

基于波前编码的大焦深弹载双色红外探测系统

周 军¹, 陈守谦², 甄 政¹, 欧 文¹, 熊 健¹

(1. 北京遥感设备研究所, 北京 100854;
2. 哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 波前编码技术通过在光学系统光瞳位置加入特殊的相位掩模板, 对目标信号光波进行编码调制, 并在图像处理端对该编码信号进行解码而恢复原图像, 由于被编码调制后的波前对离焦等像差的不敏感度扩大了十数倍, 能显著扩大光学系统焦深。因此, 波前编码技术能在编码与解码之间解决恶劣力学条件或多色制导体制对弹载红外探测系统带来的离焦和对准误差。文中基于波前编码扩大焦深基本原理, 对一长长双色红外光学系统进行了 10 倍焦深扩大的波前编码像差钝化设计。集成样机后, 进行了波前编码成像实验。以小孔点靶编码像作为 PSF 解码 10 倍离焦位置处的十字靶和四条靶图像, 十字靶和四条靶解码图像清晰可辨, 证明波前编码技术对于系统像差或离焦像差的抑制是有效的。最后, 对波前编码成像效果进行了分析: 解码图像的水波纹是由于空间采样 PSF 不足导致的, 可提取不同视场位置 PSF, 使用空间变化解码算法实现条纹消除; 由于解码图像会在放大信号的同时放大噪声, 因此, 解码算法需要进一步研究噪声抑制算法, 以期满足弹载高能量、高信噪比应用的要求。

关键词: 波前编码; 焦深; 红外探测; 像差钝化

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0404001

Double bands missile-borne infrared detection system of extended focus depth based on wavefront coding

Zhou Jun¹, Chen Shouqian², Zhen Zheng¹, Ou Wen¹, Xiong Jian¹

(1. Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100854, China;
2. Research Center for Space Optics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In the technology of wavefront coding, a special phase mask is put at the position of optical system stop. Then the goal signal wavefront will be coded. At the image processing part, the coded signal will be decoded to the original image. Because the insensitivity of the coded wavefront to the defocus and other aberrations is ten times more, the focus depth will be extended ten times more. So the wavefront coding can solve the defocus and alignment error caused by terrible mechanics and heat environment using coding and decoding. Based on the extended focus depth principle of wavefront coding, an aberration inactivation long/long double bands infrared optical system was designed. The focus depth was extended to be 10 times more. Imaging test was carried out with the wavefront coding prototype. The coding image of the spot-bar was used as the PSF to decode the image at the 10 times defocus position of cross-bar and four-bar. After decoding, the image of cross-bar and four-bar was with high resolution. At the last, the imaging results of wavefront coding were analyzed. The ripple of decoding picture was caused by not enough spatial sampling. After sampling PSF of different field, the ripple

收稿日期: 2019-12-20; 修订日期: 2020-01-11

基金项目: 国防基础科研基金 (JCKY2016204B201)

作者简介: 周军 (1988-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事光电探测、光学系统设计及仿真方面研究工作。Email: zhoujun0330.good@163.com

could be eliminated by using decoding algorithm of spatial transformation. The signal and noise would be extended at same time while the image was decoding. So the noise suppression algorithm used in decoding should be further researched to satisfy the missile-borne demand of more energy and higher signal to noise ratio.

Key words: wavefront coding; focus depth; infrared detection; aberration inactivation

0 引言

红外导引头工作环境极其恶劣,其制导精度容易随温度环境、随机振动而发生漂移;为提高对复杂场景目标的识别能力,双色制导乃至多色制导是红外导引头的发展趋势,然而双色/多色红外导引头制造、装调过程中对准精度要求极高而现有制造、装调手段较难满足要求。恶劣工作条件或多色制导体制对弹载红外探测系统带来的一个最主要误差是离焦。由于离焦主要是由红外光学系统带来的,因此,增大红外光学系统的焦深是解决以上问题最直接的途径。但光学系统的焦深由其 $F/\#$ 和工作波段决定,对弹载红外光学系统而言,其焦深是一个固定且较小的值。

相比传统成像探测体制中只有光学成像这一步,波前编码是结合光学成像和数字图像处理两步成像的计算成像技术。其通过在系统光瞳位置加入特殊的相位掩模板,对目标信号光波进行编码调制,并在图像处理端对该编码信号进行解码而恢复原图像。由于被编码调制后的波前对离焦等像差的不敏感度扩大了十数倍,因此,波前编码技术能显著扩大光学系统焦深^[1-2]。此外,相比传统探测系统只捕获到目标的强度信息,波前编码系统还捕获到目标的相位、光谱、偏振等信息,对目标的识别能力会进一步增强^[3]。

