

## 基于波前编码的无热化红外成像技术综述 (特邀)

史泽林<sup>1,2</sup>, 冯 斌<sup>1,2,3\*</sup>, 冯 萍<sup>3</sup>

- (1. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;
3. 西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 波前编码红外成像技术是一种结合光学编码和数字解码两步成像的计算光学成像技术。波前编码无热化红外成像系统通过在红外光学系统的光阑附近增加特殊面形的光学相位板, 对场景红外辐射进行编码调制, 使得在宽的环境温度范围内红外焦平面探测器输出的中间编码图像具有高度一致性, 再对中间编码图像进行数字解码得到清晰红外图像。近年来, 国内外学者开展了大量波前编码无热化红外成像技术的理论分析和原理验证, 表明其无热化特性的有效性。文中结合作者近年来的研究工作, 主要介绍波前编码无热化红外成像技术的研究背景、基本原理、关键技术、国内外典型的设计方案和原理样机, 并展望了波前编码红外成像技术的应用价值和发展趋势。

**关键词:** 波前编码; 无热化设计; 红外成像; 光学编码; 数字解码

**中图分类号:** O438.2; O435.2      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210454

## Review on athermalized infrared imaging technology based on wavefront coding (*Invited*)

Shi Zelin<sup>1,2</sup>, Feng Bin<sup>1,2,3\*</sup>, Feng Ping<sup>3</sup>

- (1. Key Laboratory of Opto-electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** As a novel computational optical imaging technology, wavefront coding infrared imaging technology includes two stages of optical coding and digital decoding. The wavefront coding athermalized infrared imaging system is realized by mounting a special-form phase mask near the stop of an infrared optical system to modulate the incident radiation. Its infrared detector produces intermediate coded images. Those intermediate coded images have high similarity over a wide range of ambient temperature. An intermediate coded image is decoded to produce a decoded image with sharpness. In recent years, researchers have made much contribution to its theory and experiment to prove its validity for athermalization. In this paper, combining their previous related works, the authors have respectively introduced research background, basic principle, key technique, typical design scheme and experimental prototype, and prospected its application and development trend in future.

**Key words:** wavefront coding; athermalization design; infrared imaging; optical coding; digital decoding

收稿日期: 2021-10-20; 修订日期: 2021-12-05

作者简介: 史泽林, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电成像、光电跟踪、图像处理、目标识别等方面的研究。

通讯作者: 冯斌, 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事波前编码红外成像、红外测温、偏振成像、目标检测、深度学习应用等方面的研究。

## 0 引言

红外成像技术广泛地应用于安防监视、太空探索、工业检测等领域<sup>[1-4]</sup>。红外成像系统主要由红外光学系统和红外探测器组成,其中红外光学材料的折射率和温度变化系数对环境温度敏感。环境温度变化引起红外光学系统的光学元件发生几何形变和折射率变化以及光学元件之间的间隔产生变化,结果导致光线在红外光学系统中的光路发生改变,光线汇聚的像面与探测器的焦平面产生轴向位置偏差,发生所谓的“热离焦”现象。热离焦造成红外成像系统输出图像模糊,进而导致红外成像系统无法正常工作。要保证红外成像系统在较宽的温度范围内正常工作,就必须消除环境温度变化对红外光学系统的影响,进行红外成像系统的无热化设计,提高红外成像系统对环境温度的适应性。

鉴于上述应用问题,20 世纪 40 年代, Grey 等<sup>[5]</sup>就已经开展了在均匀温度场中,温度变化对红外光学系统性能影响的研究工作,提出了无热化 (Athermalization) 的概念。目前常见的无热化技术主要分为六类<sup>[6]</sup>: 机电主动式、机械被动式、光学被动式、折衍混合式、数字重聚焦法、波前编码成像技术。

(1) 机电主动式<sup>[7]</sup>。该技术通过温度传感器获得像面的漂移量,通过电机带动探测器移动,补偿由于温度变化引起的热离焦。该技术需要额外的机械电子设备,导致系统的可靠性低,在运动平台上应用容易发生机械故障。

(2) 机械被动式<sup>[8]</sup>。该技术利用具有高膨胀率的固体材料、塑性材料、液体、记忆合金材料等,使透镜组在温度变化下发生轴向位置的移动,从而被动地补偿温度变化导致的热离焦,保证像面位置不变。该技术成本较低、性能较好,但存在可匹配的材料有限、整个系统的体积较大,且需要考虑密封性。

(3) 光学被动式<sup>[9-10]</sup>。该技术通过光学元件的结构和材料的恰当组合来保持在温变条件下最佳像面位置固定。由于在红外波段可供选择的红外材料种类有限,该技术难以通过结构和材料的匹配取得理想的无热化效果。

(4) 折衍混合式<sup>[11-13]</sup>。该技术利用衍射元件具有独特的热差系数和色系数互补特性,将衍射元

件与折射元件相配合构建出系统。由于衍射元件的衍射性质与波长有着紧密的相关性,致使折衍混合无热化技术不适合于宽光谱的红外光学系统,在应用场景上存在较大的限制。此外,场景红外辐射能量损失严重,降低了红外成像系统的灵敏度。

(5) 数学重聚焦法<sup>[14]</sup>。该技术将热离焦图像复原的过程看作是在红外光学系统中增加一片虚拟的数字聚焦镜,从而实现红外成像系统的重聚焦。该技术对红外光学系统不做特殊处理。若环境温度变化较大,将导致红外成像探测器输出红外图像中严重丢失高频信息,则后端的数字重聚焦困难。该技术仅采用后端的信息处理手段,因此无热化温度范围较窄。

(6) 波前编码成像技术<sup>[15]</sup>。该技术是一种将光学编码与数字解码相结合的计算光学成像技术。如图 1 所示,它通过在传统光学系统出瞳或孔径光阑处加入一个光学相位板,使光学系统具有对像面离焦不敏感的特性,在一个比较大的热离焦范围内得到的中间编码图像几乎与像面位置无关。为了得到清晰的图像输出,数字解码处理单元使用数字图像复原技术对模糊的中间编码图像进行数字解码复原,去除光学相位板对光学系统成像的编码模糊。因此,波前编码红外成像系统能够在很大的离焦范围内输出较清晰的红外解码图像,消除因环境温度变化引起的热离焦,实现无热化处理的目的。

