

## 宽波段环形孔径光学-数字联合成像系统设计

王少颖<sup>1</sup>, 蒋世磊<sup>1\*</sup>, 张锦<sup>1</sup>, 孙国斌<sup>1</sup>, 赵金<sup>2</sup>, 刘卫国<sup>1</sup>, 周璇<sup>1</sup>, 魏习江<sup>1</sup><sup>1</sup>西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021;<sup>2</sup>西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065

**摘要** 针对空间相机轻量化、小型化要求,采用一体式环形孔径透镜。由于基底单一和结构紧凑,系统存在色差和球差,引入衍射光学元件和偶次非球面校正像差,而单层衍射光学元件在宽波段存在衍射效率下降等问题,设计了一种端到端式光学-数字联合成像系统,对影响衍射效率主要级次的点扩散函数进行一致性优化,构建出空间不变点扩散函数模型,为后续图像复原建立复原函数模型,实现退化图像的复原。最终光学-数字联合成像系统工作波段确定为 0.45~1  $\mu\text{m}$ ,焦距为 185 mm,视场为 5°,F 数为 4,遮拦比为 0.35,系统总长为 67.8 mm。

**关键词** 光学设计; 环形孔径; 单层衍射光学元件; 端到端设计; 图像复原

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231294

## Design of a Wide-Band Annular Aperture Optical-Digital Joint Imaging System

Wang Shaoying<sup>1</sup>, Jiang Shilei<sup>1\*</sup>, Zhang Jin<sup>1</sup>, Sun Guobin<sup>1</sup>, Zhao Jin<sup>2</sup>,  
Liu Weiguo<sup>1</sup>, Zhou Xuan<sup>1</sup>, Wei Xijiang<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Opto-Electrical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;<sup>2</sup>Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, Shaanxi, China

**Abstract** One-piece annular aperture lenses are being increasingly adopted to meet the requirements of lightweight and miniaturization for space cameras. However, the system presents certain limitations due to its use of a single substrate and compact structure, which result in chromatic aberration and spherical aberration, and the reduction of diffractive efficiency of single-layer diffractive optical element in wide band. To mitigate these issues, diffraction optical elements as well as even-order non-spherical aberration corrections have been introduced. In this paper, we propose an end-to-end optical-digital joint imaging system that optimizes the point spread function, which is the main factor affecting diffraction efficiency. We construct a spatially invariant point spread function model to establish the restoration function for subsequent image restoration, achieving the restoration of degraded images. The proposed optical system operates within the wavelength range of 0.45–1  $\mu\text{m}$  and has the focal length of 185 mm, field of view of 5°,  $F\#$  of 4, shading ratio of 0.35, and total length of 67.8 mm.

**Key words** optical design; annular aperture; single-layer diffractive optical element; end-to-end design; image restoration

## 1 引言

卫星平台、无人机、导引头器件等对轻量化、小型化的光学相机系统需求尤为迫切<sup>[1-5]</sup>,环形孔径系统能够较好满足这些苛刻要求。随着先进光学加工工艺的发展,尤其是点金刚石车削,精密模压等<sup>[6-7]</sup>工艺逐渐成熟,使高性能环形孔径光学系统的设计成为可能。然而,采用单片式光学环形孔径镜头存在设计变量自

由度有限、宽波段单一材料有色差等问题,针对这些问题有多种技术方案。

Galan 等<sup>[8]</sup>提出了一种胶合透镜的设计方法,将两种材料适当搭配,能使像质几乎达到衍射极限,但仍存在高级球差和高级色差残留;Lippman 等<sup>[9]</sup>针对环形透镜受到色差影响严重的问题,提供了一种新的自由梯度折射率透镜(F-GRIN)设计思路,这种渐变折射率透镜加工工艺也逐渐成熟;孟禹彤等<sup>[10-11]</sup>设计了一种

收稿日期: 2023-05-12; 修回日期: 2023-05-23; 录用日期: 2023-06-20; 网络首发日期: 2023-06-30

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(21JK0681)