综上,波前编码技术在编码与解码之间实现抑制光学导引头温度偏差、力学环境影响以及降低多色导引头的对准难度。文中基于波前编码技术扩大焦深的原理研制了成像样机,对成像样机采集、处理的图像进行了分析,验证了波前编码技术在扩大焦深方面的能力,同时基于弹载应用平台,分析了目前波前编码技术应用上存在的一些问题。

1 波前编码扩大焦深原理

普通光学系统中,目标景物经光学系统成像于光学系统像面处,根据傅里叶光学理论,不考虑噪声的情况下,成像的物理过程可描述为目标景物与光学系

统点扩散函数的卷积,空间频域为目标景物与光学传递函数的乘积。

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) \quad (1)$$

式中: $G(u, v)$ 为已知观测图像的频域; $H(u, v)$ 为光学系统点扩散函数 PSF 的频域,即光学系统的 OTF(当系统存在像差时,OTF 为退化函数); $F(u, v)$ 为目标景物的频域; u, v 为像素强度对应的空间频率。

如图 1 所示,波前编码系统中,通过在普通光学系统的光瞳面上加入一个相位掩模板对波前进行编码,使光学系统 PSF 和 OTF 对系统存在的像差不敏感,在探测器上成一系列模糊的编码图像,再对编码图像以图像复原的方式进行解码,得到清晰图像。

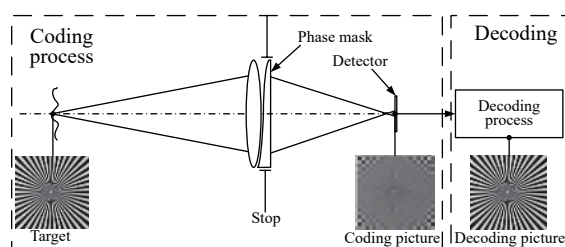


图 1 波前编码原理

Fig.1 Principle of wavefront coding

其成像过程的物理模型为:

$$\begin{aligned} G_{\text{encode}}(u, v) &= H_{\text{encode}}(u, v)F(u, v) \\ G_{\text{decode}}(u, v) &= H_{\text{decode}}(u, v)G_{\text{encode}}(u, v) = \\ &= H_{\text{decode}}(u, v)H_{\text{encode}}(u, v)F(u, v) \quad (2) \end{aligned}$$

式中: $G_{\text{encode}}(u, v)$ 为光学系统像面上获得的编码图像的频域; $H_{\text{encode}}(u, v)$ 为光学系统编码过程的 OTF; $G_{\text{decode}}(u, v)$ 为解码图像的频域,即为最终图像; H_{decode} 为光学系统解码过程的 OTF。

一般情况下,解码过程就是在已知系统编码过程 OTF 情况下完成图像复原过程。由于 OTF 为复数,计算时一般采用其模量 MTF。波前编码系统为两步成像,系统的 MTF 由编码和解码过程的 MTF 组成。图 2 为波前编码系统 MTF 与普通系统的差别。普通系统 MTF 随离焦变化明显,幅度迅速下降,离焦值较大时,空间频率出现截止现象,说明其成像质量对离

焦像差较为敏感。波前编码系统中, 编码 MTF 随离焦几乎无变化, 说明编码图像质量对离焦不敏感。尽管编码 MTF 值相对衍射受限系统有所下降, 但空间频率无截止, 由于编码 MTF 各离焦位置较为稳定, 可通过同一解码 OTF 实现不同离焦位置图像的解码, 解码后全系统的 MTF 接近于衍射限。

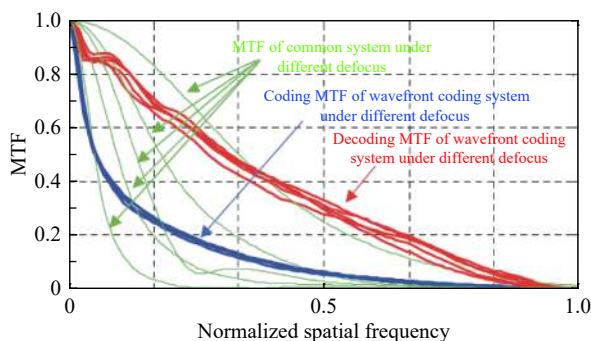


图 2 普通系统与波前编码系统 MTF

Fig.2 MTF of common system and wavefront coding system

建立相位掩模板参数优化函数实现相位掩模板参数优化, 得到 $a=5.12 \times 10^{-6}$, 将其代入光学设计软件, 得到如图 3 所示的光路。图 4 给出了在 $\pm 250 \mu\text{m}$ 离焦范围内波前编码光路在两个波段内的离焦特性, 可以看出: 波前编码系统在离焦范围内 MTF 调制度变化不大, 说明其具备较高的离焦像差抑制能力。