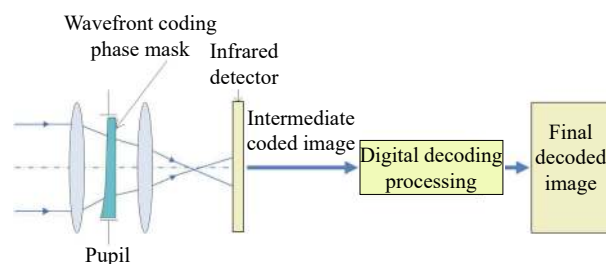


图 1 波前编码红外成像的链路示意图

Fig.1 Schematic diagram of wavefront coding infrared imaging link

综上所述,前四类技术属于传统的无热化技术,侧重于光机结构设计的技术手段;第五类数学重聚焦法,对红外光学系统不作约束,侧重于仅采用数字信息处理技术。波前编码无热化红外成像技术综合了新型光学器件和信息处理两种技术手段进行无热化设计,在光学(光学编码)和电学(数字解码)两个空间寻找最优解,从而取得良好的红外成像系统无热化效果。

## 1 基本原理

红外成像系统的环境温度变化引起红外光学系统的光学元件几何尺寸、折射率以及光学元件之间的间隔变化,最终导致红外光学系统发生热离焦。波前编码红外成像技术通过在光阑附近加入光学相位板,使得光学系统对环境温度变化不敏感,其基本原理归纳如下。

由环境温度变化引起红外成像系统的热离焦量为<sup>[16]</sup>:

$$\Delta_f = -\gamma f \Delta_T \quad (1)$$

式中:  $\Delta_f$  由温度变化引起的热离焦量;  $\gamma$  为热差系数;  $f$  为红外光学系统的焦距;  $\Delta_T$  表示温度变化量。

最大波像差  $W_{020}$  与实际离焦量  $\Delta_f$  的关系满足<sup>[16]</sup>:

$$W_{020} = \frac{1}{k} \frac{\pi \Delta_f}{\lambda} \left( \frac{1}{2F} \right)^2 = \frac{\Delta_f}{8F^2} \quad (2)$$

式中:  $k$  为波数;  $\lambda$  为波长;  $F$  为光学系统的  $F$  数。

将公式 (1) 代入公式 (2) 可得最大波像差  $W_{020}$  与温度变化量  $\Delta_T$  的关系为:

$$W_{020} = -\frac{\gamma f}{8F^2} \Delta_T \quad (3)$$

在发生热离焦情况下,红外光学系统的广义光瞳函数表示为:

$$P(x, y, W_{020}) = p(x, y) \exp \left[ jk W_{020} (x^2 + y^2) \right] \quad (4)$$

式中:  $p(x, y)$  表示不考虑热离焦波像差情况下的广义光瞳函数,  $x$  和  $y$  表示归一化的光瞳坐标。

由信息光学理论可知,光学系统的 OTF(Optical Transfer Function) 为广义光瞳函数的自相关,可表示为:

$$H(u, v, W_{020}) = \iint P \left( x - \frac{u}{2}, y - \frac{v}{2}, W_{020} \right) \times P^* \left( x + \frac{u}{2}, y + \frac{v}{2}, W_{020} \right) dx dy \quad (5)$$

式中:  $u$  和  $v$  表示归一化的空间频率。

若在红外光学系统的光阑处添加三次光学相位板:

$$z(x, y) = \alpha (x^3 + y^3) \quad (6)$$

式中:  $z$  表示矢高;  $\alpha$  表示光学相位板的面形参数;  $x$  和  $y$  为二维空间坐标。

相应地,波前编码光学系统的广义光瞳函数变为:

$$P_{WFC}(x, y, W_{020}) = p(x, y) \times \exp \left[ jk W_{020} (x^2 + y^2) + j\alpha (x^3 + y^3) \right] \quad (7)$$

由广义光瞳函数自相关运算,得到波前编码红外光学系统的光学传递函数 (OTF) 的表达式为<sup>[17]</sup>:

$$H(u, v, W_{020}) \approx \left( \frac{\pi}{12|\alpha uv|} \right)^{1/2} \times \exp \left[ j \frac{\alpha (u^3 + v^3)}{4} \right] \exp \left[ -j \frac{k^2 W_{020}^2 (u + v)}{3\alpha} \right] \quad (8)$$

式中: 相位因子由两项组成。第一项相位因子  $\exp [j\alpha (u^3 + v^3)/4]$ , 与离焦参数无关的; 第二项相位因子  $\exp (-jk^2 W_{020}^2 (u + v)/(3\alpha))$  与离焦参数有关。只要光学相位板的面形参数  $\alpha$  足够大, 第二项的值趋向于 1, 对传递函数的影响可以忽略不计, 则公式 (8) 可简化为:

$$H(u, v, W_{020}) \approx \left( \frac{\pi}{12|\alpha uv|} \right)^{1/2} \exp \left[ j \frac{\alpha (u^3 + v^3)}{4} \right] \quad (9)$$

由公式 (9) 可知, 此时 OTF 值和最大波像差  $W_{020}$  几乎没有关系, 结合公式 (3) 进一步可知, OTF 值与环境温度变化量  $\Delta_T$  也几乎无关。因此在温度变化量为  $\Delta_T$  范围内, 近似保持了 OTF 不变。在波前编码红外成像系统的数字解码处理环节, 可以利用波前编码红外光学系统自身的点扩散函数作为滤波器, 对模糊的中间编码图像进行数字解码处理, 得到比较清晰的数字解码图像。上述讨论, 从原理上表明了波前编码技术扩展红外光学系统无热化工作温度范围的可行性。

## 2 关键技术

### 2.1 光学编码

前述基本原理部分从数学上阐述了光学编码如何实现波前编码光学传递函数对环境温度变化不敏感。数字解码器的模型是理想的, 受光学相位板制备工艺水平的限制, 实际加工出来的光学编码器 (光学相位板) 不是理想的, 结果导致光学编码与数字解码在信息空间中存在“不匹配”问题。该问题最终引起解码图像质量下降, 具体表现为解码图像伪像严重、图像分辨率降低。由于光学相位板是波前编码红外成像系统完成光学编码的物理载体, 光学相位板的面形设计、加工制备、装配、热变形等环节直接影响光

学编码效果,因此光学编码是波前编码红外成像系统的一项关键技术。接下来,文中重点阐述光学相位板的面形参数设计与优化、光学相位板的制备材料及工艺、热特性分析。

由于三次相位板具有大范围的无热化温度范围,国际上波前编码红外成像系统的光学相位板普遍采用三次相位板<sup>[18]</sup>,其形式如公式(6)所示。

在此基础上进行改进的面形,采用广义三次面形为<sup>[19]</sup>:

$$z(x,y) = \alpha(x^3 + y^3) + \beta(x^2y + xy^2) \quad (10)$$

在此基础上增加了 2 次和 5 次项的多项式面形<sup>[20]</sup>:

$$z(x,y) = \alpha(x^2 + y^2) + \beta(x^3 + y^3) + \gamma(x^5 + y^5) \quad (11)$$

参考文献[21]提出将三次相位面与球面表面集成在同一表面的方案:

$$z(x,y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} + \alpha(x^3 + y^3) \quad (12)$$

