

文章编号:1007-2780(2021)11-1597-08

大景深空间目标成像光学系统设计

孙志伟^{1,2}, 刘伟奇^{1*}, 吕 博¹, 吴笑天¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了在不降低空间目标成像光学系统分辨率的前提下,扩展系统的景深,并且提高系统的可靠性,本文提出并设计了一种基于波前编码技术扩展景深的空间目标成像光学系统。在所设计的初始空间目标成像光学系统的基础上,基于不同物距调制传递函数曲线的一致性以及图像的可复原性优化了立方相位板,并且利用 FOPD 算法,对中间图像实现了较好的复原效果。对比了初始光学系统与波前编码光学系统的成像效果,结果显示波前编码光学系统的焦深和景深得到显著的扩展。该光学系统总长为 41 mm,焦距为 20 mm,工作波长为 850 nm。仿真实验结果表明,无需调焦机构,该系统的焦深达到了原系统的 28 倍,系统景深从 0.956~1.1 m 扩展至 0.5~130 m。该系统可满足于空间交会对接、卫星捕获等领域无调焦机构大景深成像的需求。

关键词:波前编码;空间目标成像;光学设计;点扩散函数;调制传递函数

中图分类号:TP391.4;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0183

Design of imaging optical system for space target with large depth of field

SUN Zhi-wei^{1,2}, LIU Wei-qi^{1*}, LYU Bo¹, WU Xiao-tian¹(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,**Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: In order to extend the depth of field and improve the reliability of the system without reducing the resolution of the imaging optical system for space target, this paper proposes and designs an imaging optical system for space target based on wavefront coding technology to extend the depth of field. On the basis of the initial imaging optical system for space target, the cubic phase plate is optimized based on the consistency of the modulation transfer function curves of different object distances and the recoverability of the images. The FOPD algorithm is used to achieve a better intermediate images recovery effect. The effects of the initial optical system and the wavefront coding optical system are compared, and the results show that the depth of focus and depth of field of the wavefront coding optical system have been significantly expanded. The total length of the optical system is 41 mm, the

收稿日期:2021-07-12;修订日期:2021-08-16.

基金项目:高分专项装备预研项目(No.GFZX0403260206)

Supported by Equipment Pre-research of GF Project(No. GFZX0403260206)

* 通信联系人, E-mail:liuwq@ciomp.ac.cn

focal length is 20 mm, the working wavelength is 850 nm. The simulation experiment results show that without the need for focusing mechanism, the depth of focus of the system is 28 times that of the initial system, and the depth of field of the system is extended from 0.956~1.100 m to 0.5~130 m. The system can meet the needs of large depth of field imaging without focusing mechanism in the fields of space rendezvous and docking, satellite capture and so on.

Key words: wavefront coding; space target imaging; optics design; point spread function; modulation transfer function

1 引言

在空间交会对接、在轨卫星捕获等领域,空间目标成像光学系统要求,在飞行器从较远距离开始接近,直到接触到目标的过程中,能够对目标一直保持清晰成像,因此需要有很大的景深。因为不同物距对应着不同的最佳像面位置,意味着光学系统要有较大的焦深(Depth of Focus, DOF)。此外,受到复杂的环境因素比如入轨时的振动、在轨温度变化所影响,光学系统的结构参数及像面位置也会产生变化。为了保证系统可以清晰成像,通常的做法是在光学系统中增加调焦机构^[1-2]。调焦机构虽然在一定程度上能够解决这些问题,但是会增加成像系统的体积和重量,同时调焦机构包含的活动机构使系统的可靠性降低。因此,研究更加简单有效的扩展空间目标成像光学系统景深的方法在航天领域有迫切的需求。波前编码(Wavefront Coding, WFC)技术由美国科罗拉多大学的 Dowski 和 Cathy 所提出,是一种新颖的、将光学与计算成像结合的焦深扩展技术^[3-7]。相较于传统的光学系统,其区别在于波前编码系统在光阑处含有一片特殊的相位板,能够对光阑处的波前相位进行编码,使系统的光学传递函数(Optical Transfer Function, OTF)及点扩散函数(Point Spread Function, PSF)在较大的离焦范围内保持很高的一致性,从而成功扩展系统的焦深^[8-10]。在不降低光学系统的光通量与分辨率的前提下,波前编码技术可以把光学系统的焦深扩展至数十倍^[11],因此具有重要的研究意义以及很高的应用价值。近年,波前编码技术在国内得到快速发展,已广泛应用于红外成像^[12]、显微成像^[13]、抗激光成像^[14]和内窥镜^[15]等领域。本文基于波前编码技术,研究并设计了无需调焦机构,且能够对不同有限物距目标实现大景深高