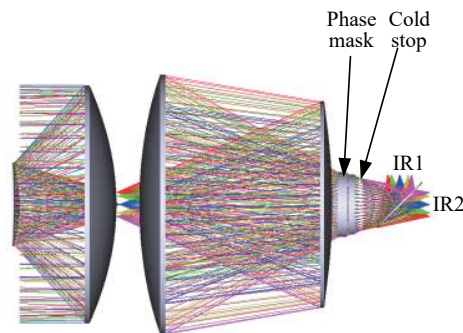


图 3 双色波前编码光路

Fig.3 Optical path of double bands wavefront coding

2 基于波前编码的双色红外光学系统像差钝化设计

所谓像差钝化设计是指通过设计特定的相位掩模板使得波前编码系统成像特性在所需的景深或动态像差范围内不变。Fisher 信息理论优化方法是相位掩模板参数优化的常用方法^[4-5]。使用 OTF 构造的 Fisher 评价函数可表示为:

$$\left[\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left| \frac{H^*(u_i, v_j, W_{20} = 0) H_0(u_i, v_j, W_{20} = 0)}{|H(u_i, v_j, W_{20} = 0)|^2 + K} \right|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \leq \sigma \quad (3)$$

式中: H 为规格化的 OTF; K 为噪声与场景功率谱之比; σ 为最小可接受的噪声放大。

考虑掩模板制造和装调, 掩模板相位采用三次多项式表征:

$$f(x, y) = ax^3 + ay^3 \quad (4)$$

式中: a 为多项式参数。

光学系统 $F/\#$ 为 1.4, 工作波长为 $6.5 \sim 8.5 \mu\text{m}$ (IR1) 和 $9 \sim 10.5 \mu\text{m}$ (IR2), 则其最小焦深为 $\Delta \approx \pm 2\lambda(F/\#)^2 = \pm 25 \mu\text{m}$ 。焦深若扩大 10 倍, 即为 $\pm 250 \mu\text{m}$, 将使得弹载光学系统完全满足力热环境和几乎不考虑双色对准精度。在 10 倍焦深位置分别提取系统各视场 PSF,

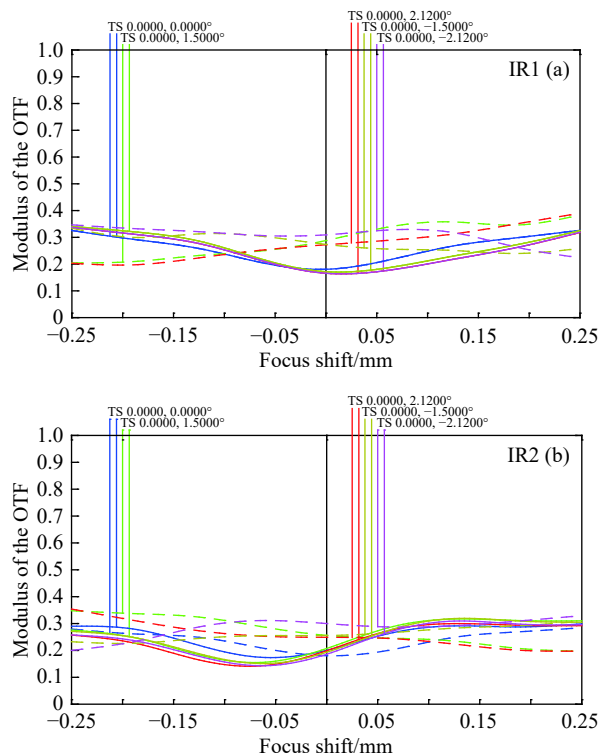


图 4 双色波前编码离焦特性 (10 lp/mm 处)

Fig.4 Defocus characteristics of double bands wavefront coding (at 10 lp/mm)

3 波前编码成像实验

图 3 所示波前编码系统在长焦大口径平行光管

系统中进行成像实验,目标是准直的红外靶标,红外目标包括点靶、十字靶和四条靶,在一定的目标与背景温差下记录编码图像,并将编码图像解码为原图像。由于验证波前编码技术的可行性只需一个波段的显示,因此,下文将以 IR1 波段采集的图像作为说明。