通信作者: \*jiangshilei8@163.com

以塑料为基底材料的折衍混合环形成像系统,由于该系统使用了单层衍射元件,存在衍射效率低下等问题,不能应用到可见较宽波段;多层衍射光学元件理论<sup>[12]</sup>和技术能解决这个问题,但多层衍射光学元件对入射角度引起的衍射效率下降幅度比单层衍射光学元件更明显,且最少需要两种基底材料才能校正像差,装配要求较高,这在一定程度上限制其应用。

本文采用端到端光学-数字联合<sup>[13-16]</sup>成像的方式,为传统光学设计提供新思路。将其应用到折衍混合光学系统中,能为提高图像质量提供更多优化变量,实现光学系统小型化和轻量化。

## 2 基本原理

环形孔径成像系统采用端到端式光学-数字联合成像设计方法,主要包括镜头优化成像设计、求取点扩散函数(PSF)退化模型、图像复原等3个部分。

### 2.1 光学系统优化原理

环形孔径镜头结构紧凑,主要存在高级球差和轴外像差,使用偶次非球面可以校正像差;在可见宽波段内,单一材料不能消色差,因此使用衍射面来校正色差。衍射光学元件具有区别于传统光学元件的负色散特性,波长越长,对应色散越小<sup>[17]</sup>。因此,衍射光学元件与传统透镜相结合,在有限带宽范围内,可以达到成像光束消色差的目的。

常用的成像衍射光学元件是旋转对称的<sup>[18]</sup>,其相位调制函数为

$$\phi(r) = 2\pi m(A_1 r^2 + A_2 r^4 + \dots), \quad (1)$$

式中: $m$ 为衍射级次; $A_1$ 为二次相位系数,其余高阶项系数代表非球面相位数。

### 2.2 PSF 模型建立

采用折衍混合系统设计光路,衍射光学元件存在多个衍射级次,+1级次一般为设计主级次,不同衍射级次会有不同焦点位置。不同衍射级次衍射效率不同,但ZEMAX等常用光学设计软件不考虑衍射光学元件各级次衍射效率的问题,这会使实际系统的PSF与理论仿真计算结果不同。因此,需重新建立一个像面受不同衍射级次、不同波长衍射效率影响的PSF模型,得到其实际成像的退化图像。PSF模型的构建是图像复原的核心,为后续图像复原提供退化函数。

建立此系统PSF模型较为精确的步骤如下:

首先,假设系统为空间不变系统,各衍射级次所成的像在像面位置,使用ZEMAX软件提取各波长中心视场在各个级次的惠更斯PSF,可表示为 $F_{PS}(\lambda, m)$ ,其中 $\lambda$ 为入射波长, $m$ 为衍射级次。

其次,单层衍射元件需考虑设计波长,其衍射效率 $\eta(\lambda)$ <sup>[19]</sup>可表示为

$$\eta(\lambda) = \text{sinc}^2 \left\{ \frac{\lambda[n(\lambda) - 1]}{\lambda[n(\lambda') - 1]} - m \right\}, \quad (2)$$

式中: $\lambda'$ 为设计波长。 $n(\lambda)$ 、 $n(\lambda')$ 分别为基底材料在入射波长和中心波长时的折射率, $n(\lambda)$ 、 $n(\lambda')$ 与基底材料有关,可用Sellmeier色散公式<sup>[20]</sup>计算其他波长的折射率,具体可表示为

$$n_\lambda^2 - 1 = \frac{K_1 \lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2 \lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3 \lambda^2}{\lambda^2 - L_3}, \quad (3)$$

式中: $K_1$ 、 $L_1$ 、 $K_2$ 、 $L_2$ 、 $K_3$ 、 $L_3$ 为色散常数; $n_\lambda$ 为所求折射率。

由式(2)可得各级次衍射效率曲线,基底材料选用成都光明D-ZLAF67-25, $\lambda'$ 的选择主要考虑0.45~1 $\mu\text{m}$ 波段内+1级次衍射效率下降程度。如图1所示,当设计波长选为0.52 $\mu\text{m}$ 时,+1级衍射效率为100%;当波长为0.45 $\mu\text{m}$ 时,衍射效率下降到90%;当波长为1 $\mu\text{m}$ 时,衍射效率下降到40%,低于 $\lambda'$ 的波段+2级衍射效率急剧增加,高于 $\lambda'$ 的波段0级衍射效率也急剧增加。为了降低光学系统设计难度,需减少多个衍射级次对像面的影响,在0.45~1 $\mu\text{m}$ 波段内影响衍射效率的主要级次为0、+1、+2级, $\lambda'$ 选为0.52 $\mu\text{m}$ 时,+2级次在整个波段内受衍射效率的影响较小,只需考虑0、+1级次对PSF一致性的优化及构建。各个波长的PSF为 $F_{PS}(\lambda)$ ,其具体可表示为