质量成像的空间目标成像光学系统。同时,基于最大后验概率模型(The Maximum A Posteriori Approach, MAP),采用优化的方法实现了对中间图像的解码复原处理,采用 FOPD(First-Order Primal-Dual Algorithm)算法^[16],最终得到较好的图像复原效果。从原理和仿真实验的角度,验证了波前编码技术在空间目标成像光学系统中的焦深和景深扩展能力,能够满足对物距变化目标的大景深成像需求,为解决空间目标成像光学系统由于物距、温度^[17-18]、振动^[19]等导致的离焦问题提供了新的解决方案。

2 波前编码技术的原理

波前编码技术是一种光学与数字结合的成像技术,能够扩展光学系统的景深并且成像能力接近衍射极限,具有成本较低、体积较小、景深扩展能力较强的特点。其原理如图 1 所示。波前编码系统是在传统光学系统中添加了相位掩模板,从而改变了系统的波前相位^[20-21]。本应在焦点会聚的光线变成在一定离焦范围内较为均匀的光束,使系统的点扩散函数与光学传递函数不会因离焦发生明显的变化,从而得到一系列模糊程度近似的中间图像。随后通过图像处理的方法,对中间图像解码复原,得到清晰图像,从而扩展系统

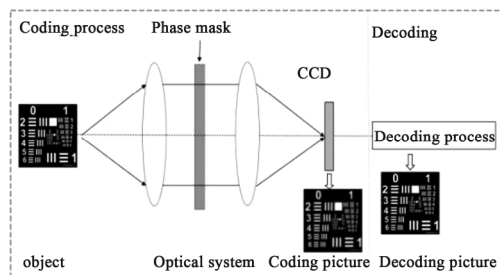


图 1 波前编码系统原理图

Fig.1 Schematic of WFC system

的焦深^[22-23]。

基于模糊函数和稳相法,能够推导出在光阑处添加立方相位板之后,光学系统的离焦 PSF 和离焦 OTF 变化将会很小,具有离焦稳定性。立方相位板表达式为:

$$z=\alpha(x^3+y^3), \quad (1)$$

式(1)中, x, y 为归一化坐标, α 为相位板面型参数,与相位板修饰波前的能力有关。

添加立方相位板后,波前编码光学系统的离焦光学传递函数表示为:

$$H(u, \phi) \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{3|au|}} \exp\left(j \frac{au^3}{4}\right) \exp\left(-j \frac{\phi^2 u}{3\alpha}\right), \quad (2)$$

式(2)中, u 为空间频率, ϕ 代表因物距、温度变化等导致的离焦。

从公式(2)可以看出,波前编码系统的光学传递函数 $H(u, \phi)$ 包含两个项。其中,第一项与离焦 ϕ 无关;而第二项中, ϕ 的平方与 α 成反比关系。因此,当立方相位板的面型参数 α 足够大时,第二项可以忽略。此时式(2)可以简化为:

$$H(u, \phi) \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{3|au|}} \exp\left(j \frac{au^3}{4}\right), u \neq 0, \quad (3)$$

通过增大立方相位板的面型参数 α ,能够有效减少离焦对系统光学传递函数产生的影响,使之具有离焦稳定性,从而扩展系统的焦深。调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)为 $H(u, \phi)$ 的模,因此波前编码系统的 MTF 也具有离焦稳定性。较大的焦深能够抵消因物距变化导致的离焦,使不同物距时的 PSF 与 MTF 保持较高的相似性。因此,可以用相同的 PSF 对各个物距的中间图像进行解码复原,获取清晰图像,实现大景深成像。

3 空间目标成像光学系统设计

3.1 设计参数

空间目标成像光学系统工作在太空环境中,为避免太阳光对系统成像的影响,选择的工作波长为 850 nm,并以中心波长为 850 nm 的激光进行主动照明,同时应设置滤光片以滤去可见光。视场设定为 $20^\circ \times 20^\circ$,探测器分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ 。为了降低系