在光学相位板面形参数优化设计方面,目前优化算法<sup>[22-23]</sup>主要是以提高温变的 MFT (或 PSF) 与常温 MFT (或 PSF) 的相似性为优化目标函数,同时以常温 MTF 值高于给定的经验值为约束条件。

在光学相位板材料选择方面,可用于光学相位板制备的红外材料有锗、硒化锌、硫化锌、硅、硫系玻璃等。现有波前编码红外成像系统中光学相位板采用锗<sup>[19, 23-26]</sup>和硒化锌<sup>[27]</sup>、硫化锌<sup>[22]</sup>。冯斌等<sup>[27]</sup>对比分析了两种材料用于制作三次相位板区别,结果表明:在光程差给定条件下,由于硒化锌材料的折射率低,硒化锌材料光学相位板具有的允许制造误差是锗材料光学相位板的 2.14 倍。

在光学相位板制备工艺方面,由于波前编码红外成像系统中的光学相位板通常属于自由曲面且用于制作光学相位板的红外材料通常为脆性材料,在加工过程中容易发生“脱落”现象,为了保证光学相位板具有高的光洁度,需要在具有快刀伺服系统的单点金刚石车床上制备完成<sup>[25]</sup>。粒子注入辅助纳米加工 (NiIM) 方法<sup>[28-29]</sup>,通过粒子注入辅助方式改变被加工材料表层的可加工性能,实现硬脆材料平面及复杂面形的高效切削加工,解决了硬脆材料无法采用切削技术制造光学自由曲面的难题。

在制备过程中,为了保证光学相位板被吸附,将光学相位板元件中与三次相位面对应的表面设计为平面<sup>[25]</sup>。在两透镜的波前编码红外成像系统研制过程中,为了减少波前编码红外成像系统的透镜数量,与三次相位面对应的表面设计为非球面<sup>[23]</sup>。

在光学相位板的热效应研究方面。2012 年,哈尔滨工业大学的陈守谦等<sup>[30]</sup>分析了基于波前编码技术的无热化红外光学系统中光学相位板的自身热效应,得到了不同温度下在光瞳处光学相位板的相位函数变化形态。2016 年,冯斌等<sup>[31]</sup>考虑到波前编码无热化红外成像系统在温变过程中光学相位板也会发生温变,揭示了波前编码红外成像系统中光学相位板的温变对解码图像的影响机理,构建了温变对点扩散函数 (PSF) 一致性的影响模型;在该模型中,推导出将温变对三次相位板的影响等效为在常温下增加一片虚拟的三次相位板。

在光学编码对 PSF 一致性或数字解码图像质量的影响方面。2018 年, Cai 等<sup>[32]</sup>利用 SolidWorks 和 ZEMAX 软件的配合简化光、机、热的集成分析流程,基于有限元分析法对温度梯度下波前编码系统的热效应及成像质量进行定量分析,比较了温变条件下波前编码成像系统的 PSF(MTF) 一致性。2020 年,冯斌等<sup>[15]</sup>从理论上分析了波前编码红外成像系统中光学点扩散函数 (PSF) 数字化偏离对解码图像质量的影响机理,并以结构相似性 (MSSIM) 指标<sup>[33]</sup>进行了定量评价,同时给出实测波前编码 PSF 图像的实验装置和方法。

## 2.2 数字解码

波前编码红外成像链路中,光学编码的点扩散函数与用于数字解码的点扩散函数在信息空间的“不匹配”,将引起解码图像存在伪像,最终影响解码图像的清晰程度。波前编码红外成像链路中,由于探测器输出的中间编码图像包含着探测器噪声,数字解码处理造成噪声放大的缺陷<sup>[25]</sup>,如何抑制解码图像的伪像和噪声是个有待解决的问题。因此,数字解码是波前编码红外成像系统的另一项关键技术。目前波前编码红外成像系统的数字解码研究,主要围绕寻找最优数字解码算法、解码算法的实时硬件设计、中间编码图像的噪声抑制,解码图像质量影响等开展。波前编码

红外成像系统中数字解码处理的算法主要有: 逆滤波器, Wiener 滤波图像复原方法<sup>[34]</sup>、Richardson-Lucy 图像复原方法<sup>[19]</sup>、约束最小二乘 (CLS) 解码算法<sup>[35]</sup>等。在数字解码过程中, 数字解码算法容易将中间编码图像的噪声放大, 张程硕等<sup>[25]</sup>提出将收缩映射函数 (Shrinkage function) 用于波前编码红外成像系统的数字解码, 并取得了良好的解码图像效果。在数字解码算法的硬件实时性方面, 英国 Qioptiq 公司的 Hasler 等<sup>[35]</sup>, 针对 Wiener 滤波图像复原在频域内不适合用 FPGA 硬件电路来实现并行计算, 提出改进数字解码算法并开发了具有实时性的数字解码硬件电路。

### 3 系统设计与样机研制

#### 3.1 仿真设计

2005 年, 美国 CDM Optics 公司的 Kubala 等<sup>[36]</sup>设计了一套波前编码红外成像系统, 其  $F$  数为 1.3、视场为  $15^\circ$ 、工作波段为  $8\sim 12\ \mu\text{m}$ , 三片透镜材料均为锗材料。

2008 年, 西班牙的 Infante 等<sup>[37]</sup>将波前编码红外成像技术应用于双视场的普通红外成像系统。

2011 年, 北京空间机电研究所的张秉隆等<sup>[38]</sup>针对在轨运行环境 (如温度变化、振动、微重力等) 引起空间红外成像系统发生离焦并导致像质下降, 设计了一套波前编码红外成像系统, 其光学系统孔径为  $80\ \text{mm}$ 、视场为  $1.3^\circ$ 、工作波段为  $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 、光学编码元件采用三次相位板。

2011 年, 天津津航技术物理研究所的冯俐铜等<sup>[39]</sup>, 设计了一套波前编码红外成像系统, 其光学系统的有效焦距  $f=100\ \text{mm}$ 、 $F$  数为 1.2、工作波段为  $7.5\sim 13.5\ \mu\text{m}$ 、在光阑处放置一块三次相位板, 仿真模拟波前编码红外光学系统在  $-40\sim +60^\circ\text{C}$  温度范围内的性能变化。

