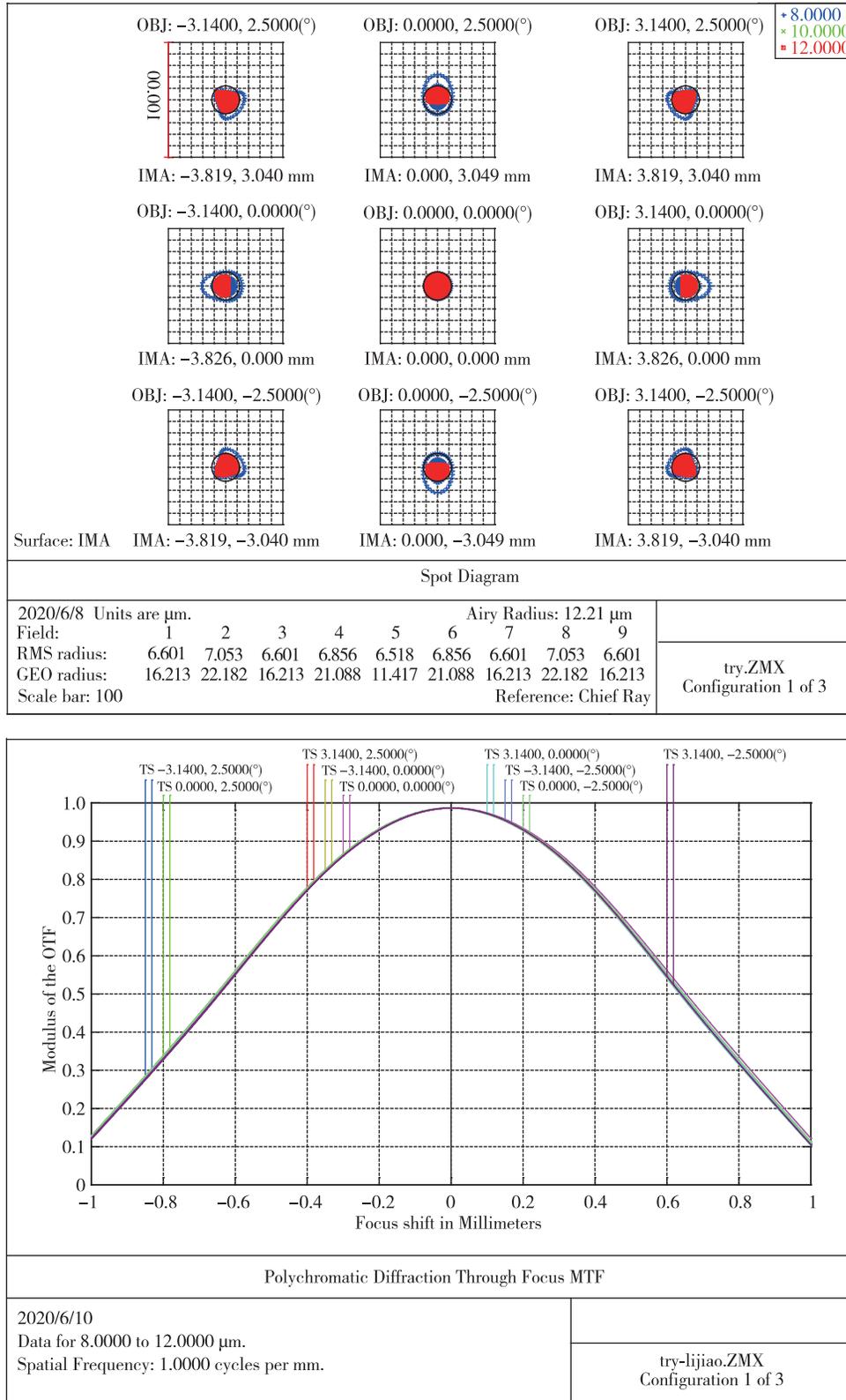
$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} + \alpha(x^3 + y^3) \quad (5)$$