取小孔点靶采集的点目标图像作为实测 PSF,该 PSF 值被使用来解码十字靶和四条靶图像。图 5 为目标与背景温差为 5 °C 时波前编码系统记录的编码 PSF,为了便于观察,将图像灰度进行了拉伸处理。图中圆形区域内可以辨别出三角形图案,即为点靶标成的像,也就是系统 PSF。将该位置的图像提出来,经过处理即可获得所需的 PSF,用于去卷积复原。

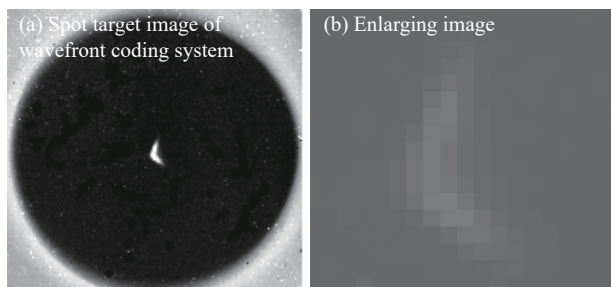


图 5 编码系统的 PSF(IR1 波段)

Fig.5 PSF of wavefront coding(IR1 brand)

调整探测器与光学系统的相对位置,使得离焦量为 300 μm,设置目标与背景温差为 5 °C,系统对十字靶和四条靶采集的图像如图 6、7 所示。从图 6、7 可以看出:解码图像清晰可辨,验证了波前编码技术对于系统像差或离焦像差的抑制能力。

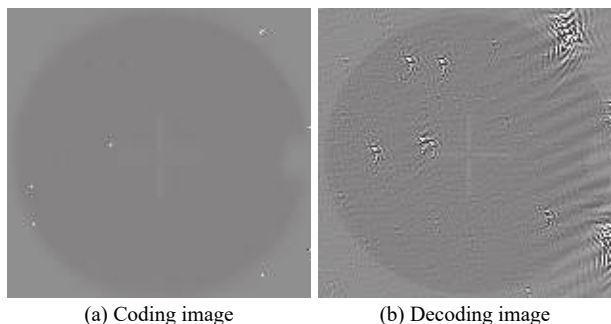
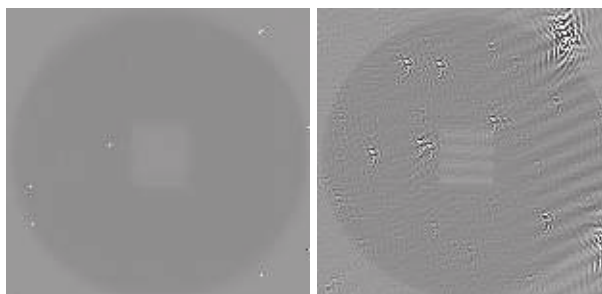


图 6 十字靶离焦 300 μm 时编码与解码图像 (IR1 波段)

Fig.6 Coding and decoding images of cross-bar at 300 μm defocus position (IR1 brand)



(a) Coding image (b) Decoding image

图 7 四条靶离焦 300 μm 时编码与解码图像 (IR1 波段)

Fig.7 Coding and decoding images of four-bar at 300 μm defocus position (IR1 brand)

4 波前编码技术在弹载平台应用中的问题

4.1 解码图像水波纹

从图 6、7 中可以看出:解码图像在非目标位置出现条纹,而在目标位置并未出现条纹。这是由于仅使用目标位置的 PSF 复原整幅图像产生的。由设计结果中的不同视场的 MTF 可以发现,尽管 MTF 在不同的离焦位置趋于一致,但其不同视场的情况下仍存在区别,其成像具有一定的空间变化特性。图 8 给出了点阵目标编码图像空间变化特性,从图中可见在不同的视场位置,其点目标图像存在差异。仅使用单一 PSF 复原编码图像时,将产生一定的伪像,这一伪像就是解码图像中的条纹。可在实际目标采集中,提取不同视场位置 PSF,使用空间变化解码算法实现条纹消除。

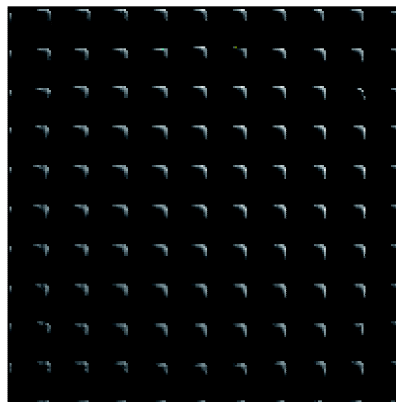


图 8 波前编码图像空间变化特性

Fig.8 Spatial variation characteristics of wavefront coding images

4.2 波前编码对探测信噪比的影响

传统成像系统由于制造与装调误差,实际系统的

传递函数相对衍射极限总是存在一定的下降,而波前编码技术可以通过解码使得系统传递函数接近衍射极限,因此波前编码技术对图像分辨率有一定的提高^[6],然而分辨率并不是弹载系统考虑的重点,能量的增加或信噪比的增加才是弹载系统考虑的重点。此外,传统成像系统的噪声在固定场景下可认为是一个固定值,波前编码技术在解码图像时会对信号进行消弥散处理,即放大信号,但与此同时会对这个固定噪声进行放大,处理不当就容易导致信噪比降低。

在实际系统中由于采集的编码图像中含有各种不同来源的噪声,单纯的LR去卷积方法不能保证图像重构的较好结果,使得解码图像噪声较大,在实际应用中,需对图像噪声进行抑制,使用去噪算法来获得像质更佳的成像结果^[7-8]。由于红外成像系统受外界环境影响较大,其解码图像一般噪声也将较大,这是波前编码技术在弹载红外系统应用过程中需要重点考虑的问题。

5 结 论

波前编码技术只需在传统光学系统的光瞳位置加入一片相位掩模板即可获得极大的焦深范围,这对工作在恶劣力热环境下的弹载红外成像系统而言是巨大利好。此外,为提高对复杂场景目标的识别能力,双色乃至多色共口径制导是红外导引头的发展趋势。由于目前双色共口径制导的焦点在集成探测器上,而集成探测器多芯片的对准又是一大制造、生产难题,采用波前编码技术增大焦深可以极大地缓解该难题。

基于弹载平台的应用,文中介绍了波前编码技术扩大焦深的原理,基于该原理进行了10倍焦深扩大的双色红外光学系统像差钝化设计,并集成样机进行了成像测试。测试结果表明:在10倍焦深位置的解码图像清晰可分辨,验证了波前编码技术对于系统像差或离焦像差抑制能力的可行性。最后,文中对波前编码的成像效果进行了分析:解码图像的水波纹是由于空间采样PSF不足导致的,可提取不同视场位置PSF,使用空间变化解码算法实现条纹消除;由于解码图像会在放大信号的同时放大噪声,因此解码算法需

要进一步研究噪声抑制算法,以期满足弹载高能量、高信噪比应用的要求。

参考文献:

- [1] Feng Litong, Meng Junhe, Dun Xiong, et al. Wavefront coding for athermalization of infrared imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 83-86. (in Chinese)
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.
- [2] 卢鑫, 程伟宁, 范哲源. 基于改善红外光学系统离焦变量的三次位相板波前编码技术浅析[J]. *科技风*, 2017(13): 15-16.
- [3] Li Fuwei, Zhang Yunqiang, Pan Guoqing, et al. Application study on wavefront coding in infrared air-to-air missile [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(6): 488-491. (in Chinese)
李福巍, 张运强, 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.
- [4] Chen Shouqian, Fan Zhigang, Xu Zhigao, 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. (in Chinese)
陈守谦, 范志刚, 许志高, 等. 基于波前编码的红外无热化光学系统相位掩模板热效应特性分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(3): 210-215.
- [5] Shi Yaotao. Research on aberration inactivation of optical imaging systems based on wavefront coding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 40-58. (in Chinese)
史要涛. 基于波前编码的光学成像系统像差钝化技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 40-58.
- [6] Zhao Hui, Wei Jingxuan, Pang Zhihai, et al. Wave-front coded super-resolution imaging technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0422003. (in Chinese)
赵惠, 魏静萱, 庞志海, 等. 波前编码超分辨成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 0422003.
- [7] Li Qingbo, Xu Zhigao, Chen Shouqian, et al. Detector noise in the wavefront coding imaging system recovery process [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011, 9(6): 15-20. (in Chinese)
李庆波, 许志高, 陈守谦, 等. 探测器噪声对波前编码成像系统图像复原过程影响的理论研究[J]. *光学与光电技术*, 2011, 9(6): 15-20.
- [8] Wu Yijian, Zhao Yuejin, Guo Xiaohu, et al. Research on signal-to-noise ratio characteristics and image restoration for wavefront coding[C]//SPIE, 2015, 9598: 95980O.