2012 年, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的吕天宇等<sup>[40]</sup>应用 Code V 光学仿真软件设计了一个焦距  $f=100\ \text{mm}$ 、 $F$  数为 2、工作波段为  $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 、设计温度为  $20^\circ\text{C}$ 、镜头材料为锗的波前编码中波红外光学系统。

2015 年, 中国空空导弹研究院的李福巍等<sup>[41]</sup>, 设计了波前编码中波制冷红外成像系统, 其有效焦距  $f=100\ \text{mm}$ 、 $F$  数为 2、视场为  $\pm 1.5^\circ$ 、工作波段为  $3\sim 5\ \mu\text{m}$

的红外光学系统, 工作温度范围为  $-45\sim +60^\circ\text{C}$ 。

2019 年, 天津大学的谢洪波等<sup>[20]</sup>设计了一套波前编码中波制冷红外成像系统, 该系统的焦距  $f=147\ \text{mm}$ 、光学视场  $4.378^\circ$ 、工作温度为  $-40\sim +70^\circ\text{C}$ 。

2021 年, 西安工业大学的张发强等<sup>[42]</sup>设计了一套三片式波前编码长波红外成像系统, 其工作温度范围为  $-40\sim +60^\circ\text{C}$ 、焦距  $f=45\ \text{mm}$ 、 $F$  数为 1.5、红外探测器选用面阵为  $320\times 256$ 、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、工作波段为  $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 。

上述国内外科研机构开展了多款波前编码红外成像系统的仿真设计, 仅在不考虑光学相位板加工制造误差和探测器噪声条件下, 将无热化温度范围内 MTF 曲线或 PSF 图像或者解码图像的一致性作为评价依据, 从原理上仿真验证波前编码无热化红外成像技术的可行性。因此, 有必要开展波前编码红外成像系统样机的物理实验验证。

#### 3.2 样机研制

2009 年, 英国的 Heriot-Watt 大学的 Muyo 等<sup>[19]</sup>利用波前编码技术减少红外成像系统的光学像差, 设计了一个单透镜的波前编码红外成像系统, 开展了验证实验, 实验结果如图 2 所示。

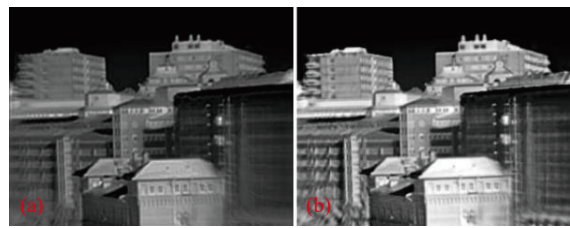


图 2 英国 Heriot-Watt 大学的解码图像效果<sup>[19]</sup>。(a) 空间不变 Lucy-Richardson 算法; (b) 空间变化 Van-Cittert 算法

Fig.2 Decoded images by Heriot-Watt University<sup>[19]</sup>. (a) Spatially-invariant Lucy-Richardson algorithm; (b) Spatially variant Van-Cittert algorithm

2010 年, 英国 Qioptiq 公司的 Hasler 等<sup>[35]</sup>研制了具有实时处理能力的波前编码红外成像系统样机, 开展了验证实验, 实验结果如图 3 所示。

2011 年, 哈尔滨工业大学的陈守谦等<sup>[22]</sup>研制了一套波前编码红外成像系统, 其工作温度范围为  $-40\sim +60^\circ\text{C}$ 、工作波段为  $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 、焦距  $f=76\ \text{mm}$ 、

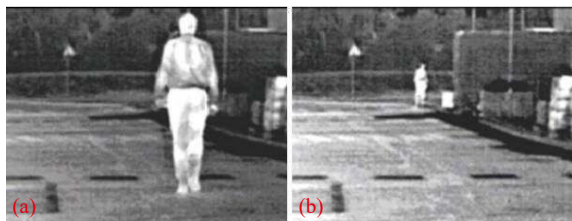


图 3 英国 Qioptiq 公司的解码图像效果<sup>[35]</sup>。(a) 30 m; (b) 125 m

Fig.3 Decoded image by Qioptiq Ltd<sup>[35]</sup>. (a) 30 m; (b) 125 m

$F$  数为 2.4、视场为  $3^\circ$ 、硫化锌 (ZnS) 材料的三次相位板。

2015 年, 北京理工大学的陈迪等<sup>[43]</sup>加工了 2 片式波前编码红外成像镜头和 1 片式波前编码红外成像镜头, 其中光学编码采用三次光学相位板。

2016 年, 冯斌等研制一套硒化锌 (ZnSe) 红外材料为光学相位板的波前编码红外成像系统<sup>[27]</sup> (见图 4), 其光学编码采用 ZnSe 材料的三次相位板 (见图 5)、工作温度范围为  $-40\sim+60^\circ\text{C}$ 、工作波长为  $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 、焦距  $f=65\ \text{mm}$ 、 $F$  数为 1.0、视场范围为  $6^\circ\times 8^\circ$ 、 $320\times 240$  面阵的非制冷红外探测器, 并开展了无热化验证实验 (见图 6)。