式 (5) 中, 第一项代表该表面原本的球面属性, 曲率 c 为曲率半径的倒数, 圆锥常数 $k=0$; 第二项代表附加的立方型相位板, 系数 α 待优化。

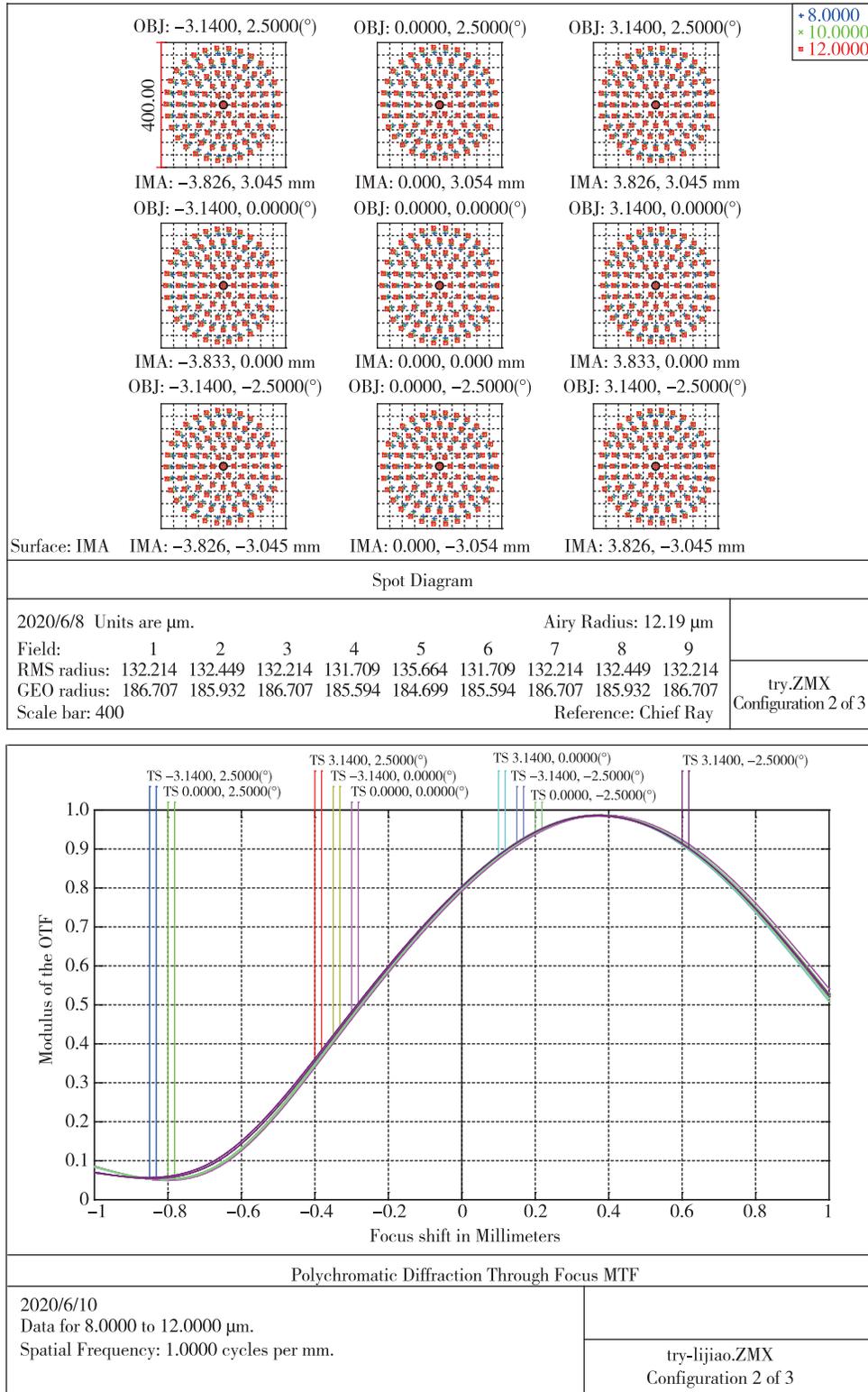
应用光学设计软件 Zemax 内置的扩展多项式面型 (Extended Polynomial) 近似待求相位板, 面型方程如下式所示