$$F_{PS}(\lambda) = \sum_m \eta_m(\lambda) F_{PS}(\lambda, m), \quad (4)$$

式中: $\eta_m(\lambda)$ 为波长各级次的衍射效率。

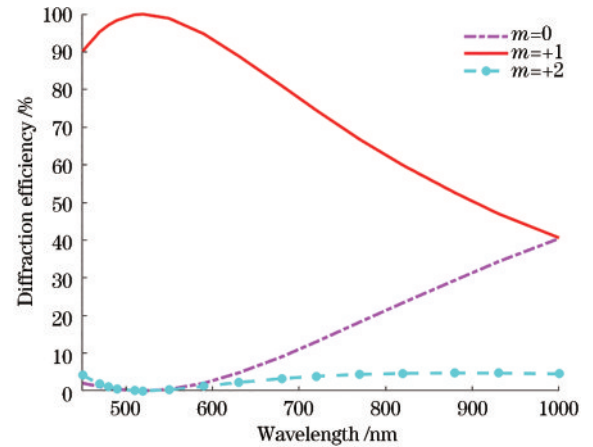


图1 主要级次衍射效率曲线

Fig. 1 Curves of major level diffraction efficiency

最后,光学系统的像面需要由探测器来接收,不同波长探测器接收光的效率不同,而影响探测器的主要性能指标是量子效率<sup>[21]</sup>。选用CMOSIS公司的CMV4000型号单色E5探测器,其量子效率如图2所示。

由图2可知,量子效率与波长有关,即表现出不同波长时探测器的响应程度不同。因此,对PSF建模时需考虑探测器自身给成像带来的影响,将量子效率曲线作为建模权重,对其进行归一化,构建出最终退化后的PSF,具体可表示为

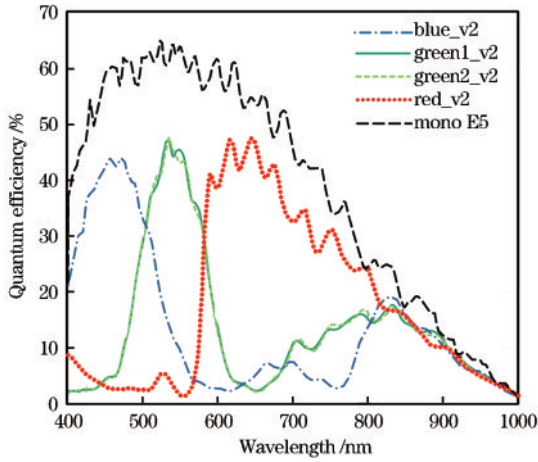


图 2 CMV4000 探测器量子效率曲线

Fig. 2 Detector quantum efficiency curves of CMV4000

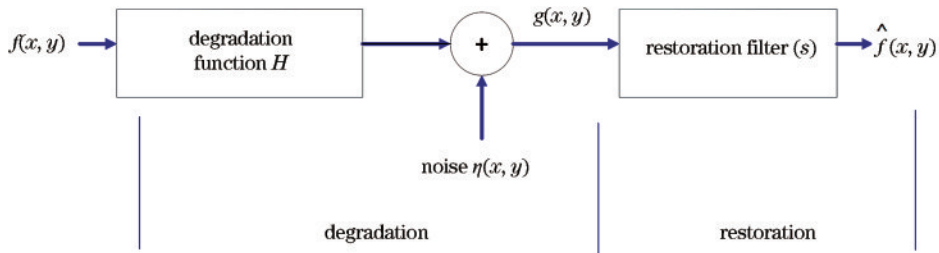


图 3 图像退化/复原模型

Fig. 3 Image degradation/restoration model

成像的过程可以看作退化函数  $h(x, y)$  与光学系统的物  $f(x, y)$  的卷积再和到达探测器引起的噪声  $\eta(x, y)$  相加, 得到一幅退化后的图像  $g(x, y)$ 。图像复原可看作在  $H$  已知的情况下, 退化后的图像  $g(x, y)$  进行反卷积得到对  $f(x, y)$  的近似, 其在空域中可表示为  $\hat{f}(x, y) = \hat{h}(x, y) * g(x, y) = \hat{h}(x, y) * [f(x, y) * h(x, y) + \eta(x, y)]$ , (6)

式中: \* 为卷积符号;  $\hat{h}(x, y)$  为估计的复原函数。

### 3 环形孔径镜头光学-数字联合设计结果

#### 3.1 光学系统设计结果

根据微纳空间光学相机对地分辨率的需求, 建立光学指标参数, 如表 1 所示。根据需求指标可得光学

表 1 需求指标参数

Table 1 Parameters of demand indicators

Parameter	Value
Track height / km	530
Width of cut / km	37
Ground sampling distance / m	$\leq 15$
Spectral range / $\mu\text{m}$	0.45-1
Cell size / $\mu\text{m}$	5.5

$$F'_{ps} = \frac{\sum_{\lambda} \omega_{\lambda} F_{ps}(\lambda)}{\sum_{\lambda} \sum_m \eta_m(\lambda)}, \quad (5)$$

式中:  $\omega_{\lambda}$  为量子效率归一化时的波长权重系数。

#### 2.3 图像复原原理

图像复原一般试图寻找引起图像质量下降的客观原因, 从而有针对地进行复原处理, 并试图恢复其原始的内容或质量<sup>[22]</sup>。退化模型的建立是图像复原处理的前提与关键步骤, 2.2 节建立了退化模型, 将图像退化的过程加以估计, 探测器接收到光学系统像面的 PSF 被当作是光学系统退化函数, 即原理上 PSF 的建模较为精确时, 后续的图像复原也较为精确。图像复原一般是线性的、空间不变的复原技术。图像复原原理如图 3 所示。

系统光学指标, 光学系统具体设计指标如表 2 所示。2.2 节选取 CMOSIS 公司的分辨率为 2048 pixel  $\times$  2048 pixel、像元尺寸为 5.5  $\mu\text{m}$  的 CMV4000 型号探测器, 用于确定像质评价指标。光学系统光路图如图 4 所示, 衍射光学元件位于环形孔径出射面上, 光学系统衍射面位相灰度图如图 5 所示, 系统遮拦比为 0.35, 总长为 67.8 mm。

表 2 光学系统设计指标

Table 2 Design indexes of optical system

Parameter	Value
Effective focal length / mm	185
Effective aperture diameter / mm	46
F number	4
Wavelength / $\mu\text{m}$	0.45-1
Field of view / ( $^{\circ}$ )	5
MTF (@90 lp/mm)	$> 0.3$

表 3 为最终优化后系统的结构参数, 表 4 为环形孔径各表面的偶次非球面系数, 环形孔径镜头的材料为 D-ZLAF67-25, 可采用精密模压加工工艺, 面 1~面 4 为偶次非球面, 其矢高表达式  $Z$  可表示为

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \dots, \quad (7)$$



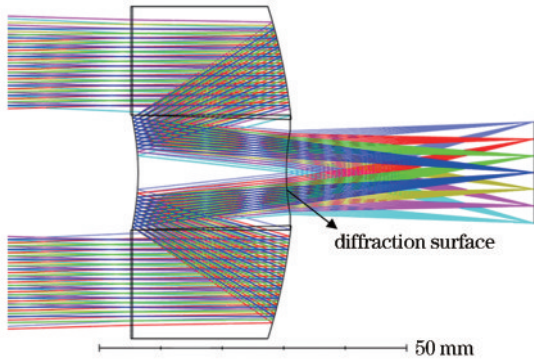


图 4 光学系统光路图

Fig. 4 Light path diagram of optical system

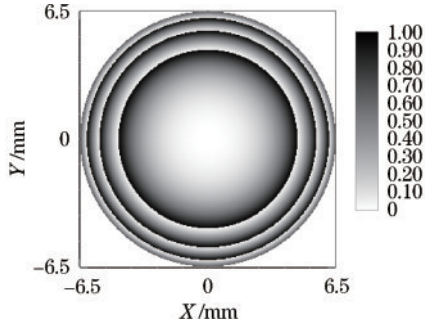


图 5 衍射面相位图

Fig. 5 Phase diagram of diffraction surface

表 3 光学系统参数

Table 3 Optical system parameters

Surface	Type	Radius / mm	Thickness / mm	Glass
Object	Standard	Infinity	Infinity	Air
1	Even Asphere	9999.90	27.00	D-ZLAF67-25
2	Even Asphere	-81.21	-25.80	Mirror
Stop	Even Asphere	-37.85	24.60	Mirror
4	Binary 2	41.28	42.20	Air
Image	Standard	Infinity		

式中： $c$ 为曲率； $k$ 为圆锥系数； $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 为高阶项系数； $r$ 为归一化半径。

面 4 为衍射面，在 ZEMAX 软件中常用 Binary 2 表示，其相位  $\Phi$  表达式为

$$\Phi = M \sum_{i=1}^N A_i \rho^{2i}, \quad (8)$$

式中： $M$ 为衍射级次； $N$ 为多项式的项数； $A_i$ 为高阶系数，一般取前两项； $\rho$ 为归一化径向孔径。

图 6 为最终光学系统 +1 级次的光学调制传递函数 (MTF) 与点列图。由图 6(a) 可知，各视场 MTF 在 90 lp/mm 处均大于 0.37，由图 6(b) 可知，各视场点列图接近艾里斑。这两项评价指标没有考虑衍射效率等问题，所以不能表示实际设计像面上的成像质量。

表 4 光学系统的偶次非球面及衍射面系数

Table 4 Even aspheric and diffraction surface coefficients of optical systems

Surface	Polynomial coefficient					
	$k$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$A_1$	$A_2$
1	-5	$-9.117 \times 10^{-8}$	$1.087 \times 10^{-10}$	$-3.856 \times 10^{-14}$	—	—
2	-0.622	$1.565 \times 10^{-7}$	$4.256 \times 10^{-11}$	$-1.131 \times 10^{-14}$	—	—
3	-2.272	$6.687 \times 10^{-6}$	$-3.556 \times 10^{-9}$	$-9.346 \times 10^{-12}$	—	—
4	—	$2.964 \times 10^{-5}$	$3.522 \times 10^{-8}$	—	-4.896	21.817

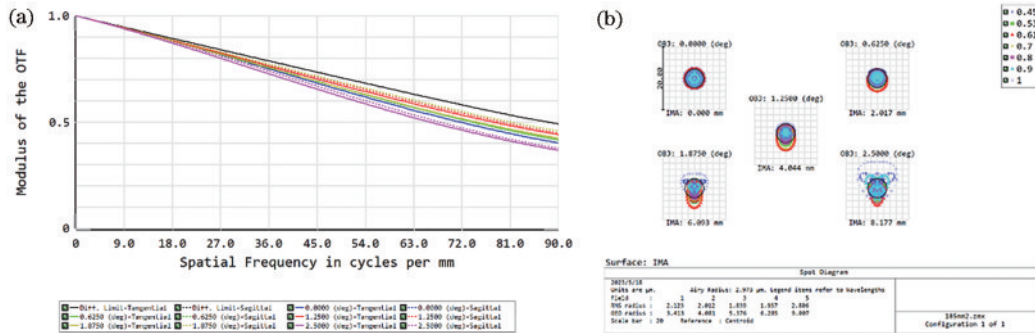


图 6 +1 级次像质评价结果。(a) MTF; (b) 点列图

Fig. 6 Image quality evaluation results of +1 order. (a) MTF; (b) spot diagram

为了对图像进行有效的复原，需对主要影响衍射效率的 0 级、+1 级次 PSF 一致性进行优化，以保证像面各视场 PSF 空间不变。由图 6(b) 可知，+1 级次各视场均方根半径 (RMS radius) 在艾里斑内，只需对 0 级次各视场点列图一致性进行优化，使用 ZEMAX 软件多

重组态分权重与添加 Tray、Trax 等操作数的方式，控制 0 级次各波长各视场在像面上的弥散斑尺寸的均匀程度。0 级次在像面上矩阵点列图如图 7 所示，由图 7 可知，各波长下全视场点列图光斑形状及大小基本一致。

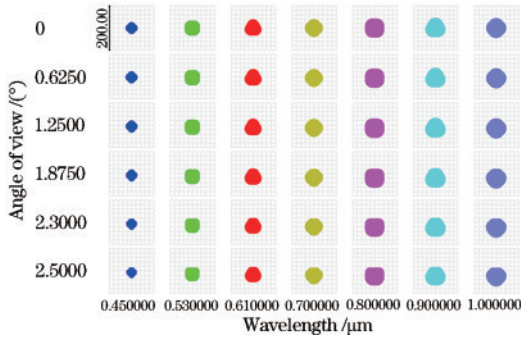


图 7 0 级次矩阵点列图

Fig. 7 Matrix spot diagram of 0 order

### 3.2 复原结果与评价

按照 2.2 节所提的方法构建 PSF 模型,图 8(a)为构建出的光学系统 PSF 图,光学系统 PSF 的单位为  $\mu\text{m}$ ,后续图像复原是对模拟探测器得到的图像进行复原,根据像元尺寸选为  $5.5 \mu\text{m}$ ,PSF 需进行像素化,结果如图 8(b)所示,其单位为 pixel。

构建 PSF 模型后,根据 PSF 模型先对原始图像进行退化处理,得到退化图像;再对退化图像引入方差为 0.001 的高斯噪声,得到的图像如图 9(c)所示,采用约束最小二乘法<sup>[23]</sup>对退化图像进行复原,得到的复原图像如图 9(d)所示。

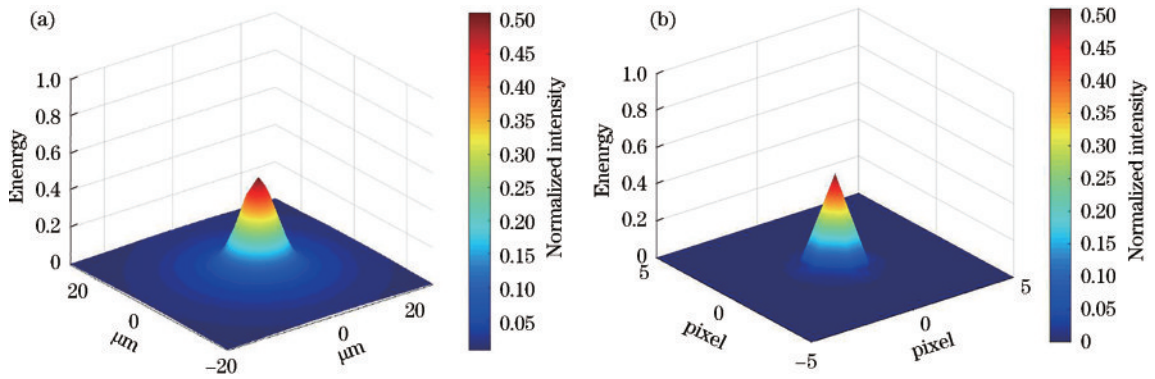


图 8 构建的 PSF 模型。(a) 光学系统 PSF; (b) 像素化 PSF 图

Fig. 8 Constructed PSF model. (a) PSF of optical system; (b) PSF pixelated schematic

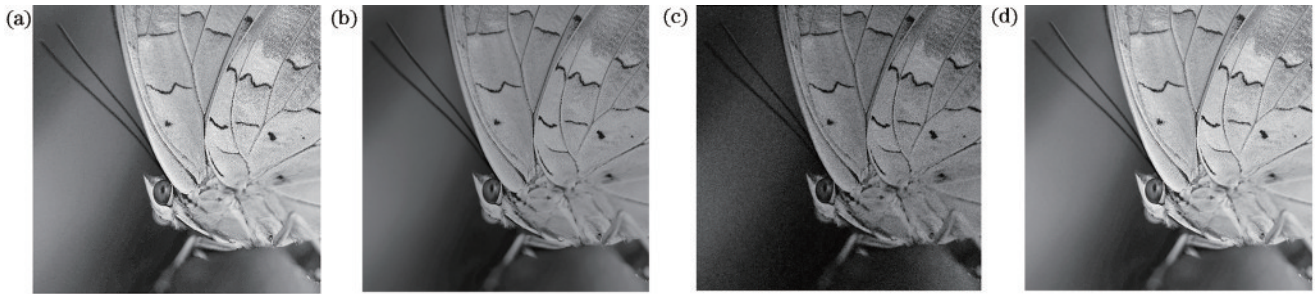


图 9 退化图像前后比较。(a) 原始图像; (b) 退化图像; (c) 含噪声退化图像; (d) 复原图像

Fig. 9 Comparison of degraded images before and after restoration. (a) Original image; (b) degraded image; (c) degraded image with noise; (d) restoration image

由图 9(b)可知,主观上退化图像整体较暗,图 9(d)为复原图像,与退化图像相比,复原图像对亮度明显提高。为了客观评价退化图像与复原图像,用峰值信噪比(PSNR)和结构相似性(SSIM)作为评价指标,如表 5 所示。

由表 5 可知,当退化图像引入方差为 0.001 的高斯

噪声时,复原图像的 PSNR 为 27.44 dB,较退化图像的 PSNR 提高 6.94 dB;随着高斯噪声方差降为 0.0001, PSNR 提高到 31.20 dB, PSNR 值越高,说明复原图像越接近原始图像。SSIM 的最大范围为 100%,其值越大,表示图像的质量越好,当退化图像引入方差为 0.001 的高斯噪声时,复原图像较退化图像的 SSIM 提

表 5 不同方差的高斯噪声图像复原前后结果

Table 5 Results before and after image restoration under different variance values in Gaussian noise

Evaluating indicator	Variance value is 0.01		Variance value is 0.001		Variance value is 0.0001	
	Blurred	Restored	Blurred	Restored	Blurred	Restored
PSNR /dB	17.28	23.69	20.50	27.44	20.83	31.20
SSIM /%	24.48	54.81	64.78	70.86	79.00	85.01

高 6.08 百分点;随着高斯噪声方差降为 0.0001,退化图像与复原图像都逐渐接近原始图像。

## 4 结 论

所设计的环形孔径镜头引入单层衍射光学元件,采用端到端式光学-数字联合优化成像,提出一种新方法构建出 PSF 模型,有效地提高复原图像的精度,采用约束最小二乘算法对退化图像进行复原,引入 PSNR 和 SSIM 评价退化图像和复原图像质量,对比高斯噪声方差分别为 0.01、0.001、0.0001 的评价结果,得出系统高斯噪声精度越高,复原后图像质量显著提高。复原结果表明,在 0.45~1  $\mu\text{m}$  波长范围内,环形孔径系统引入衍射光学元件能够清晰成像,并且实现空间相机小型化与轻量化,这使该系统可应用于工作波段、系统体积、系统重量等要求苛刻的场合。