图 4 ZnSe 相位板的波前编码红外成像系统<sup>[27]</sup>

Fig.4 Wavefront coding infrared imaging system of ZnSe phase mask<sup>[27]</sup>

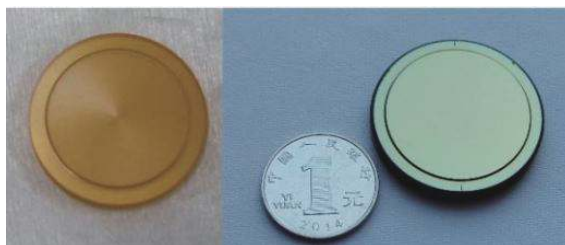


图 5 ZnSe 相位板, (左) 未镀膜, (右) 镀膜后<sup>[27]</sup>

Fig.5 ZnSe phase mask, Left: Uncoated, Right: Coated<sup>[27]</sup>

2017 年, 冯斌等<sup>[26]</sup>研制了一套无热化温度范围为  $110^\circ\text{C}$  的波前编码红外成像系统及用作性能比较

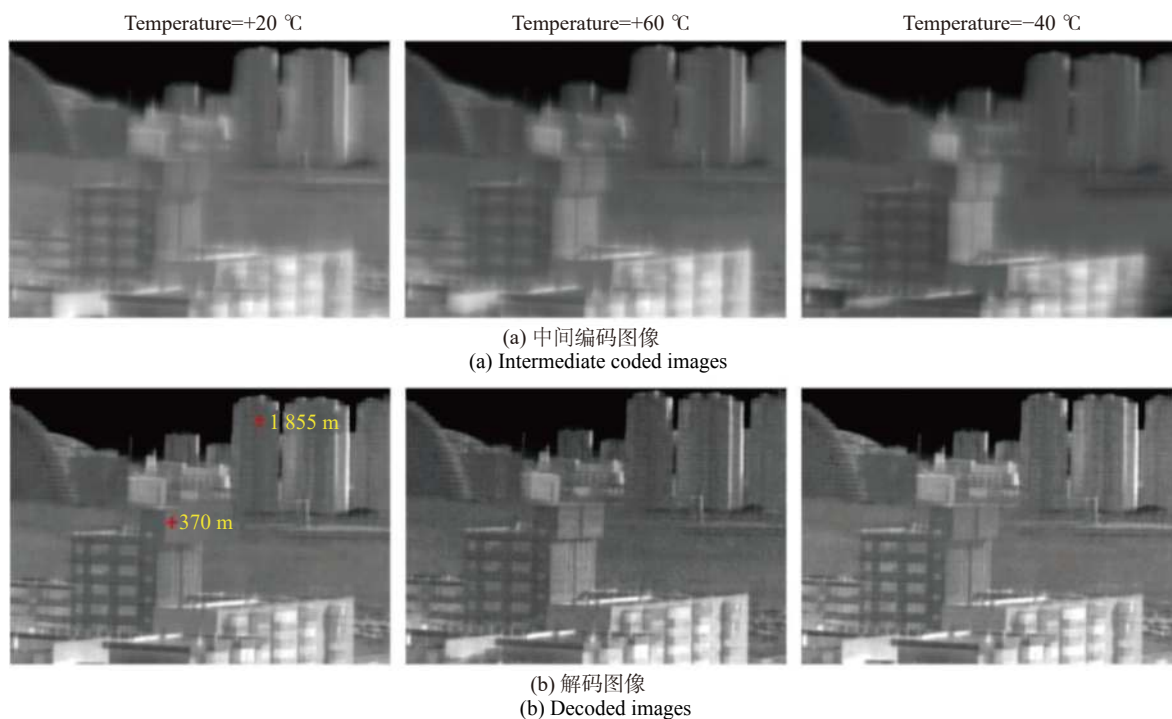


图 6 ZnSe 相位板波前编码红外成像系统样机的无热化实验结果<sup>[27]</sup>

Fig.6 Athermalization experimental results of wavefront coding infrared imaging system with ZnSe phase mask<sup>[27]</sup>

的普通红外成像系统 (见 图 7), 其光学编码采用锗 (Ge) 材料的三次相位板 (见 图 8), 其工作温度范围为  $-40\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、焦距  $f=65\text{ mm}$ 、 $F$  数为 1.0、视场范围为  $6^{\circ}\times 8^{\circ}$ ; 探测器为  $320\times 240$  面阵的非制冷红外探测器, 像元尺寸为  $38\text{ }\mu\text{m}$ 、工作波段为  $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 。图 9 为该系统在常温下的实验结果, 解码图像质量明显优于 图 2 和 图 3 中的实验结果。

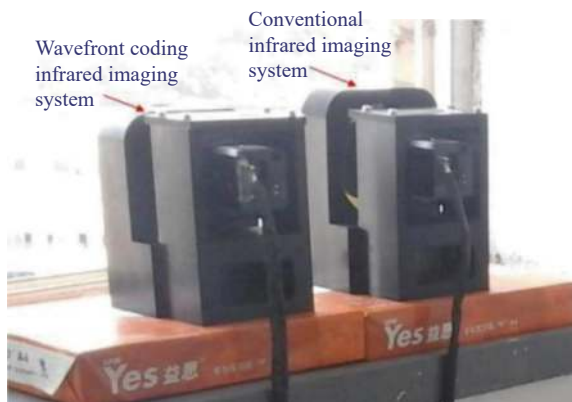


图 7 波前编码红外成像系统样机 (含锗材料相位板)<sup>[26]</sup>

Fig.7 Wavefront coding infrared imaging system with Ge-material phase mask<sup>[26]</sup>



图 8 锗材料相位板。(左) 未镀膜;(右) 镀膜后<sup>[26]</sup>

Fig.8 Ge-material phase mask. Left: Coated; Right: Uncoated<sup>[26]</sup>

图 10 所示为冯斌等<sup>[26]</sup>利用上述锗材料相位板的波前编码红外成像系统样机开展了与普通红外成像系统的对比实验<sup>[26]</sup>, 结果表明所研制的波前编码无热化红外成像系统与普通红外成像系统相比, 具有三个优点: (1) 在  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  的宽温度范围内工作良好; (2) 成像系统的焦深扩展了 15.2 倍; (3) 解码图像与聚焦清晰红外图像的结构相似性 (MSSIM<sup>[33]</sup>) 指标值高于 0.85。

2017 年, 冯斌等<sup>[23]</sup>研制两透镜的宽视场波前编码红外成像系统 (见 图 11)。光学相位板为双面型 (前面为非球面, 后面为三次面型, 见 图 12), 材料为 Ge。其工作视场范围为全视场为  $25^{\circ}$ , 工作温度范围为  $-20$



图 9 波前编码红外成像系统样机 (含锗材料相位板) 的常温实验结果<sup>[25]</sup>

Fig.9 Room-temperature experiment results of wavefront coding infrared imaging system with Ge-material phase mask<sup>[25]</sup>

$\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 其探测器为  $640\times 512$  面阵的非制冷红外探测器、像元尺寸大小为  $17\text{ }\mu\text{m}$ 、工作波段为  $8\sim 13.5\text{ }\mu\text{m}$ , 并开展了无热化验证实验 (见 图 13)。

2020 年, 北京遥感设备研究所的周军等<sup>[44]</sup>, 利用波前编码扩大焦深的原理, 进行了 10 倍焦深扩大的双色红外光学系统像差钝设计, 并且研制了样机, 其光学系统的  $F$  数为 1.4, 两个工作波长分别为  $6.5\sim 8.5\text{ }\mu\text{m}$  和  $9\sim 10.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

2016 年以前, 波前编码红外成像系统样机输出的解码图像普遍存在伪像严重或噪声放大的突出问题。2016 年以后, 波前编码红外成像系统样机从无热化温度范围、焦深扩展范围、解码图像质量三个方面均取得较大进展, 是光学与信息处理两个环节共同提高的结果, 具体涉及改进措施: 利用理论分析波前编码红外成像的无热化原理, 优化设计光学相位板面形参数, 采用离子注入辅助纳米加工 (NiIM) 方法改善

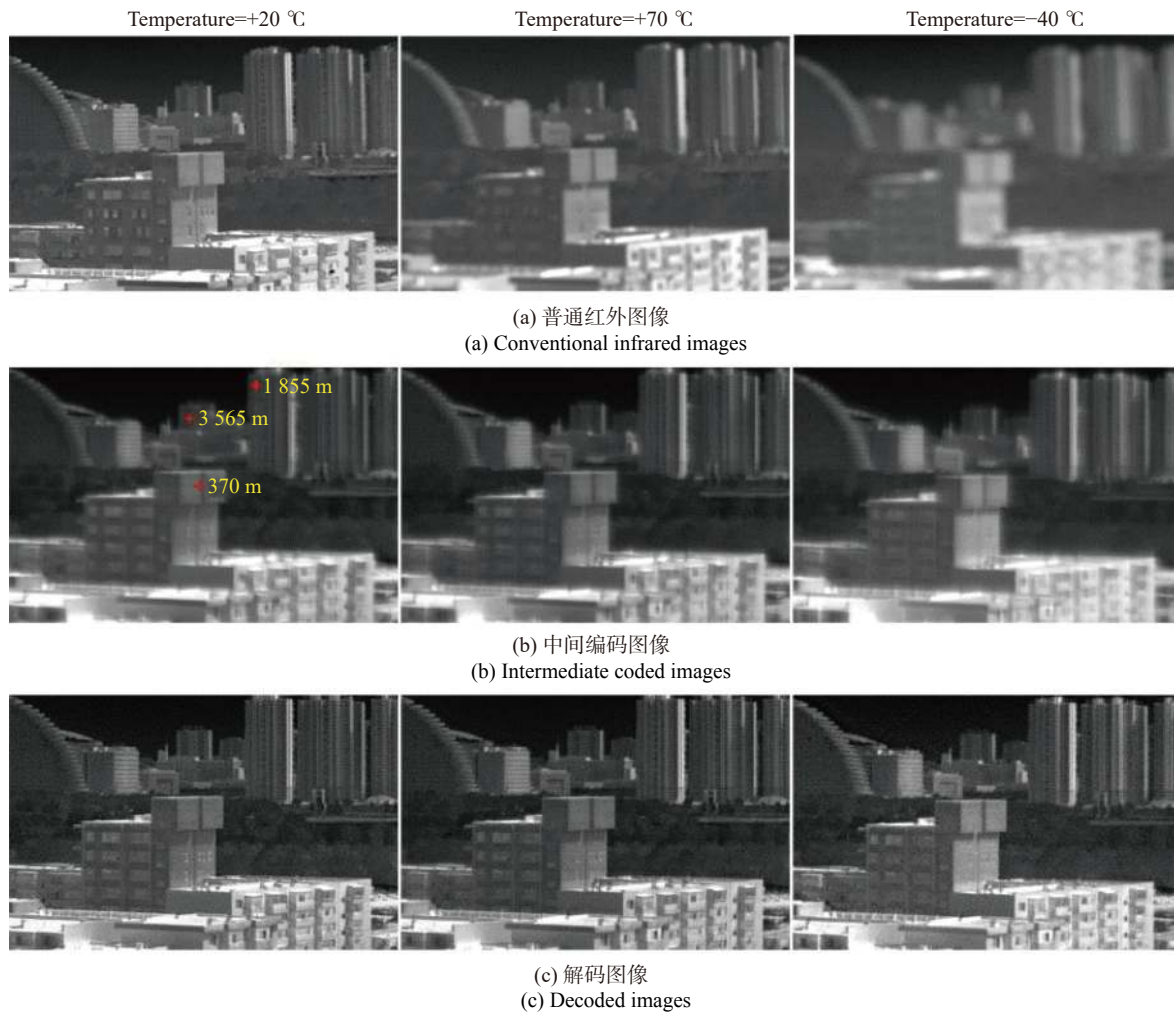


图 10 波前编码红外成像系统样机(含锗材料相位板)的无热化实验结果<sup>[26]</sup>

Fig.10 Athermalization experimental results of wavefront coding infrared imaging system with Ge-material phase mask<sup>[26]</sup>

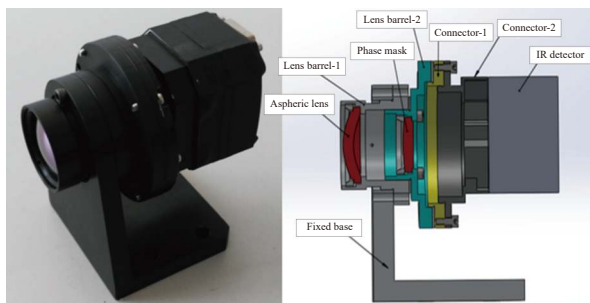


图 11 两透镜的宽视场波前编码红外成像系统<sup>[23]</sup>

Fig.11 Wavefront coding infrared imaging system with two lenses and wide field of view<sup>[23]</sup>



图 12 宽视场波前编码红外成像系统中双面型光学相位板的非球面(图左)和三次面(图中)<sup>[23]</sup>

Fig.12 Aspheric (left) and cubic (middle) surface of phase mask mounted in wide-FoV wavefront coding infrared imaging system<sup>[23]</sup>