统的故障率,光学系统采用定焦镜头进行设计,且不能含有胶合面。根据某空间目标成像光学系统的任务需求和实际条件,提出合理的设计指标如表 1 所示。

表 1 光学系统设计参数

Tab.1 Parameters of optical system

Parameters	Values
Object length	0.5~130 m
Field of view	$20^\circ \times 20^\circ$
F number	≤ 3
Focal length	20 mm
Total length	$\leq 45 \text{ mm}$
Distortion	$\leq 0.5\%$
Wavelength	850 nm

3.2 初始空间目标成像光学系统设计

为了证明波前编码技术扩展空间目标成像光学系统景深的可行性,首先设计了一个初始的光学系统,如图 2 所示。初始光学系统包含 2 片用于镀膜的玻璃,以滤去可见光,5 片球面透镜,一片 CCD 保护玻璃。系统的光阑直径为 7 mm,焦距为 20 mm,视场角为 20° ,设计物距为 1 m,除 CCD 保护玻璃以外的透镜中心厚度均不小于 3 mm,边缘厚度均不小于 1.8 mm,透镜间隔不小于 1.5 mm。

如图 3 所示,当物距设为设计物距即 1 m 时,

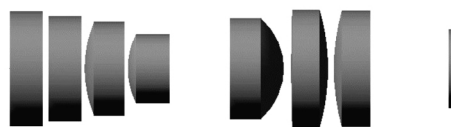


图 2 初始光学系统结构图

Fig.2 Structure diagram of initial optical system

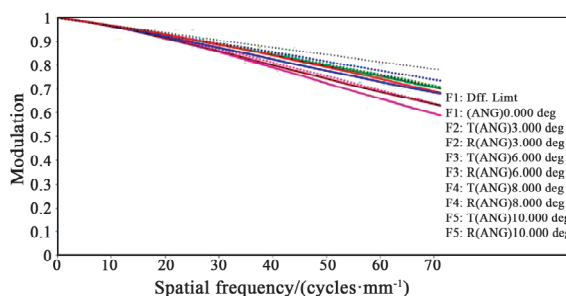


图 3 初始光学系统 MTF 曲线

Fig.3 MTF of initial system

系统处于聚焦状态,所有视场的 MTF 曲线均接近衍射极限。MTF 曲线可以用于表征系统对于不同频率分量信息的传递能力,初始光学系统的 MTF 曲线在特征频率 71.4 lp/mm 处大于 0.6,证明系统结构选型和设计良好,成像质量较好。

在实际应用中,空间目标成像光学系统的物距是随飞行器与成像目标之间的距离而不断变化的。当物距为 0.956 ~ 1.100 m 范围内时,初始光学系统中心视场的点列图 RMS 均小于或等于探测器像元尺寸。以中心视场的点列图 RMS 大小为成像评价依据,则初始光学系统在 0.956 ~ 1.100 m 范围内可以清晰成像,景深约为 144 mm。

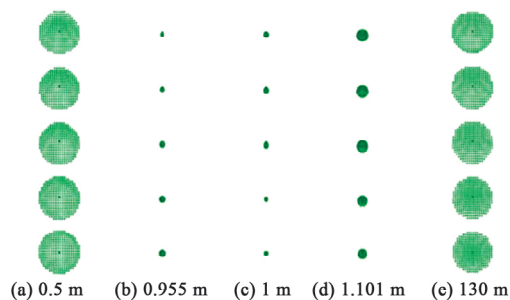


图 4 不同物距时的点列图

Fig.4 Spot diagrams at different object distances

如图 4 所示,初始光学系统中心视场的点列图的 RMS 在物距为 0.5, 0.955, 1.101, 130 m 时,分别为 97.3, 7.1, 7.1, 94.3 μm ,均大于设定的探测器像元大小,系统因离焦而不能清晰成像。

根据空间目标成像光学系统实际工作物距,在 CODE V 中将工作物距分别设为 0.5, 0.75, 1, 65, 130 m 时,使用快速最佳焦点功能,得到最佳焦点与像平面的距离,即系统离焦量,其结果如表 2 所示。表中,正数表示最佳焦点后移,负数为前移。