## 参 考 文 献

- [1] 任志广,李旭阳,倪栋伟.大相对孔径、大视场、紧凑型空间光学系统设计[J].光学学报,2019,39(9):0922001. Ren Z G, Li X Y, Ni D W. Compact space optical system design with large relative aperture and field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0922001.
- [2] 张蕊蕊,沈为民.环形孔径长焦距光学系统[J].光学学报,2010,30(4):1140-1143. Zhang R R, Shen W M. Long focal-length optical system using annular aperture[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1140-1143.
- [3] 谢亚峰,朴明旭,唐金力,等.激光/红外双模环形孔径导引头光学系统设计[J].红外与激光工程,2023,52(2):20220442. Xie Y F, Piao M X, Tang J L, et al. Optical system design of laser/infrared dual-mode annular aperture seeker[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(2): 20220442.
- [4] 王小勇.空间光学技术发展展望[J].航天返回与遥感,2018,39(4):79-86. Wang X Y. Development and prospect of space optical technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(4): 79-86.
- [5] 虞林瑶,谢京江,魏群,等.超紧凑型单片成像光学系统设计[J].光学学报,2015,35(4):0422006. Yu L Y, Xie J J, Wei Q, et al. Super compact optical system design based on single lens[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0422006.
- [6] 刘光宇,房丰洲.玻璃光学元件精密模压成形技术[J].光学学报,2023,43(8):0822011. Liu G Y, Fang F Z. Precision molding for glass optical components[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822011.
- [7] 李世杰,徐超,黄岳田,等.车削加工硫化锌晶体工艺[J].红外与激光工程,2020,49(7):20190567. Li S J, Xu C, Huang Y T, et al. Processing technology of cutting ZnS crystal[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(7): 20190567.
- [8] Galan M, Strojnik M, Wang Y. Design method for compact, achromatic, high-performance, solid catadioptric system (SoCatS), from visible to IR[J]. Optics Express, 2019, 27(1): 142-149.
- [9] Lippman D H, Chou R, Desai A X, et al. Design of annular folded lenses using freeform gradient-index optics[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 12078: 120781S.
- [10] 孟禹彤,朴明旭,王琦.衍射混合环形孔径超薄成像光学系统设计[J].光子学报,2019,48(12):1211003. Meng Y T, Piao M X, Wang Q. Design of refractive diffraction hybrid annular aperture ultrathin imaging optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(12): 1211003.
- [11] Zhang B, Piao M X, Cui Q F. Achromatic annular folded lens with reflective-diffractive optics[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 32337-32348.
- [12] Piao M X, Zhang B, Dong K Y. Design of achromatic annular folded lens with multilayer diffractive optics for the visible and near-IR wavebands[J]. Optics Express, 2020, 28(20): 29076-29085.
- [13] 胡洋,崔庆丰,孙林,等.红外双波段折衍混合光学-数字联合系统设计[J].光学学报,2020,40(14):1422002. Hu Y, Cui Q F, Sun L, et al. Optical-digital joint design of a dual-waveband infrared refractive-diffractive system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1422002.
- [14] 苏云,徐婧,俞越,等.高分辨率大视场计算成像方法[J].激光与光电子学进展,2021,58(18):1811025. Su Y, Xu J, Yu Y, et al. High-resolution and large field-of-view computational imaging method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811025.
- [15] 顿雄,付强,李浩天,等.计算成像前沿进展[J].中国图象图形学报,2022,27(6):1840-1876. Dun X, Fu Q, Li H T, et al. Recent progress in computational imaging[J]. Journal of Image and Graphics, 2022, 27(6): 1840-1876.
- [16] 王翼昂,胡洋,朴明旭,等.含单层衍射元件的可见宽波段计算成像系统设计[J].光学学报,2023,43(5):0522001. Wang Y A, Hu Y, Piao M X, et al. Design of visible broadband computational imaging system with single-layer diffractive element[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(5): 0522001.
- [17] 徐嫻,王常宇,王涌天,等.衍射光学元件设计方法综述[J].光学学报,2023,43(8):0822007. Xu Y, Wang C Y, Wang Y T, et al. Review of design methods of diffractive optical element[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822007.
- [18] 常笑薇.谐衍射光学元件衍射效率研究[D].北京:北京交通大学,2020. Chang X W. Studies on diffraction efficiency of harmonic diffractive optical elements[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [19] 胡洋.衍射计算成像宽波段光学系统研究[D].长春:长春理工大学,2021. Hu Y. Research on wide waveband optical system for diffractive computational imaging system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.
- [20] Kato K, Umemura N. Sellmeier and thermo-optic dispersion formulas for  $\text{LiInS}_2$ [J]. Applied Optics, 2014, 53(33): 7998-8001.

- [21] 王旭. 衍射光谱计算成像重构技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.  
Wang X. Research on reconstruction technology of diffraction spectrum computed imaging[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [22] 赵玺竣. 基于计算成像的衍射成像技术[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022: 2-86.  
Zhao X J. Diffractive imaging based on computational imaging[D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences, 2022: 2-86.
- [23] 张艳红, 覃凤清, 姜丽, 等. 约束最小二乘滤波的高斯模糊图像复原研究[J]. 大众科技, 2022, 24(9): 10-13.  
Zhang Y H, Qin F Q, Jiang L, et al. Research on restoration of Gaussian blurred image with constrained least square filtering[J]. Popular Science & Technology, 2022, 24(9): 10-13.