光学相位板的面形加工精度和表面粗糙度,采用 Zernike 多项式拟合面形误差以逼近实际波前编码红外成像系统的点扩散函数 PSF,采用基于收缩映射函

数的数字解码算法。该研究进展体现了光电联合优化的重要性。



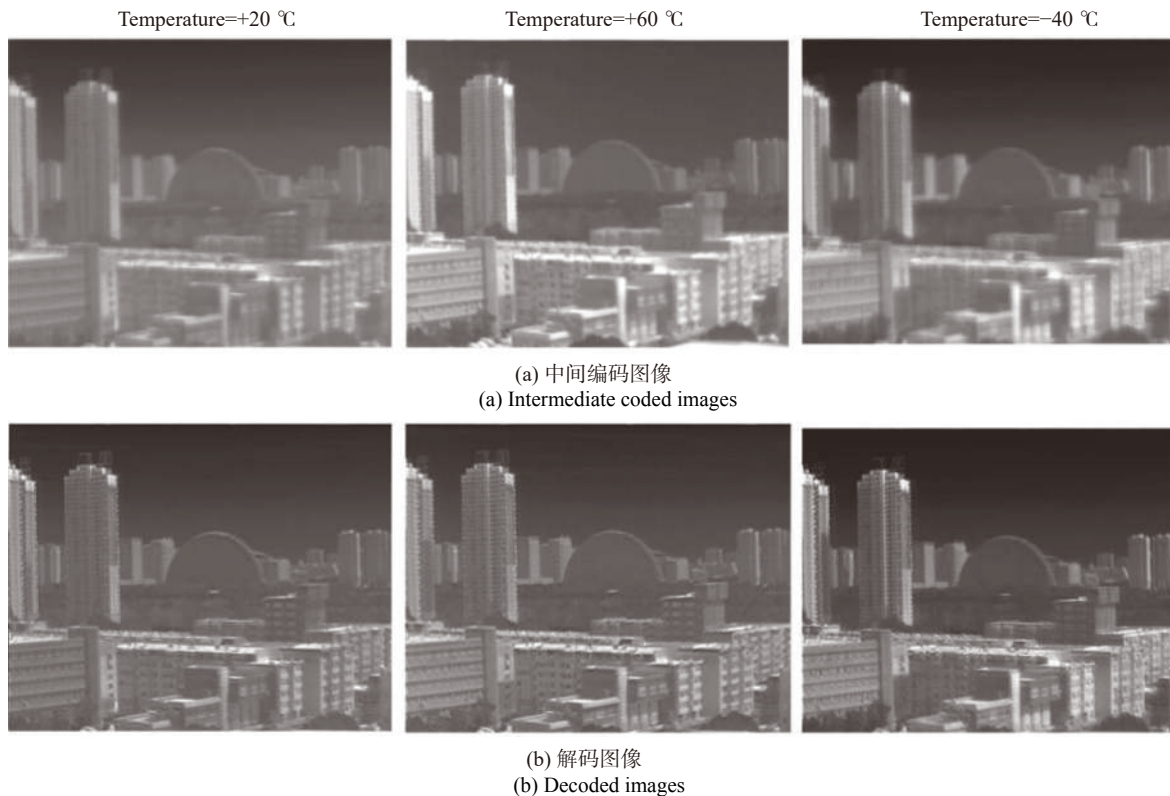


图 13 两透镜大视场波前编码红外成像系统的无热化实验结果<sup>[23]</sup>

Fig.13 Athermalization experimental results of wavefront coding infrared imaging system with two lenses and wide FoV<sup>[23]</sup>

#### 4 现存问题及展望

综上所述,目前国内外对波前编码红外成像技术的研究主要集中在利用波前编码成像技术扩大景深,提高红外成像系统的温度适应范围,降低红外光学系统的像差,以及减少整个红外光学系统的体积、重量和成本,侧重于对基本原理的仿真和实验验证。

现阶段,波前编码红外成像技术存在如下有待于解决的难题:

(1) 现有波前编码成像技术难以应用于变焦红外光学系统的无热化设计,是个有待于解决的难题。波前编码红外成像系统设计过程中,需要考虑普通红外光学系统和无热化温度范围等参数;红外光学系统的连续变焦,将增加光学相位板参数的设计难度,同时红外光学系统的连续变焦将导致光学 PSF 连续变化,增加在数字解码设计中保持数字解码核与光学编码器“匹配”的难度。连续变焦对光学相位板和数字解码器的设计均提出了挑战。

(2) 波前编码成像质量评价是技术应用所面临的一个基础问题。在波前编码红外成像系统中,光学编

码与数字解码在信息空间中的“不匹配”问题引起解码图像存在“伪像”,降低了对场景细节的分辨能力,对波前编码红外成像技术后续应用产生不同程度的影响。因此,结合具体应用为导向的解码图像质量评价是个有待于解决的难题。

未来波前编码红外成像技术有望在航天领域获得应用:

(1) 波前编码成像技术用于空间红外相机的无热化、轻小型化。

对于大口径、长焦距的红外光学系统,其离焦量对温度变化更为敏感,波前编码对其体积、重量和成本的改善更为明显。现有的波前编码红外成像系统主要采用透射式结构,对于大口径、长焦距、折反式的红外成像系统,波前编码技术用于减小体积和质量、降低成本,同样值得深入研究。

(2) 波前编码成像技术有望用于红外导引头反激光对抗干扰。

强激光会损伤探测器靶面,导致致眩、致盲,光学编码器可以将光斑散开,大大削弱能量汇聚,起到保护作用<sup>[45]</sup>。

未来波前编码红外成像技术的新工艺、新方法、新技术同样值得深入研究:

(1) 光学编码元件的压膜制作工艺值得探索研究。光学相位板的制作工艺采用单点金刚石车削工艺来完成,成本下降有限,随着国内红外镜头采用压膜工艺的普及,结合后端数字解码环节的加工误差补偿方法,采用压膜工艺制作波前编码红外光学系统的光学相位板值得深入研究。

(2) 将深度学习引入至波前编码红外成像技术值得探索研究。现有的波前编码红外成像系统的数字解码处理通常采用模型法,普遍存在伪像严重和噪声放大的缺陷,深度神经网络具有良好的非线性映射拟合能力,在解码环节上进行基于深度学习的数字解码处理,有望获得更好的解码图像效果。

(3) 波前编码超分辨红外成像技术值得探索研究。国际上对利用波前编码技术提高可见光红外相机已有报道<sup>[46]</sup>,但对提高红外相机的成像分辨率尚未公开报道,探索研究利用波前编码提高红外相机成像分辨率的新机理、新方法和新技术,具有理论和应用价值。未来将波前编码无热化红外成像系统拓展为同时具有超分辨成像的波前编码红外成像系统,同样是一个具有前瞻性的研究方向。

特别需要说明:除了文中的参考文献外,国内外公开了大量有关波前编码成像技术的文献,其中许多科研工作者提出了创新性的研究理论和方法;鉴于文中重点阐述波前编码红外成像技术的无热化应用,所以仅列举了该领域中无热化相关的部分文献。

#### 参考文献:

- [1] Zhu S, Wu Y, Zou P, et al. Environmental adaptability analysis and performance optimization of space-borne infrared detector assembly [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0204001. (in Chinese)
- [2] Yang D, Gao D, Cao Y, et al. Study on anti-Jamming technology of IR seeker [J]. *Flight Control & Detection*, 2020, 3(3): 79-85. (in Chinese)
- [3] Wang Y, He P, Meng C. Detection distance computation of the space borne infrared detector for hypersonic flight vehicles [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0704003. (in Chinese)
- [4] Zhang X, Jin W, Li L, et al. Research progress on passive infrared imaging detection technology and system performance evaluation of natural gas leakage [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S2): S204001. (in Chinese)
- [5] Grey D S. Athermalization of optical systems [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1948, 38(6): 542-546.
- [6] Nasyrov A R. Methods of athermalization of optical systems in thermal imaging devices [J]. *Journal of Optical Technology*, 2017, 84(3): 205-206.
- [7] Ford E H. Active temperature compensation of an infrared zoom lens [C]//Proc of SPIE, 1997, 3129: 138-143.
- [8] Yang H S, Kihm H, Moon I K, et al. Three-shell-based lens barrel for the effective athermalization of an IR optical system [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(33): 6206-6213.
- [9] Tyagur V M, Kucherenko O K, Murav'ev A V. Passive optical athermalization of an IR three-lens achromat [J]. *Journal of Optical Technology*, 2014, 81(4): 199-203.
- [10] Wood A P, Lewell L, Manning P A, et al. Passively athermalized hybrid objective for a far-infrared uncooled thermal imager [C]//Proc of SPIE, 1996, 2744: 500-509.
- [11] Piao M, Cui Q, Zhang B, et al. Optimization method of multilayer diffractive optical elements with consideration of ambient temperature [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(30): 8861-8869.
- [12] Londoño C, Plummer W T, Clark P P. Athermalization of a single-component lens with diffractive optics [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(13): 2295-2302.
- [13] Behrmann G P, Bowen J P. Influence of temperature on diffractive lens performance [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(14): 2483-2489.
- [14] Zhang C, Shi Z, Xu B, et al. Fast approach to infrared image restoration based on shrinkage function calibration [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(5): 053107.
- [15] Feng B, Shi Z, Liu H, et al. Effect of PSF position bias in wavefront coding infrared imaging system [J]. *Journal of Optics*, 2020, 22: 025703.
- [16] Muyo G, Harvey A R. Wavefront coding for athermalization of infrared imaging systems [C]//Proc of SPIE, 2004, 5612: 227-235.
- [17] Cai H. Study on athermal properties of infrared wavefront coding system and optimization design [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [18] Dowski E R, Cathey W T. Extended depth of field through wave-front coding [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(11): 1859-1866.
- [19] Muyo G, Singh A, Andersson M, et al. Infrared imaging with a wavefront-coded singlet lens [J]. *Optics Express*, 2009, 17(23):

- 21118-21123.
- [20] Xie H, Su Y, Zhu M, et al. Athermalization of infrared optical system through wavefront coding [J]. *Optics Communications*, 2019, 441: 106-112.
- [21] Wang Y, Qiu R, Li Q, et al. Low-cost athermalization of infrared optical system based on wavefront coding [J]. *Flight Control & Detection*, 2020, 3(6): 84-94. (in Chinese)
- [22] Chen S Q, Fan Z G, Xu Z G, et al. Wavefront coding technique for controlling thermal defocus aberration in an infrared imaging system [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3021-3023.
- [23] Feng B, Shi Z, Zhao Y, et al. A wide-FoV athermalized infrared imaging system with a two-element lens [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 87: 11-21.
- [24] Chen D, Dong L Q, Zhao Y J, et al. Research on the controlling thermal defocus aberration for the infrared imaging system based on wavefront coding [C]// Proc of SPIE, 2014, 9192: 919209.
- [25] Feng B, Zhang X, Shi Z, et al. Reduction of artefacts and noise for a wavefront coding athermalized infrared imaging system [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(7): 075703.
- [26] Feng B, Shi Z, Chang Z, et al. 110 °C range athermalization of wavefront coding infrared imaging systems [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 157-162.
- [27] Feng B, Shi Z, Xu B, et al. ZnSe-material phase mask applied to athermalization of infrared imaging system [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(21): 5715-5720.
- [28] Fang F Z, Chen Y H, Zhang X D, et al. Nanometric cutting of single crystal silicon surfaces modified by ion implantation [C]//CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 527-530.
- [29] Wang J S, Fang F Z, Zhang X D. An experimental study of cutting performance on monocrystalline germanium after ion implantation [J]. *Precision Engineering*, 2015, 39: 220-223.
- [30] Chen S, Fan Z, Xu Z, et al. Thermal effect on odd-symmetric phase mask in wavefront-coded athermalized infrared imaging systems [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2012, 3(3): 210-215. (in Chinese)
- [31] Feng B, Shi Z, Zhang C, et al. Analytical model for effect of temperature variation on PSF consistency in wavefront coding infrared imaging system [J]. *Optics Communications*, 2016, 367: 35-43.
- [32] Cai H, Dong X, Zhu M, et al. Study on the properties of infrared wavefront coding athermal system under several typical temperature gradient distributions [C]//Proc of SPIE, 2018, 10620: 106200 D.
- [33] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: From error measurement to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [34] Khan M M R, Sakib S, Arif R B, et al. Digital image restoration in Matlab: a case study on inverse and Wiener filtering [C]// IEEE International Conference on Innovation in Engineering and Technology (ICIET), 2018: 1-6.
- [35] Hasler I, Bustin N, Price D. Thermal imaging system using optimised wavefront coding operating in real-time [C]//Proc of SPIE, 2010, 7834: 783402.
- [36] Kubala K S, Wach H B, Chumachenko V V, et al. Increasing the depth of field in an LWIR system for improved object identification [C]//Proc of SPIE, 2005, 5784: 146-156.
- [37] Infante J M, de la Fuente M C. Wavefront coding using coma aberration for dual field of view IR systems [C]//Proc of SPIE, 2008, 7000: 70001 Q.
- [38] Zhang B, Li B, Su Y, et al. Temperature sensitivity reduction of MWIR space image sensor by wavefront coding [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(2): 48-54. (in Chinese)
- [39] Feng L, Meng J, Dun X, et al. Wavefront coding for athermalization of infrared imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 83-86. (in Chinese)
- [40] Lv T, 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): 26-28. (in Chinese)
- [41] Li F, Zhang Y, Pan G, et al. Application study on wavefront coding in infrared air-to-air missile [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(6): 488-491. (in Chinese)
- [42] Zhang F, Feng B, Li H. Research on athermalization design of infrared optical system based on wavefront coding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(22): 2208001. (in Chinese)
- [43] Chen D. Research on the infrared imaging system based on wavefront coding [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [44] Zhou J, Chen S, 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. (in Chinese)
- [45] Wang L, Sun X, Ye Q. Retroreflection analysis of wavefront coding imaging system [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(4): 418-429. (in Chinese)
- [46] Zhao H, Wei J, Pang Z, et al. Wave-front coded super-resolution imaging technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0422003. (in Chinese)