表 2 离焦量

Tab.2 Defocus

物距/m	离焦量/mm
0.5	0.382 4
0.75	0.128 1
1	0
65	-0.386 0
130	-0.390 7

根据焦深公式,对于初始光学系统来说,其焦深(DOF):

$$\text{DOF} = \pm 2\lambda F^2 \approx 0.027 8 \text{ mm} \quad (4)$$

根据表 2,当物距为 0.5 m 时,初始光学系统最佳焦点后移的距离达到最大为 0.3824 mm。当物距为 130 m 时,最佳焦点前移的距离达到最大 0.390 7 mm。即初始光学系统最大离焦量约为 28 倍焦深,因此,需要波前编码系统的焦深能扩展到初始系统的 28 倍以上。即:

$$\text{DOF}_{\text{WFC}} \geq 28 \text{DOF} \quad (5)$$

3.3 基于波前编码的空间目标成像光学系统设计

波前编码系统的关键之处在于相位板的设计。目前对立方相位板的加工与检测技术相对成熟,因此研究中选用了立方相位板。在 CODE V 中,可以用 XY 多项式对立方相位板进行优化。在研究中发现,波前编码系统的离焦稳定性与立方相位板的参数 α 相关,随着 α 的增大系统的 MTF 曲线一致性提高,但是 MTF 曲线幅值降低,复原图像信噪比降低。因此,综合考量系统的离焦稳定性与图像的可复原性,对参数 α 进行优化。

以 Hilbert 空间角对不同物距下的 MTF 曲线进行相似度评价,以 MTF 曲线下的面积 S 对图

$$\delta = \arccos \frac{\langle | \text{MTF}(v, \alpha, \psi=0) | \cdot | \text{MTF}(v, \alpha, \psi_{\max}) | \rangle}{\| | \text{MTF}(v, \alpha, \psi=0) | \| \cdot \| | \text{MTF}(v, \alpha, \psi_{\max}) | \|} \quad (6)$$

像可复原性进行评价。

式(6)中, $\langle \cdot \rangle$ 为内积, $\| \cdot \|$ 为范数, v 为空间频率, ψ 为不同物距下系统的离焦量。式(7)中,对 S 设定一个合理的阈值 S_T ,以保障中间图像的复原质量。

$$S = \int \text{MTF}(v, \alpha, \psi_{\max}) dv > S_T \quad (7)$$

以式(6)与(7)作为立方相位板优化的约束函数,对面型参数 α 进行优化,得到 $\alpha = 0.001 92$ 。立方相位板的材料为 PMMA(Polymethyl Methacrylate),可以通过金刚石车床进行加工,达到系

统要求。如图 5 所示,将优化后的相位板添加到初始光学系统中,得到基于波前编码的空间目标成像光学系统。

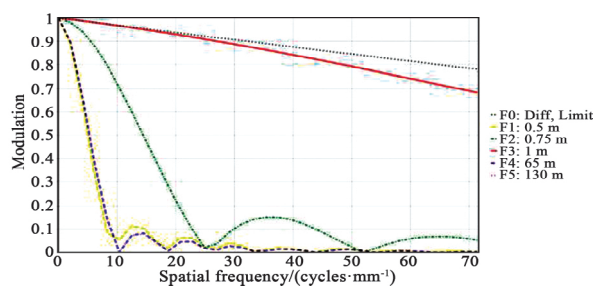


图 5 波前编码系统结构图

Fig.5 Structure diagram of WFC system

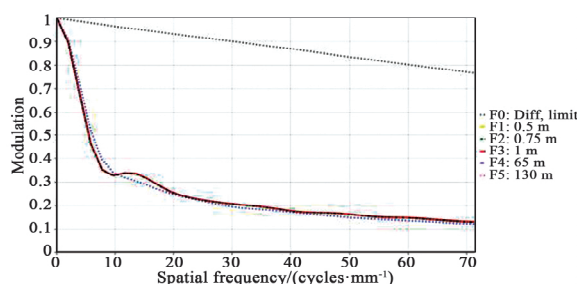
分别选取初始光学系统与波前编码光学系统在物距为 0.5, 0.75, 1, 65, 130 m 时的 MTF 曲线进行比较, 如图 6 所示。初始光学系统的 MTF 曲线随着物距的改变发生明显变化, 并且在特征频率 71.4 lp/mm 之前出现零域。在波前编码光学系统中, 不同物距的 MTF 曲线在特征频率 71.4 lp/mm 之前没有零域, 幅值均高于 0.1, 且保持很高的一致性。