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y) \quad (6)$$

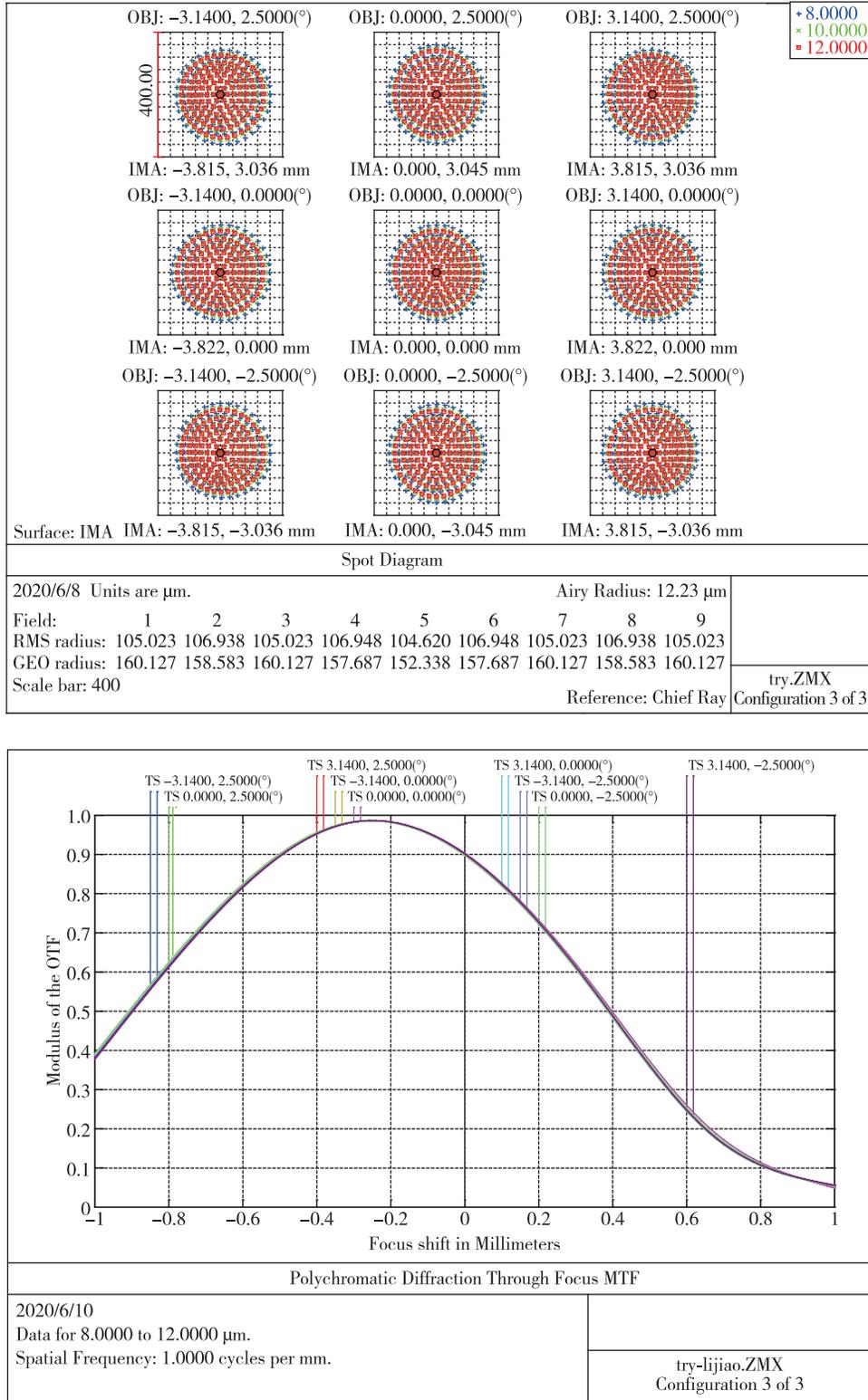
式 (6) 中, 扩展多项式 $E_i(x, y)$ 的展开形式如表 1 所示。令 $N=9$, 系数 $A_6=A_9=\alpha$, 将其余 A_i 置零, 则可替代式 (5) 所示的面型方程。



(a) 当环境温度为 20℃ 时，左：点列图；右：离焦量曲线图 (MTF@1 (1p/mm))



(b) 当环境温度为 -40°C 时, 左: 点列图; 右: 离焦量曲线图 (MTF@1 (lp/mm))



(c) 当环境温度为 60℃ 时，左：点列图；右：离焦量曲线图 (MTF@1 (lp/mm))

图 3 不同环境温度下的点列图、MTF-离焦量曲线图

Fig. 3 Spot diagram and MTF-defocus under different temperature

表 1 式 (6) 中的多项式展开

Tab. 1 Polynomial expansion in Formula (6)