波前编码系统在不同物距下的相对畸变如图 7 所示。显然, 系统满足了相对畸变小于 0.5% 的



(a) 初始系统 MTF 曲线

(a) MTF of initial system



(b) 波前编码系统 MTF 曲线

(b) MTF of WFC system

图 6 初始系统与波前编码系统 MTF 曲线

Fig.6 MTF of initial system and WFC system

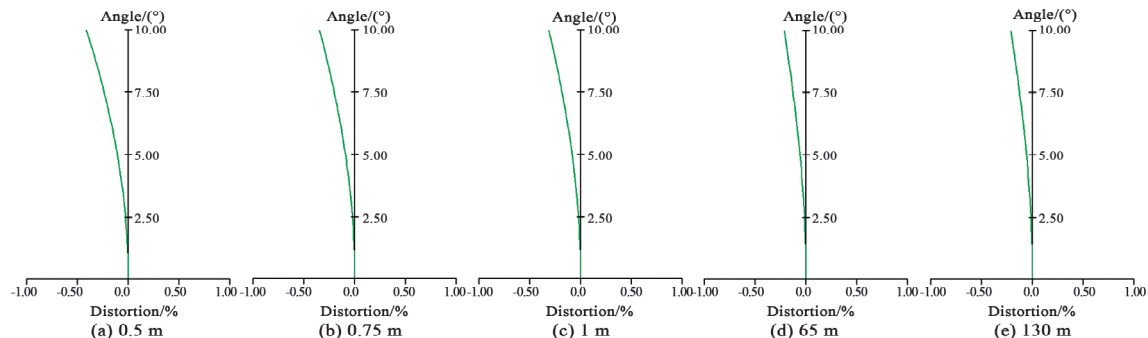


图 7 波前编码系统的畸变

Fig.7 Distortion of WFC system

设计指标。

将初始光学系统与波前编码光学系统的离焦 PSF 进行对比。如图 8 所示, (a)、(b)、(c) 为初始光学系统在离焦量分别为 -14 DOF, 0, +14 DOF 时的 PSF, (d)、(e)、(f) 为波前编码系统在离焦量分别为 -14 DOF, 0, +14 DOF 时的 PSF。初始光学系统的 PSF 随着离焦量的改变变化极大, 而波前编码光学系统的 PSF 的尺寸和形状在各离焦量下均保持较好的相似性。表明相比于初始光学系统, 波前编码光学系统的焦深能够扩展至原来的 28 倍。

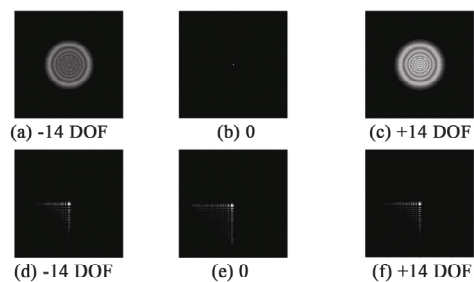


图 8 (a)、(b)、(c) 初始系统的 PSF; (d)、(e)、(f) 波前编码系统的 PSF。

Fig.8 (a)、(b)、(c) PSF of initial system; (d)、(e)、(f) PSF of WFC system.

4 仿真实验与分析

波前编码光学系统在探测器获得的是模糊的中间图像,因此需要进行滤波处理得到清晰图像。本文基于 MAP 框架优化方法实现对中间图像的非盲复原,由于波前编码技术的解码问题为非盲图像复原,因此无需添加针对模糊核的先验约束,同时针对本系统的单光谱灰度成像特性,最终确定的优化框架为:

$$\operatorname{argmin} \| KI - O \|_2^2 + \lambda \sum_{a=1}^5 \| H_a I \|_1, \quad (8)$$

式(8)中, O 为中间图像,为已知数据; I 为目标图像,为复原的图像数据; K 为波前编码系统所具有的离焦稳定性的模糊核, K 可由 CODE V 仿真或者实验获取,可视为已知数据; H 为偏微分操作, $H_{1,2}$ 为一阶微分, $H_{3,4,5}$ 为二阶微分, $\| KI - O \|_2^2$ 为优化目标函数的数据项, $\sum_{a=1}^5 \| H_a I \|_1$ 为正则项,为梯度先验。该问题为典型的“一阶非凸”问题,FOPD 算法的收敛速度较快,且求极点问题非常灵活。因此,本文采用 FOPD 算法作为该非盲图像优化问题求解的具体方法。

为证明本文所提出的以波前编码技术扩展空间目标成像光学系统景深和焦深的可行性,利用 CODE V 中的图像仿真功能,进行仿真实验。将物距分别设置为 0.5,0.75,1,65,130 m,