A_i	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
$E_i(x, y)$	x	y	x^2	xy	y^2	x^3	x^2y	xy^2	y^3

2.3 系统多温度点优化

将立方型相位板系数 A_6 和 A_9 设为变量, 并在 Zemax 多组态编辑器中添加热跟随设置, 进行 20°C 、 -40°C 、 60°C 的多温度点综合优化。由于优化的最终目的是延拓系统焦深, 使不同温度下的点扩散函数 PSF 保持一致, 并且保持光斑尺寸不能过大, 这样才能使用相同的 PSF 对中间模糊图像进行解码, 得到恢复后的清晰图像。PSF 的相似性可通过被测和参考 PSF 的自相关、互相关运算来衡量, 如下所示

$$C(\text{PSF}_R, \text{PSF}_T) = \frac{\int_{-H/2}^{H/2} \int_{-W/2}^{W/2} \text{PSF}_R(x, y) \text{PSF}_T(x, y) dx dy}{\int_{-H/2}^{H/2} \int_{-W/2}^{W/2} [\text{PSF}_R(x, y)]^2 dx dy} \quad (7)$$

式 (7) 中, 参考 $\text{PSF}_R(x, y)$ 为 20°C 时中心视场的 PSF; 被测 $\text{PSF}_T(x, y)$ 为高、低温下其余视场的 PSF; $C(\text{PSF}_R, \text{PSF}_T)$ 为各 PSF 的相似性; W 和 H 分别为像面的宽度和高度。PSF 的紧凑性可通过斯特列尔比 (有像差存在时高斯像点处的光强除以无像差存在时高斯像点处的光强) 得到。斯特列尔比的值越大, 说明 PSF 越紧凑。

MTF 的离焦不变性可通过被测和参考 MTF 的方差来表示

$$T(\text{MTF}_R, \text{MTF}_T) = \int_0^{f_{\max}} [\text{MTF}_T(f) - \text{MTF}_R(f)]^2 df \quad (8)$$

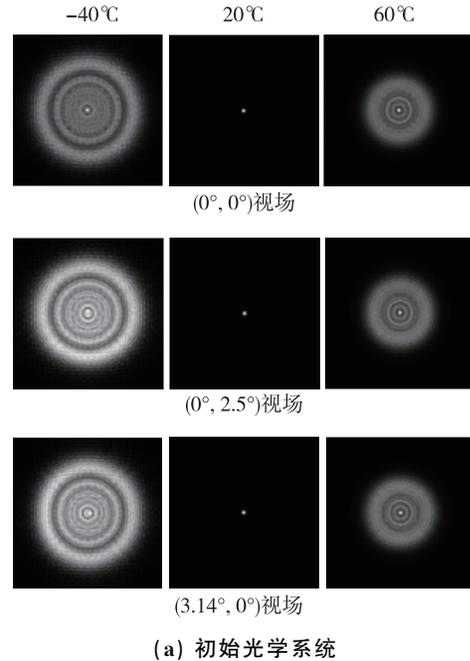
式 (8) 中, 参考 $\text{MTF}_R(f)$ 为 20°C 时中心视场的 MTF; 被测 $\text{MTF}_T(f)$ 为高、低温离焦下其余视场的 MTF; $T(\text{MTF}_R, \text{MTF}_T)$ 则代表 MTF 的离焦不变性; f_{\max} 为探测器的截止频率。在优化过程中, 采用 PSF 的相似性和紧凑性^[11]、MTF 的离焦不变性^[11-12] 作为 Zemax 多温度点优化的评价标准, 最终经优化得到 $A_6 = A_9 = \alpha = 0.0149$ 。

3 设计结果分析

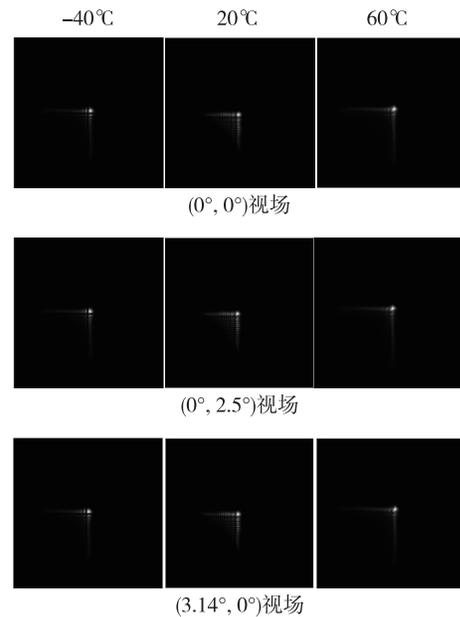
3.1 点扩散函数对比分析

对比图 4 中优化前后的点扩散函数可以发现, 初始两片式光学系统只在 20°C 时具有较小的 PSF,

其在高低温下的 PSF 尺寸迅速扩大, 且光斑弥散程度与温差成正比, 热离焦明显, 不具备在较大温度范围内的良好成像能力。



(a) 初始光学系统



(b) 波前编码系统

图 4 点扩散函数

Fig. 4 Point spread function

虽然波前编码系统各温度点的 PSF 比常温初始光学系统的 PSF 大很多, 但其光斑呈直角三角形分布, 能量多集中在直角点位置, 能量集中度

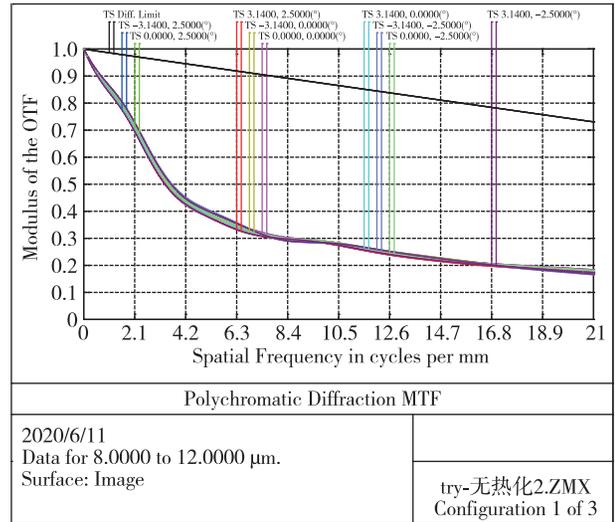
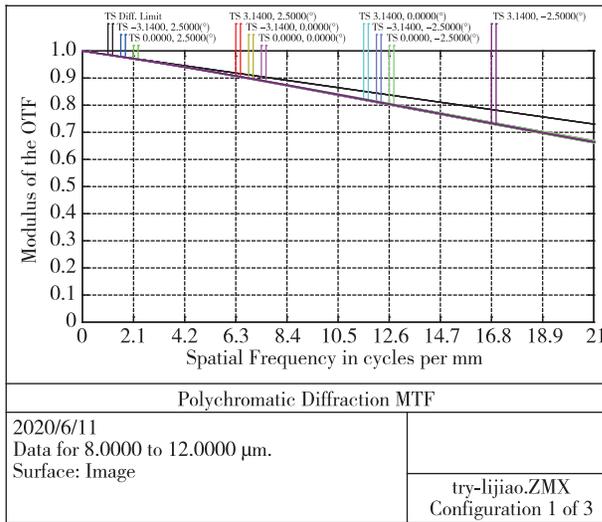
高; 此外, 不同视场、不同环境温度下的 PSF 形态高度一致, 这说明波前编码系统对热离焦不敏感, 符合无热化设计要求, 为使用相同的 PSF 实现图像解码奠定了基础。

3.2 光学传递函数对比分析

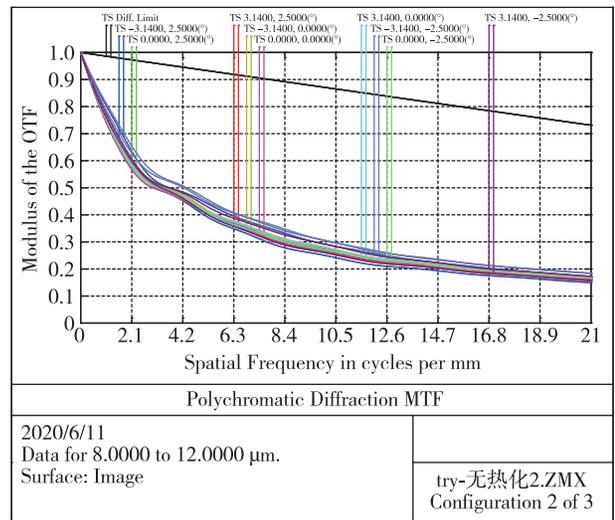
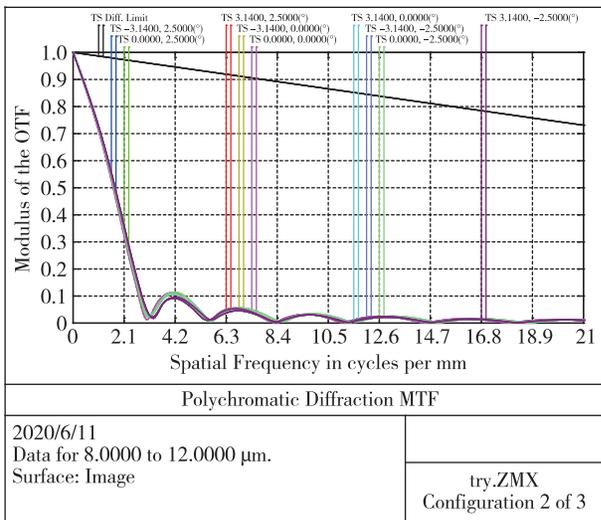
光学传递函数是评价系统成像质量的另一项重要指标。如图 5 所示, 20℃ 时的初始光学系统有较好的 MTF 表现, 其曲线接近衍射极限 (如图 5 中的黑线所示), 而随着温度的升高或降低, MTF 曲线急剧衰减, 在低频 (5 (lp/mm)) 处便已接近零点。这意味着初始光学系统仅在常温下便能获得极好的成像质量, 一旦温度发生改变,

就会产生热离焦现象, 导致成像质量下降严重, 系统无法正常工作。

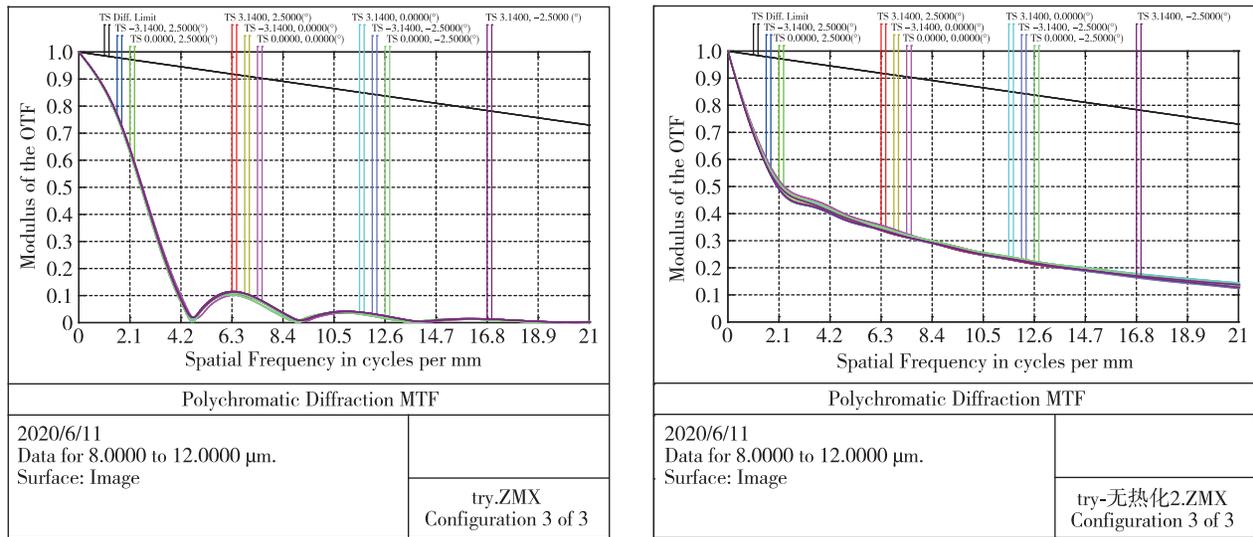
反观 20℃ 时的波前编码系统 MTF, 虽然较常温初始光学系统而言曲线整体下降, 但整个频段无零点, 无信息丢失; 若单纯以 MTF 这一指标来评价, -40℃ 和 60℃ 时的波前编码系统的成像质量已然优于相应温度下的初始光学系统, 再考虑后续解码过程, 必然能获得更好的成像效果; 此外, 不同视场下的 MTF 曲线一致性较好, 且几乎不随环境温度而改变, 说明系统具有相近的成像表现, 方便使用同一滤波器进行图像解码。



(a) 环境温度为 20℃ 时, 左: 初始光学系统; 右: 波前编码系统



(b) 环境温度为 -40℃ 时, 左: 初始光学系统; 右: 波前编码系统



(c) 环境温度为 60℃ 时，左：初始光学系统；右：波前编码系统

图 5 光学传递函数

Fig. 5 Modulation transfer function

3.3 模拟成像对比分析

为了更加直观地对比初始光学系统和波前编码光学系统的成像质量，将不同视场、不同温度下的点扩散函数阵列与示例源图卷积获得模拟成像图，如图 6 (a) 和图 6 (b) 所示；再使用 20℃ 时的波前编码系统中 (0°, 0°) 视场的点扩散函数作为反卷积核进行图像复原和增强^[13]，获得如图 6 (c) 所示的解码图像。

初始光学系统在 20℃ 时成像清晰，在 -40℃ 和 60℃ 时已离焦模糊；波前编码系统在各温度点的成像一致性较好，虽然无法媲美常温时的初始光学系统，但优于其在 -40℃ 和 60℃ 时的成像质量；经过图像解码后，波前编码系统在各温度下的成像质量均能达到初始光学系统在常温对焦时的成像质量。综上所述，波前编码技术能够延拓红外光学系统的焦深，将变化的环境温度 (-40℃ ~ 60℃) 所引入的热离焦量限制在焦深范围内，使光学系统对温度变化不敏感，实现了无热化设计。



(a) 初始光学系统成像



(b) 波前编码系统中模糊图像



(c) 波前编码系统解码图像

图 6 模拟成像图

Fig. 6 Image simulation

3.4 公差分析

一般而言，调焦是光学系统在装调过程中无法省略的一步。通常将后截距 (Back Focal Length, BFL) 作为补偿量，来弥补加工和安装过程带来的误差影响。现对优化前后的系统，按照表 2 所示分配相同的公差量^[14]。使用 Zemax 公差分析模块对系统进行 100 次蒙特卡罗计算，以系统在截止频率 21 (lp/mm) 处的 MTF 值作为评价标准，得到如表 3 和表 4 所示的结果。

表2 公差分配方案

Tab. 2 Tolerance allocation scheme

半径/ 光圈	厚度/ mm	透镜 偏心/ mm	透镜 倾斜/ (°)	镜组 偏心/ mm	镜组 倾斜/ (°)	不规 则度/ 光圈	折 射 率	阿贝 误差/ %
±5	±0.02	±0.02	±0.05	±0.02	±0.05	±0.2	±0.001	±0.8

表3 初始光学系统 MTF@21 (lp/mm)

Tab. 3 MTF@21 (lp/mm) of initial optical system

MTF@21 (lp/mm)	设计值	最佳值	最差值	平均值	标准偏差
BFL 作为补偿量	0.670	0.669	0.642	0.660	0.008
无补偿量	0.670	0.659	0.299	0.595	0.08

表4 波前编码系统 MTF@21 (lp/mm)

Tab. 4 MTF@21 (lp/mm) of wavefront coding system

MTF@21 (lp/mm)	设计值	最佳值	最差值	平均值	标准偏差
BFL 作为补偿量	0.183	0.183	0.181	0.182	0.0005
无补偿量	0.183	0.183	0.176	0.181	0.002

若把 BFL 作为调焦补偿量,则初始光学系统和波前编码系统均能获得与设计值相近的 MTF 值。但若不调焦,初始光学系统的成像质量则无法保证。受公差影响,截止频率处的 MTF 可能会由设计值 0.67 下降至 0.299。而对波前编码系统而言,是否调焦对成像质量影响不大,截止频率处的 MTF 能够稳定在设计值附近。由此可以得出结论:初始光学系统受公差影响较大,在装配过程中必须调焦才能获得与设计相符的成像质量;而波前编码系统的装配容差性较好,在装配过程中几乎不需要调焦,能够有效降低装配成本。

4 结 论

本文通过对比分析,验证了将波前编码技术应用于红外光学系统无热化设计的可行性,总结了波前编码技术相较于传统无热化设计方案的优点:

(1) 波前编码系统无需增加额外的光学元件或机械调焦结构,仅通过一块集成在透镜上的相位板便能实现无热化设计,其系统结构简单,可降低材料成本、加工成本;

(2) 波前编码系统在装配时无需特别调焦,可简化装配流程,有利于提高生产效率,降低装配成本;

(3) 将光学设计和数字图像处理相结合,在

保证成像分辨率的同时可延拓系统焦深,校正由热离焦带来的各类像差;

(4) 在某些对分辨率要求不高的场合中,未经解码的图像也可以直接使用。

因此,波前编码技术可以为红外成像系统提供具有价格竞争力的无热化解决方案,对红外光学系统实现低成本无热化设计而言具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] JAMIESON T H. Thermal effects in optical systems [J]. *Optical Engineering*, 1981, 20 (20): 156-160.
- [2] 申碧云,高明. 红外光学系统被动式无热化设计方法 [J]. *电光与控制*, 2012, 19 (6): 70-78.
SHEN B Y, GAO M. Passive optical athermalization design for infrared optical system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19 (6): 70-78 (in Chinese).
- [3] 刘秀军,张金旺,彭焱. 中波红外光学系统无热化设计 [J]. *红外技术*, 2012, 34 (10): 602-607.
LIU X J, ZHANG J W, PENG Y. Athermal design of a MWIR optical system [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34 (10): 602-607 (in Chinese).
- [4] DOWSKI E R, CATHEY W T. Extended depth of field through wave-front coding [J]. *Applied Optics*, 1995, 34 (11): 1859-1866.
- [5] TUCKER S C, CATHEY W T, DOWSKI E R. Extended depth of field and aberration control for inexpensive digital microscope systems [J]. *Optics Express*, 1999, 4 (11): 467-474.
- [6] 张欣,张新,等. 波前编码技术扩展焦深的系统实验 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18 (3): 536-543.
ZHANG X, ZHANG X, et al. Experiments of extending depth of focus through wave-front coding technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18 (3): 536-543 (in Chinese).
- [7] 冯俐桐,孟军合,顿雄,等. 波前编码应用于红外光学系统无热化的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40 (1): 83-86.
FENG L T, MENG J H, DUN X, et al. Wavefront coding for athermalization of infrared imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (1): 83-86 (in Chinese).
- [8] CHEN S Q, FAN Z G, XU Z G, et al. Thermal effect on odd-symmetric phase mask in wavefront-coded athermalized infrared imaging systems [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31 (3): 210-215.
- [9] 吕天宇,杨飞,明名. 基于波前编码技术红外光学系统无热化研究 [J]. *长春理工大学学报 (自然科学版)*, 2012, 35 (2): 30-32.
LYU T Y, YANG F, MING M. Research on

- athermalization of infrared optical system based on wavefront coding [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 35 (2): 30-32 (in Chinese).
- [10] 李福巍, 张云强, 潘国庆, 等. 波前编码技术在红外空空导弹上的应用研究 [J]. 红外技术, 2015, 37 (6): 488-491. LI F W, ZHANG Y Q, PAN G Q, et al. Application study on wavefront coding in infrared air-to-air missile [J]. Infrared Techonlogy, 2015, 37 (6): 488-491 (in Chinese).
- [11] SUNG H Y, YANG S S, CHANG H. Design of mobile phone lens with extended depth of field based on point-spread function focus invariance [J]. Novel Optical Systems Design & Optimization XI, 2008, 7061 (7): 1-11.
- [12] 莫绪涛, 王晋疆. 环带型波前编码大景深相位模板的设计和优化 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41 (11): 2986-2992. MO X T, WANG J J. Design and optimization of an annular phase mask to extend the depth of field based on wavefront coding [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (11): 2986-2992 (in Chinese).
- [13] 周峰, 叶然, 李光伟, 等. 大视场波前编码成像系统中的图像复原 [J]. 光学学报, 2010, 30 (2): 82-87. ZHOU F, YE R, LI G W, et al. Image restoration in a wavefront coding imaging system with a wide field of view [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30 (2): 82-87 (in Chinese).
- [14] 刘雨沁, 张孟伟. 变倍光学系统的公差分析 [J]. 光学仪器, 2013, 35 (2): 42-45. LIU Y Q, ZHANG M W. Tolerance analysis of switch-in-group zoom optical system [J]. Optical Instruments, 2013, 35 (2): 42-45 (in Chinese).