初始光学系统与波前编码光学系统全视场范围内模拟成像结果分别如图 9、10、11 所示。

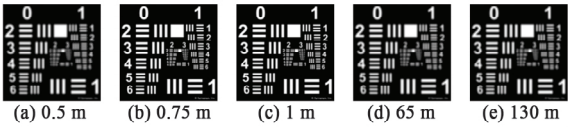


图 9 初始系统成像

Fig.9 Images of the initial system

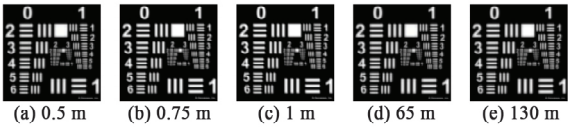


图 10 波前编码系统中间图像

Fig.10 Intermediate images of WFC optical system

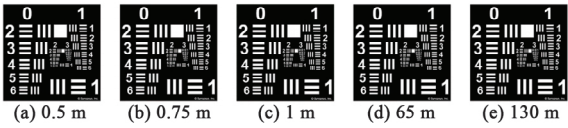


图 11 波前编码系统成像

Fig.11 Final images of WFC system

初始光学系统在物距为 1 m 时成像质量良好,在物距分别为 0.5,0.75,65,130 m 时,成像模糊已经不能分辨细节信息。波前编码系统的中间图像在各物距时均较为模糊,但模糊程度相似。进一步用 FOPD 算法进行复原处理之后,各物距下的复原图像清晰度与初始系统在对焦时相当。

表 3 峰值信噪比

Tab.3 PSNR

	PSNR/dB				
	0.5 m	0.75 m	1 m	65 m	130 m
初始系统	18.129 7	19.931 6	25.563 4	18.146 1	18.138 5
中间图像	18.952 9	19.071 7	19.113 3	18.951 8	18.950 8
复原图像	24.194 4	24.206 0	24.308 9	24.194 8	24.194 6

表 4 结构相似性

Tab.4 SSIM

	SSIM				
	0.5 m	0.75 m	1 m	65 m	130 m
初始系统	0.705 1	0.812 4	0.985 1	0.712 6	0.711 5
中间图像	0.768 5	0.769 4	0.770 9	0.765 4	0.761 7
复原图像	0.978 5	0.979 4	0.981 1	0.980 3	0.978 9

应用峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)与结构相似性(Structural Similarity, SSIM)对初始光学系统与波前编码光学系统的成像图像质量进行客观评价对比,其结果如表 3 与表 4 所示。

当初始系统在物距为设计物距即 1 m 时, PSNR 与 SSIM 最高,成像质量最好,物距发生变化时,成像质量迅速降低。中间图像的 PSNR 与 SSIM 大小在各物距时均相似,证明图像模糊程度一致。在物距为 0.5~130 m 的范围内,波前编码系统复原图像的 PSNR 均值约为 24 dB, SSIM 均值约为 0.98,图像复原效果良好,相较于初始系统得到明显提高。因此,波前编码系统能在大景深范围内清晰成像,达到了设计要求。

5 结 论

本文采用波前编码技术扩展空间目标成像光学系统的景深。在设计了初始光学系统的基础上,建立了兼顾景深扩展能力和图像复原质量的评价函数,并对立方相位板进行优化设计。设计的波前编码系统焦深扩展达到初始系统的 28 倍。通过仿真实验证明,采用 FOPD 算法对中间图像进行解码复原后,波前编码系统在 0.5~130 m 的大景深范围内,能够清晰成像。基本满足了空间目标成像光学系统无调焦机构和大景深清晰成像的需求。

参 考 文 献:

- [1] 丁亚林,田海英,王家骥.空间遥感相机调焦机构设计[J].光学精密工程,2001,9(1):35-38.
DING Y L, TIAN H Y, WANG J Q. Design on the focusing mechanism of space remote-sensing camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(1): 35-38. (in Chinese)
- [2] 于涛,曹小涛.空间相机多功能调焦偏流控制系统[J].液晶与显示,2010,25(5):728-732.
YU T, CAO X T. Multi-function focus-drift control system of space camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(5): 728-732. (in Chinese)
- [3] DOWSKI E R, CATHEY W T. Extended depth of field through wave-front coding [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(11): 1859-1866.
- [4] COHEN N, YANG S, ANDALMAN A, *et al.* Enhancing the performance of the light field microscope using wavefront coding [J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24817-24839.
- [5] WANG L, YE Q, NIE J S, *et al.* Tilted wavefront coding system to eliminate the retroreflection with superior imaging property [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(26): 7205-7211.
- [6] MUYO G, HARVEY A R. Decomposition of the optical transfer function: wavefront coding imaging systems [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(20): 2715-2717.
- [7] 张欣,张新,张建萍,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, ZHANG J P, *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)
- [8] 张效栋,张林,刘现磊,等.波前编码中立方相位板的装配及加工误差对成像性能的影响[J].纳米技术与精密工程,2015,13(2):134-140.
ZHANG X D, ZHANG L, LIU X L, *et al.* Effect of assembling and machining errors on wavefront coding imaging performance of cubic phase mask [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2015, 13(2): 134-140. (in Chinese)
- [9] 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.
GUO X H, ZHAOC 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. (in Chinese)
- [10] 金易弢,张薇.基于波前编码技术的眼底成像系统[J].光学仪器,2018,40(5):45-54.
JIN Y T, ZHANG W. A fundus imaging system based on the wave-front coding technology [J]. *Optical Instruments*, 2018, 40(5): 45-54. (in Chinese)
- [11] 杨皓明,张新,方志良,等.含三次位相元件照相物镜的设计[J].光学精密工程,2007,15(7):1026-1031.
YANG H M, ZHANG X, FANG Z L, *et al.* Design of a photographic objective using cubic phase plate [J]. *Op-*

- tics and Precision Engineering*, 2007, 15(7): 1026-1031. (in Chinese)
- [12] MUYO G D, HARVEY A R. Wavefront coding for athermalization of infrared imaging systems [C]// *Proceedings of the SPIE* 5612, Electro-Optical and Infrared Systems: *Technology and Applications*. London, United Kingdom: SPIE, 2004: 227-235.
- [13] GIERLAK M, ALBRECHT S, KAUER J, *et al.* Wavefront coding using a spatial light modulator for extended depth of field microscopy [C]// *Proceedings of the SPIE* 8798, Clinical and Biomedical Spectroscopy and Imaging III. Munich, Germany: SPIE, 2013: 879803-879807.
- [14] WATNIKA T, RUANE G J, SWARTZLANDER G A. Incoherent imaging in the presence of unwanted laser radiation: vortex and axicon wavefront coding [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(12): 123102.
- [15] 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.
- [16] CHAMBOLLEA, POCK T. A first-order primal-dual algorithm for convex problems with applications to imaging [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2011, 40(1): 120-145.
- [17] 冯俐铜, 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)
- [18] FENG B, SHI Z L, CHANG Z, *et al.* 110°C range athermalization of wavefront coding infrared imaging systems [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 157-162.
- [19] YU J Q, CHEN S Q, DANG F Y, *et al.* The dynamic aberrations suppression of conformal optical system by wavefront coding [J]. *Optics Communications*, 2020, 463: 125121.
- [20] 周峰, 闫海, 王晓莉, 等. 基于 ZEMAX 用户自定义操作数的波前编码成像系统优化设计 [J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(3): 528-535.
ZHOU F, YAN H, WANG X L, *et al.* Optimization of wavefront coding imaging systems based on ZEMAX user defined operands [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 528-535. (in Chinese)
- [21] 燕云, 陈家璧, 潘超, 等. 波前编码景深延拓与几何光学景深的关系 [J]. *光学与光电技术*, 2009, 7(3): 75-77.
YAN Y, CHEN J B, PAN C, *et al.* Relations between the geometric optics depth of field and the extension of the depth of field [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, 7(3): 75-77. (in Chinese)
- [22] 范志刚, 付强, 陈守谦, 等. 一种优化波前编码系统相位板参数的新方法 [J]. *应用光学*, 2011, 32(1): 1-6.
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. (in Chinese)
- [23] 张继艳, 曹星新. 波前编码显微物镜景深扩展的研究 [J]. *应用光学*, 2018, 39(4): 476-482.
ZHANG J Y, CAO X X. Research on extended field depth of wavefront coding microscope objective [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(4): 476-482. (in Chinese)

作者简介:



孙志伟(1993—),男,河南新乡人,硕士研究生,2017年于吉林大学获得学士学位,主要从事光学设计、波前编码、空间成像等方面的研究。E-mail: sunzhiwei2020@qq.com



刘伟奇(1958—),男,吉林长春人,硕士,研究员,1988年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事空间目标成像、激光显示技术等方面的研究。E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn