

文章编号 1004-924X(2026)19-3008-19

面向空间变化复原的轻量化折衍混合光学系统 设计与主模态点扩散函数建模

苏盛明^{1,4}, 张昊苏^{1*}, 上官爱红¹, 王振宇², 谢友金^{1,3}, 姜泳帆^{1,4}, 王 熹^{1,4}

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院 微小卫星创新研究院, 上海 201203;

3. 中国科学院 空间精密测量技术重点实验室, 陕西 西安 710119;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对星载小型可见光成像载荷前端光学系统镜片数量多, 径向包络较大及空间变化退化问题, 设计了一种轻量化折衍混合光学系统, 并提出一种光学约束主模态点扩散函数(Optically Constrained-Principal Mode-Point Spread Function, OC-PM-PSF)建模方法。该系统以双高斯结构为基础, 引入 Binary 2 衍射面, 在 450~660 nm 波段和 34°全视场条件下优化轴向色差、跨视场调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)一致性及点斑紧凑性。建模时综合考虑衍射光学元件(Diffractive Optical Elements, DOE)衍射效率、光谱权重和探测器响应, 并将视场位置、MTF 变化及均方根(Root Mean Square, RMS)点斑半径变化引入宽谱 PSF 主模态分解, 结合 RL-TV(Richardson-Lucy-Total Variation)算法实现空变复原。结果表明, 透镜数量由 6 片减至 4 片, 最大通光口径由 19.130 mm 降至 13.998 mm, 前端光机组件估算质量降低 34.9%。宽谱未采样视场的平均和最大 PSF 相对重构误差分别为 4.98% 和 7.76%, 复原后峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)由 22.54 dB 提高至 30.11 dB, 结构相似性(Structural Similarity Index, SSIM)由 0.840 提高至 0.940。非同源退化与 PSF 失配实验验证了该方法对有限建模误差具有一定稳定性。

关键词:折衍混合光学; 衍射光学元件; 轻量化成像; 光学约束主模态点扩散函数建模; 空间变化复原; Richardson-Lucy 总变分算法

中图分类号: O439; TP391.41 文献标识码: A

doi: 10.3724/OPE.20263419.3008 CSTR: 32169.14.OPE.20263419.3008

Lightweight hybrid refractive-diffractive optical system design and principal-mode PSF modeling for spatially varying restoration

SU Shengming^{1,4}, ZHANG Haosu^{1*}, SHANGGUAN Aihong¹, WANG Zhenyu²,

XIE Youjin^{1,3}, JIANG Yongfan^{1,4}, WANG Xi^{1,4}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Xi'an 710119, China;

2. Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;

3. Key Laboratory of Space Precision Measurement Technology, Chinese Academy of Sciences,
Xi'an 710119, China;

收稿日期: 2026-06-13; 修订日期: 2026-07-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 62301558); 中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2022405)

4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhanghaosu@opt. ac. cn*

Abstract: A lightweight hybrid refractive-diffractive optical system and an optically constrained principal-mode point spread function (OC-PM-PSF) model are proposed for small-satellite visible-light imaging payloads subject to spatially varying degradation. A Binary 2 diffractive surface is incorporated into a double-Gauss configuration, and the system is optimized across the 450~660 nm spectral range and a 34° full field of view to minimize axial chromatic aberration, improve modulation transfer function (MTF) consistency across the field, and maintain compact spot sizes. Diffractive optical element (DOE) diffraction efficiency, spectral weighting, detector response, field position, and variations in MTF and root-mean-square (RMS) spot radius are incorporated into the principal-mode decomposition of broadband PSFs. The reconstructed spatially varying PSFs are integrated with a Richardson-Lucy algorithm with total variation regularization (RL-TV) for non-blind image restoration. The lens count is reduced from six to four, the maximum clear aperture is decreased from 19.130 mm to 13.998 mm, and the estimated front-end optomechanical mass is reduced by 34.9%. At unsampled field positions, the mean and maximum relative reconstruction errors for broadband PSFs are 4.98% and 7.76%, respectively. Following restoration, PSNR is increased from 22.54 dB to 30.11 dB, and SSIM is improved from 0.840 to 0.940. Additional experiments using nonidentical degradation PSFs and mismatched restoration PSFs demonstrate robustness to limited modeling errors. These results support the integration of lightweight optical design and optically constrained PSF modeling for spatially varying image restoration in small-satellite imaging payloads.

Key words: hybrid refractive-diffractive optics; diffractive optical element; lightweight imaging; OC-PM-PSF; spatially varying restoration; RL-TV algorithm

1 引 言

传统全折射式光学系统往往需借助多片透镜及胶合结构实现像差校正与宽波段成像,导致系统体积、重量及装调复杂度显著增加。为实现在维持成像性能的同时降低结构复杂度,研究人员逐步引入衍射光学维度,发展出折衍混合光学设计路线。Stone等^[1]提出折射-衍射混合透镜与消色差设计方法,指出利用衍射光学元件(Diffractive Optical Elements, DOE)的强色散特性与折射元件形成互补,在减少系统复杂度的同时实现像差校正与色差补偿。Nakai等^[2]针对相机镜头提出多层DOE设计方案,为工程镜头中DOE的引入提供了可实现路径。徐嫒等^[3]对DOE设计技术进展进行了系统总结。杨洪涛等^[4]面向红外成像开展折衍混合系统设计,展示了折衍混合

实现结构紧凑与轻量化的可行性。总体而言,折衍混合光学为“减片数,减重量,降复杂度”提供了可行方向,但其像差在视场与波段维度上的耦合通常更强,部分场景下需结合后端计算复原才能进一步改善全视场像质。

在“光学-算法”协同方面,Peng等^[5]利用轻量化折衍混合光学实现图像采集并通过计算复原恢复细节,系统性地展示了“轻量化光学+计算复原”的有效性,随后进一步提出Diffractive Achromat思路,将部分成像质量约束转移至算法端补偿^[6]。在方法论层面,Sitzmann等^[7]提出光学与图像处理端到端联合优化框架。Li等^[8]基于可微光线追迹提出端到端单透镜设计方法。Yang等^[9]提出课程学习策略实现复杂折射镜头的端到端自动化设计。左超^[10]从计算光学成像角度强调了“光学编码+计算重建”的系统性价值。李

江勇等^[11]针对极简光学系统提出全局优化设计思路。张楚骏等^[12]基于改进遗传算法开展大视角单透镜端到端优化设计。然而,端到端方法通常以复原图像质量反向驱动光学参数优化,光学结构与退化模型之间缺乏可解释的物理关联。本文选择在完成折衍混合轻量化设计的基础上,将光学端的像质特征显式引入后端退化建模过程,以提高退化模型与前端光学系统之间的物理一致性。

在退化建模与复原算法方面,轻量化折衍混合系统的点扩散函数(Point Spread Function, PSF)随视场位置显著变化,呈现典型的空间变化模糊。若采用单一空间不变PSF建模,则易在边缘视场引入复原伪影。司亚中等^[13]针对沙尘退化图像提出了对抗性复原算法。何易德等^[14]基于非局部稀疏先验实现红外运动模糊复原。郝建坤等^[15]对空间变化PSF非盲去卷积方法进行了综述,归纳了空变核的分区、插值建模与加速策略。杨航^[16]进一步总结了非盲图像复原的关键技术点。在去卷积算法层面,RL(Richardson-Lucy)算法因其非负约束与对泊松噪声的适配性得到广泛应用^[17-18]。为抑制RL迭代中的噪声放大与振铃伪影,Rudin等^[19]提出总变分(Total Variation, TV)正则化模型,Dey等^[20]将TV引入RL去卷积并验证了其有效性,Starck等^[21]从噪声建模与正则化角度对天文成像去卷积进行了总结。然而,上述空变建模方法尚未充分考虑折衍混合系统中衍射效率、光谱权重与跨视场像质变化对PSF的综合影响。

针对上述问题,本文在双高斯结构基础上引入单层DOE,开展面向结构简化和空变复原的折衍混合设计;同时提出光学约束主模态PSF(Optically Constrained-Principal Mode-PSF, OC-PM-PSF)模型,将视场位置、调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)变化和点斑扩展以样本权重形式引入主模态分解,并结合RL-TV方法实现空间变化复原。本文重点验证系统的等效光机质量变化、未采样视场PSF插值能力及PSF失配条件下的复原稳定性。

2 折衍混合系统空变退化建模与复原方法

2.1 衍射光学元件的色散特性

单层衍射光学元件的光焦度随波长变化,并具有与常规折射材料相反的色散特性,可与折射元件形成互补,用于宽波段系统的轴向色差校正^[22]。其近轴光焦度、等效折射率及等效阿贝数关系如下。

已知DOE的光焦度为:

$$\Phi_{\text{DOE}}(\lambda) = -2mA_1\lambda, \quad (1)$$

其中: m 为衍射级次, A_1 为位相系数,即DOE的光焦度与波长成正比。

单层衍射光学元件的等效折射率 $n_{\text{DOE}}(\lambda)$ 可以表示为:

$$n_{\text{DOE}}(\lambda) = 1 + \frac{\Phi_{\text{DOE}}(\lambda)}{C_0}, C_0 = c_1 - c_2, \quad (2)$$

其中: $\Phi_{\text{DOE}}(\lambda)$ 为衍射光学元件的光焦度, C_0 为曲率的差值, c_1 和 c_2 分别为等效薄透镜前、后表面曲率。

光学元件的色散能力可以用阿贝数描述:

$$V_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}, \quad (3)$$

其中: n_D, n_F, n_C 分别代表D, F, C谱线的折射率。

将式(1)代入式(2)可得到D, F, C 3个波长的等效折射率:

$$\begin{cases} n_{\text{DOE}}(\lambda_D) = 1 - \frac{2mA_1\lambda_D}{C_0} \\ n_{\text{DOE}}(\lambda_F) = 1 - \frac{2mA_1\lambda_F}{C_0} \\ n_{\text{DOE}}(\lambda_C) = 1 - \frac{2mA_1\lambda_C}{C_0} \end{cases} \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)可以得到衍射光学元件的色散公式为:

$$V_{\text{DOE}} = -\frac{\lambda_D}{\lambda_C - \lambda_F}. \quad (5)$$

由式(5)可知,衍射光学元件的阿贝数总是为负值,而传统的光学材料阿贝数都为正值,所以可以结合二者的特性在光学系统中校正色差。DOE消色差的过程原理图如图1所示。

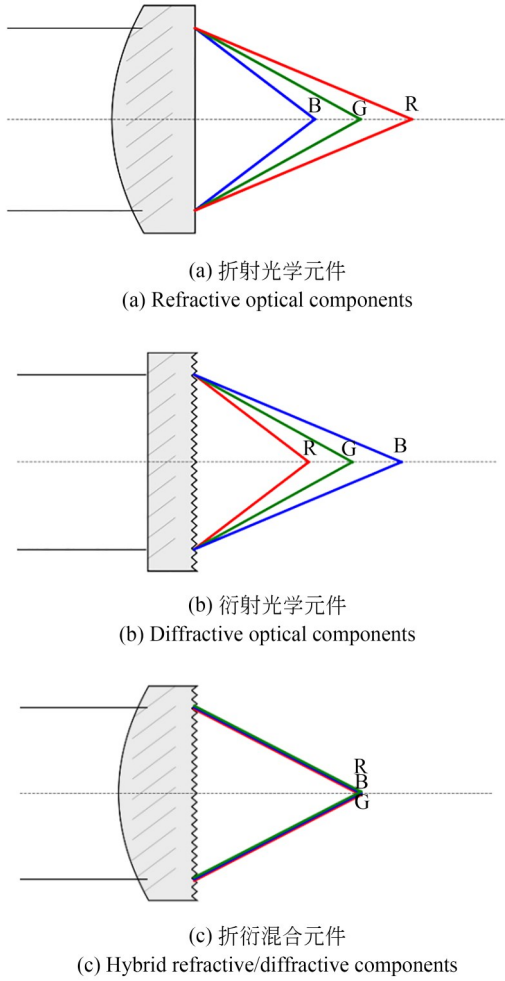


图 1 色差校正原理

Fig. 1 Schematic diagram of chromatic aberration correction

2.2 光学约束主模态 PSF 建模与空变复原

折衍混合系统的 PSF 同时受视场、波长及 DOE 衍射效率影响,单一空间不变 PSF 难以准确描述其宽谱退化。为此,首先利用多视场、多波长单色 PSF 合成等效宽谱 PSF;随后引入视场位置、MTF 变化和均方根(Root Mean Square, RMS)点斑半径变化构建光学权重,并对加权 PSF 矩阵进行主模态分解;最后对模态系数进行空间插值,构建空变退化算子,并结合 RL-TV 方法完成非盲复原。本文所称“光学约束”为通过样本加权引入的软约束。

2.2.1 空间变化成像模型

设理想清晰图像为 $u(\xi)$,经过折衍混合光学系统后,探测器接收到的退化图像为 $v(x)$,其中 ξ 和 x 分别表示物面和像面上的空间位置。由于系统 PSF 随视场位置变化,成像退化过程可表

示为:

$$v(x) = \int_{\Omega} K(x, \xi) u(\xi) d\xi + \eta(x), \quad (6)$$

其中: $K(x, \xi)$ 为空间变化成像核,表示位于 ξ 处的点源在像面 x 处形成的响应, $\eta(x)$ 为成像噪声。离散化后,式(6)可写为:

$$\begin{cases} v_p = \sum_{q=1}^{N_s} K(x_p, \xi_q) u_q \Delta A + \eta_p \\ v = H(u) + \eta, H_{pq} = K(x_p, \xi_q) \Delta A \end{cases}, \quad (7)$$

其中: ΔA 为物面离散采样单元面积, H 为空间变化退化矩阵。实际计算中,本文以局部重叠子块卷积实现 $H(u)$,而不显示存储大规模空间变化退化矩阵。

2.2.2 宽谱等效 PSF 构建

折衍混合光学系统的 PSF 不仅与视场位置有关,还受到波长和衍射效率的影响。对于单层 DOE 而言,其衍射效率随入射波长偏离设计波长而发生变化,不同波长分量在像面上的能量贡献并不完全相同。因此,若仅采用单一设计波长下的 PSF 进行复原建模,可能无法准确表征宽谱成像条件下的实际退化特征。

本文在 Zemax 中选取若干个代表性视场位置,并在工作波段 450~660 nm 内选取若干采样波长,分别导出对应的 PSF。设第 i 个视场位置为 ρ_i ,第 j 个采样波长为 λ_j ,对应的单色 PSF 为:

$$p_{ij}(r) = p(r; \rho_i, \lambda_j), i = 1, \dots, N_f, j = 1, \dots, N_\lambda. \quad (8)$$

考虑 DOE 衍射效率、光谱辐射权重以及探测器响应后,第 i 个视场位置处的等效宽谱 PSF 可表示为:

$$\begin{cases} \kappa_j = \frac{\eta_i(\lambda_j) S(\lambda_j) Q_{\text{det}}(\lambda_j)}{\sum_{l=1}^{N_\lambda} \eta_i(\lambda_l) S(\lambda_l) Q_{\text{det}}(\lambda_l)}, \\ \tilde{p}_i(r) = \sum_{j=1}^{N_\lambda} \kappa_j p_{ij}(r) \end{cases}, \quad (9)$$

其中: $\eta(\lambda_j)$ 表示 DOE 在波长 λ_j 下的一阶衍射效率, $S(\lambda_j)$ 表示入射光谱或场景辐射权重, $Q_{\text{det}}(\lambda_j)$ 表示探测器光谱响应, N_λ 为波长采样数, κ_j 为光谱归一化权重。

为保证不同视场 PSF 之间具有可比性,对每个等效宽谱 PSF 进行统一窗口裁剪和能量归一

化处理:

$$p_i(\mathbf{r}) = \frac{\tilde{p}_i(\mathbf{r})}{\sum_{\mathbf{r}' \in \Omega_c} \tilde{p}_i(\mathbf{r}')}, \mathbf{r} \in \Omega_c, \quad (10)$$

其中: Ω_c 为统一的 PSF 裁剪窗口。该处理使后续模态分解主要反映 PSF 形态随视场的变化, 而不是不同波长或不同视场下总能量差异带来的影响。

2.2.3 光学加权 PSF 矩阵与主模态分解

为了使 PSF 建模过程与前端光学性能保持一致, 在构建 PSF 矩阵时引入光学权重。对于第 i 个视场, 将其等效宽谱 PSF 展开为列向量:

$$\mathbf{p}_i = \text{vec}[\tilde{p}_i(\mathbf{r})] \in \mathbb{R}^{N_p}. \quad (11)$$

由 N_f 个视场位置的 PSF 向量构成矩阵:

$$\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_{N_f}] \in \mathbb{R}^{N_p \times N_f}. \quad (12)$$

对于折衍混合系统而言, 不同视场区域对最终图像质量和复原稳定性的影响并不完全相同。边缘视场通常具有更明显的彗差、像散和 PSF 非对称扩展, 为避免主模态分解过程过度偏向中心视场, 定义视场光学权重矩阵:

$$\mathbf{W} = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{N_f}). \quad (13)$$

构建加权 PSF 矩阵:

$$\mathbf{P}_w = [\sqrt{\omega_1} \mathbf{p}_1, \sqrt{\omega_2} \mathbf{p}_2, \dots, \sqrt{\omega_{N_f}} \mathbf{p}_{N_f}], \quad (14)$$

其中: ω_i 为第 i 个视场位置的权重系数。该权重用于在主模态分解过程中综合考虑视场位置、MTF 变化和点斑扩展对 PSF 空间变化特征的影响。将视场半径、MTF 变化量和点斑半径变化量均归一化后构建视场光学权重:

$$\omega_i = 1 + \alpha \bar{d}_i + \beta \Delta \overline{MTF}_i + \gamma \Delta \bar{s}_i, \quad (15)$$

其中: $\bar{d}_i$ 为第 i 个视场位置的归一化视场半径, $\Delta \overline{MTF}_i$ 为第 i 个视场相对于中心视场的 MTF 变化量, $\Delta \bar{s}_i$ 为第 i 个视场相对于中心视场的归一化点斑半径变化量, α 、 β 、 γ 分别为三项光学约束的权重因子。控制参数自由度, 规定三者非负且满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。通过独立验证视场上的参数敏感性与消融实验对不同权重设置进行比较, 结果表明, 等权重方案位于综合误差的近优区域, 且与细化搜索最优参数之间的性能差异较小, 因此本文后续实验均取 $\alpha =$

$$\beta = \gamma = \frac{1}{3}.$$

$\bar{d}_i$ 、 $\Delta \overline{MTF}_i$ 和 $\Delta \bar{s}_i$ 分别按下式计算:

$$\bar{d}_i = \frac{d_i}{d_{\max}}, d_i = \|\boldsymbol{\rho}_i - \boldsymbol{\rho}_0\|_2, \quad (16)$$

$$\Delta \overline{MTF}_i = \frac{|MTF_i - MTF_0|}{\max_{1 \leq k \leq N_f} |MTF_k - MTF_0| + \epsilon}, \quad (17)$$

$$\Delta \bar{s}_i = \frac{|s_i - s_0|}{\max_{1 \leq k \leq N_f} |s_k - s_0| + \epsilon}, \quad (18)$$

其中: $\bar{d}_i$ 为第 i 个视场位置到中心视场的距离, $d_{\max}$ 为最大视场半径, MTF_i 和 MTF_0 分别为第 i 个视场和中心视场在评价空间频率处的 MTF 值, s_i 和 s_0 分别为第 i 个视场和中心视场的 RMS 点斑半径, ϵ 为防止分母为零的极小正数, 本文取 $\epsilon = 10^{-8}$ 。当不引入光学权重约束时, 可令 $\alpha = \beta = \gamma = 0$, 此时 $\omega_i = 1$, 模型退化为普通 PSF 矩阵分解。

对加权 PSF 矩阵进行奇异值分解:

$$\mathbf{P}_w = \sum_{m=1}^R \boldsymbol{\sigma}_m \mathbf{u}_m \mathbf{v}_m^T, \quad (19)$$

其中: $\boldsymbol{\sigma}_m$ 为第 m 个奇异值, $\mathbf{u}_m$ 和 $\mathbf{v}_m$ 分别第 m 个左右奇异向量, R 为矩阵秩。将 $\mathbf{u}_m$ 重塑为二维形式, 可得到第 m 个主模态 PSF:

$$\boldsymbol{\Psi}_m(\mathbf{r}) = [\text{reshape}(\mathbf{u}_m)](\mathbf{r}). \quad (20)$$

对于第 i 个视场位置, 第 m 阶模态系数可表示为:

$$c_{mi} = \frac{\boldsymbol{\sigma}_m V_{im}}{\sqrt{\omega_i}}. \quad (21)$$

由此, 第 i 个采样视场处的 PSF 可由前 M 个主导模态近似重构为:

$$\hat{p}_i(\mathbf{r}) = \mathcal{N}_+ \left[\sum_{m=1}^M c_{mi} \boldsymbol{\Psi}_m(\mathbf{r}) \right], \quad (22)$$

其中: $\mathcal{N}_+$ 为非负化和能量归一化算子。该表达方式将复杂的空变 PSF 场分解为一组固定主模态和随视场变化的权重系数, 既降低了建模复杂度, 又保留了 PSF 随视场连续变化的主要特征。

2.2.4 全视场 PSF 重构与空变退化算子构建

在获得采样视场处的主模态系数后, 需要进一步计算任意像面位置处的局部 PSF。设像面任意位置为 $\boldsymbol{\rho}$, 第 m 个模态在该位置处的系数通过视场内邻域采样点插值得到:

$$c_m(\boldsymbol{\rho}) = \sum_{i \in S(\boldsymbol{\rho})} N_i(\boldsymbol{\rho}) c_{mi}, \quad (23)$$

其中: $S(\rho)$ 表示与位置 ρ 相邻的采样点集合, $N_i(\rho)$ 为对应的二维插值形函数。

由此可以得到任意位置的局部 PSF:

$$\begin{cases} \hat{p}(\mathbf{r}; \rho) = \mathcal{N}_+ \left[\sum_{m=1}^M c_m(\rho) \Psi_m(\mathbf{r}) \right] \\ \mathcal{N}_+[z](\mathbf{r}) = \frac{[z(\mathbf{r})]_+}{\sum_{\mathbf{r}' \in \Omega} [z(\mathbf{r}')]_+} \end{cases} \quad (24)$$

本文采用局部重叠子块方式实现空间变化卷积。实际复原时,为避免对每个像素单独构建 PSF 带来的高计算量,将图像划分为若干重叠区域,对第 l 个子块,根据其中心位置 ρ_l 重构局部 PSF ρ_l ,则退化算子可表示为:

$$H(\mathbf{u}) = \frac{\sum_{l=1}^{N_b} B_l^T \{ \mathbf{w}_l \odot [\mathbf{p}_l^*(B_l \mathbf{u})] \}}{\sum_{l=1}^{N_b} B_l^T \mathbf{w}_l}, \quad (25)$$

其中: $\mathbf{p}_l = \hat{p}(\mathbf{r}; \rho_l)$, H 为空间变化退化算子, B_l 为第 l 个子块的提取算子, B_l^T 表示对应回填算子, $\mathbf{w}_l$ 为重叠融合窗函数, $*$ 表示二维卷积, $\odot$ 表示逐元素乘法, N_b 为子块数量。该方式能够在保持空间变化建模能力的同时降低计算复杂度,并减小子块边界处的拼接伪影。

2.2.5 基于主模态 PSF 的 RL-TV 非盲复原

在获得空间变化退化算子 H 后,图像复原可转化为已知退化模型下的非盲反卷积问题。考虑到光电成像过程中常伴随泊松噪声,同时标准 RL 迭代在后期容易放大噪声,本文引入 TV 正则化项,构建如下优化模型:

$$\min_{\mathbf{u} > 0} J(\mathbf{u}) = \left\{ \mathbf{1}^T H(\mathbf{u}) - v^T \ln[H(\mathbf{u}) + \epsilon_d \mathbf{1}] + \lambda_{TV} \text{TV}(\mathbf{u}) \right\}, \quad (26)$$

其中: ϵ_d 为数据项数值稳定常数, λ_{TV} 为 TV 正则化参数, $\text{TV}(\mathbf{u})$ 定义为:

$$\text{TV}(\mathbf{u}) = \sum_{i,j} \sqrt{(D_x \mathbf{u})_{i,j}^2 + (D_y \mathbf{u})_{i,j}^2 + \epsilon_{TV}^2}, \quad (27)$$

其中: D_x 和 D_y 分别表示水平方向和垂直方向的差分算子, ϵ_{TV} 为 TV 梯度平滑常数, i, j 表示图像像素位置。基于 RL 的乘性迭代思想,复原结果

可按如下形式更新:

$$\mathbf{u}^{(k+1)} = \frac{\mathbf{u}^{(k)} \odot \frac{H^*[\mathbf{v} \odot H \mathbf{u}^{(k)} + \epsilon_d \mathbf{1}]}{H^* \mathbf{1} - \lambda_{TV} \text{div} \left[\frac{\nabla \mathbf{u}^{(k)}}{\sqrt{\|\nabla \mathbf{u}^{(k)}\|_2^2 + \epsilon_{TV}^2}} \right] + \epsilon_d \mathbf{1}}}, \quad (28)$$

其中: H^* 为空间变化退化算子的伴随算子, $\odot$ 表示逐元素除法。迭代过程中, RL 数据一致性项用于保证复原图像与观测图像之间的成像模型匹配, TV 正则化项用于抑制噪声放大和振铃伪影,从而提高复原稳定性。

采用能量泛函相对变化率作为迭代停止判据:

$$\delta^{(k)} = \frac{|J(\mathbf{u}^{(k)}) - J(\mathbf{u}^{(k-1)})|}{|J(\mathbf{u}^{(k-1)})|}. \quad (29)$$

当 $\delta^{(k)}$ 小于预设阈值,或迭代次数达到设定上限时,停止迭代并输出复原结果。当 $\delta^{(k)}$ 降至 10^{-6} 量级时,复原结果基本保持不变,故后文采用 $\delta^{(k)} < 1 \times 10^{-6}$ 作为迭代停止判据。实际计算中, λ_{TV} 需要通过参数扫描确定,以平衡细节增强、噪声抑制和计算时间。

3 折衍混合光学系统设计、光机质量估算与像质分析

面向星载小型可见光面阵成像载荷,重点研究结构简化条件下的宽谱空变 PSF 建模与复原,不涉及极弱目标探测和绝对辐射灵敏度预算。使用专利 US4863251^[23] 作为传统折射系统的初始结构,该专利系统的焦距为 50 mm, F 数为 5.6,具备 34° 的全视场,工作波段覆盖 486.1~656.3 nm,系统总长度为 64 mm。该专利系统基于双高斯构型,共采用 6 片透镜,具体包括两组双胶合透镜与两片凸透镜,并将光阑置于系统中央。将该专利作为初始结构进行优化,优化结束后,传统折射系统的结构参数如表 1 所示,系统结构图如图 2 所示。

在传统折射系统的结构基础上,为降低透镜

表 1 传统折射系统的结构参数

Tab. 1 Structure parameters of traditional refractive system (mm)

表面	表面类型	曲率半径	厚度	材料	直径
1	Standard	29.863	2.670	LAC8	17.528
2	Standard	75.638	0.758	—	16.440
3	Standard	11.756	2.680	LAC9	14.036
4	Standard	20.834	1.710	FD15	12.542
5	Standard	9.583	5.163	—	10.082
Stop	Standard	无限	8.829	—	6.260
7	Standard	-11.058	1.310	FEL4	12.002
8	Standard	99.172	3.964	BACD5	15.304
9	Standard	-16.050	0.255	—	16.598
10	Standard	-229.509	2.498	LACL5	18.536
11	Standard	-31.719	33.578	—	19.130

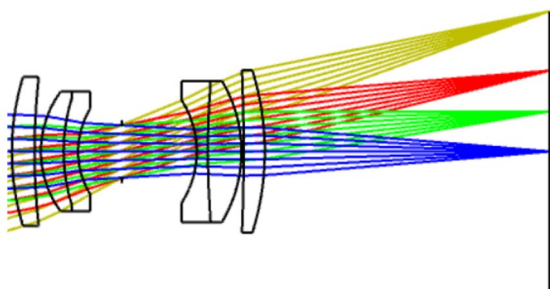


图 2 传统折射系统结构

Fig. 2 Structure of traditional refractive system

数量、径向口径和光学元件复杂度,引入单层衍射光学元件。优化过程中约束系统焦距为 50 mm、 F 数为 5.6、全视场为 34° ,以保证折衍混合系统与传统折射系统在相同成像规格下进行对比。优化后系统由 4 片单透镜构成,为保持对称式结构在像场平整度以及校正彗差、倍率色差与畸变等方面的优势,光阑仍置于系统中心,延续了双高斯结构的基本形式。为进一步简化系统,原有两组胶合透镜被替换为两片单透镜,并将衍射面设置于第 4 片透镜的后表面。将 Binary 2 面设置于第 4 片透镜的后表面(即第 9 面),衍射级次为 1,衍射光学元件的设计波长为 540 nm。除传统的轴向色差、各视场 MTF 及点斑半径外,还重点关注跨视场 MTF 的离散程度以及 PSF 主瓣扩展的稳定性。具体而言,一方面要求各视场在若干代表性空间频率处具有尽可能高的 MTF,以保证系统对中高频细节信息的传递能力;另一

方面约束不同视场间 MTF 波动及点扩散范围变化,以减小视场变化带来的退化不一致性,从而为后续基于空间变化 PSF 的建模与复原提供更稳定的退化基础。该设计过程体现了在轻量化约束下对前端光学退化控制与后端复原适配性的综合考虑。优化结束后,折衍混合系统的结构参数如表 2 所示,系统结构图如图 3 所示。

表 2 折衍混合系统的结构参数

Tab. 2 Structural parameters of hybrid refractive-diffractive system (mm)

表面	表面类型	曲率半径	厚度	材料	直径
1	Standard	21.963	1.065	H-ZLAF75C	13.246
2	Standard	45.979	5.009	—	12.938
3	Standard	8512.420	0.600	H-ZF52	8.614
4	Standard	24.141	0.947	—	8.158
Stop	Standard	无限	1.175	—	7.836
6	Standard	-14.428	6.198	D-ZLAF85L	8.064
7	Standard	-19.073	0.600	—	12.204
8	Standard	44.388	1.673	D-ZPK3-25	13.838
9	Binary 2	-13.041	57.014	—	13.998

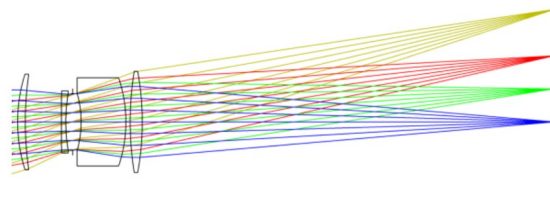


图 3 折衍混合系统结构

Fig. 3 Structure of hybrid refractive-diffractive system

本文对传统折射系统和折衍混合系统的前端光机组件质量进行比较。考虑到本文尚未开展完整机械结构详细设计,质量估算采用相同装配假设下的等效薄壁圆筒镜筒模型,仅用于评价两种光学结构在相同工程约束下的质量变化趋势。

取径向装配余量 $c = 1 \text{ mm}$ 、等效壁厚 $t = 1 \text{ mm}$ 、镜筒材料密度 $\rho_m = 2.70 \text{ g/cm}^3$ 。设系统最大通光口径为 $D_{\max}$,系统总长为 L ,镜筒内径为 D_{in} ,镜筒外径为 D_{out} 。其中,镜筒内径可表示为:

$$D_{\text{in}} = D_{\max} + 2c. \quad (30)$$

镜筒外径可表示为:

$$D_{\text{out}} = D_{\text{in}} + 2t. \tag{31}$$

则镜筒结构质量可估算为:

$$m_{\text{tube}} = \rho_{\text{m}} \frac{\pi}{4} (D_{\text{out}}^2 - D_{\text{in}}^2) L. \tag{32}$$

光学元件质量按下式估算:

$$m_{\text{glass}} = \sum_i \rho_i V_i, \tag{33}$$

其中: V_i 和 ρ_i 分别为第 i 片透镜的体积和材料密度。由此,前端光机组件估算质量为:

$$m_{\text{total}} = m_{\text{glass}} + m_{\text{tube}}. \tag{34}$$

由表 3 可知,折衍混合系统并未实现轴向总长压缩,其后焦距由 33.578 mm 增加至 57.014 mm,系统总长由 63.415 mm 增加至 74.281 mm。因此,本文所述轻量化并非指系统轴向包络缩

短,而是指在保持相同焦距、 F 数和全视场条件下,前端镜组的透镜数量、径向口径、玻璃体积及等效光机组件质量降低。具体而言,折衍混合系统的透镜数量由 6 片减少至 4 片,最大通光口径由 19.130 mm 降低至 13.998 mm,估算玻璃体积由 3.087 cm³ 降低至 1.164 cm³。虽然系统总长增加会使镜筒轴向尺寸增大,但由于最大径向口径明显降低,在相同装配余量、相同壁厚和相同镜筒材料的简化薄壁圆筒模型下,折衍混合系统的等效镜筒质量并未增加,前端光机组件估算质量由 22.70 g 降低至 14.78 g,降低约 34.9%。该估算结果表明,在采用的相同装配余量、相同壁厚和相同镜筒材料假设下,光学元件数量和径向包络的降低能够在一定程度上抵消轴向长度增加带来的结构质量影响。

表 3 光学结构与等效光机质量参数对比

Tab. 3 Comparison of optical structure and equivalent opto-mechanical mass parameters

参 数	传统折射系统	折衍混合系统	变 化
透镜数量	6	4	减少 33.3%
玻璃材料种类	6	4	减少 33.3%
最大通光口径/mm	19.130	13.998	减少 26.8%
后焦距/mm	33.578	57.014	增加 69.8%
系统总长/mm	63.415	74.281	增加 17.1%
估算圆柱包络体积/cm ³	18.227	11.431	减少 37.3%
估算玻璃体积/cm ³	3.087	1.164	减少 62.3%
估算玻璃质量/g	10.80	4.07	减少 62.3%
简化镜筒质量/g	11.90	10.71	减少 10.0%
镜片—简化镜筒组合估算质量/g	22.70	14.78	减少 34.9%

本文中的最大通光口径为各光学表面净通光直径的最大值,用于表征系统径向包络和元件加工尺寸,并不等同于入瞳直径。由于两种系统的焦距均为 50 mm、 F 数均为 5.6,其入瞳直径均约为 8.93 mm。因此,最大通光口径由 19.130 mm 降至 13.998 mm 主要表示径向包络减小,并不意味着几何收光能力按面积比例下降。DOE 衍射效率、材料吸收和表面反射仍会降低系统透过率,且本文在宽谱 PSF 合成中考虑其相对光谱影响,绝对透过率与信噪比预算留待后续工程设计评估。

将传统折射系统和折衍混合系统的轴向像差图进行对比,两个系统的轴向像差如图 4 所示。

由图 4 可见,传统折射系统不同波长的焦位分离较明显,而折衍混合系统各波长轴向像差曲线更为集中,表明 DOE 的负色散能够补偿折射材料的正色散,减小工作波段内的轴向色差。

为进一步分析两个系统的成像质量,将传统折射系统和折衍混合系统的 MTF 进行对比,由图 5 和表 4 可见,折衍混合系统在 50,100 和 150 lp/mm 处的平均 MTF 均高于传统折射系统,且标准差和变异系数更小。其中,100 lp/mm 处平均 MTF 由 0.397 提高至 0.561,变异系数由 0.153 降低至 0.037,表明其在提升中高频传递能力的同时改善了跨视场一致性。

将传统折射系统和折衍混合系统的点列图

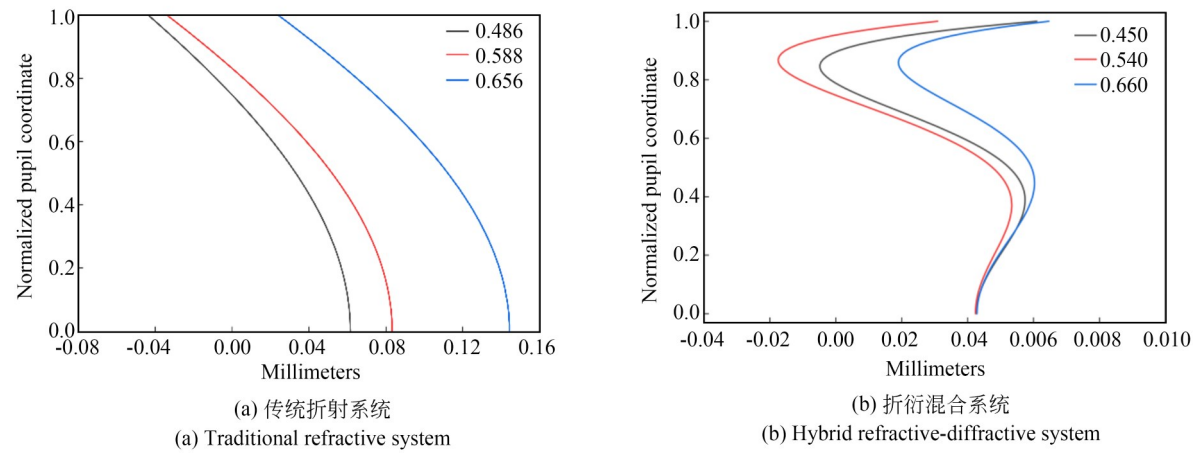


图4 轴向像差
Fig. 4 Axial aberration

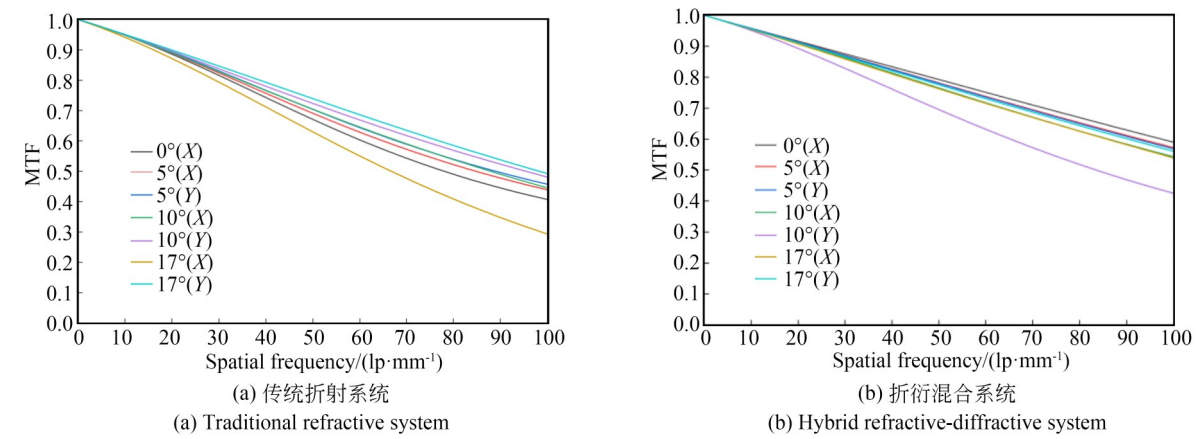


图5 光学系统的MTF曲线
Fig. 5 MTF curves of optical systems

表4 MTF一致性统计

Tab. 4 MTF consistency statistics

空间频率/(lp·mm ⁻¹)		平均 MTF	标准差	变异系数
折衍混合系统	50	0. 775 517	0. 012 247	0. 015 792
	100	0. 561 182	0. 021 034	0. 037 481
	150	0. 371 623	0. 024 565	0. 066 102
传统折射系统	50	0. 674 844	0. 028 224	0. 041 823
	100	0. 397 337	0. 060 857	0. 153 161
	150	0. 236 164	0. 072 636	0. 307 567

进行对比,由图 6 和表 5 可知,折衍混合系统在 0°,5°,10°和 17°视场的 RMS 点斑半径均小于传统折射系统,其中心视场由 2.721 μm 降至 0.282 μm 。边缘视场仍存在一定非对称扩展,但全视

场点斑总体更加紧凑,说明色差及离轴像差得到改善。

由表 4 与表 5 可见,折衍混合系统的退化特性虽整体较传统折射系统更稳定,但不同视场区

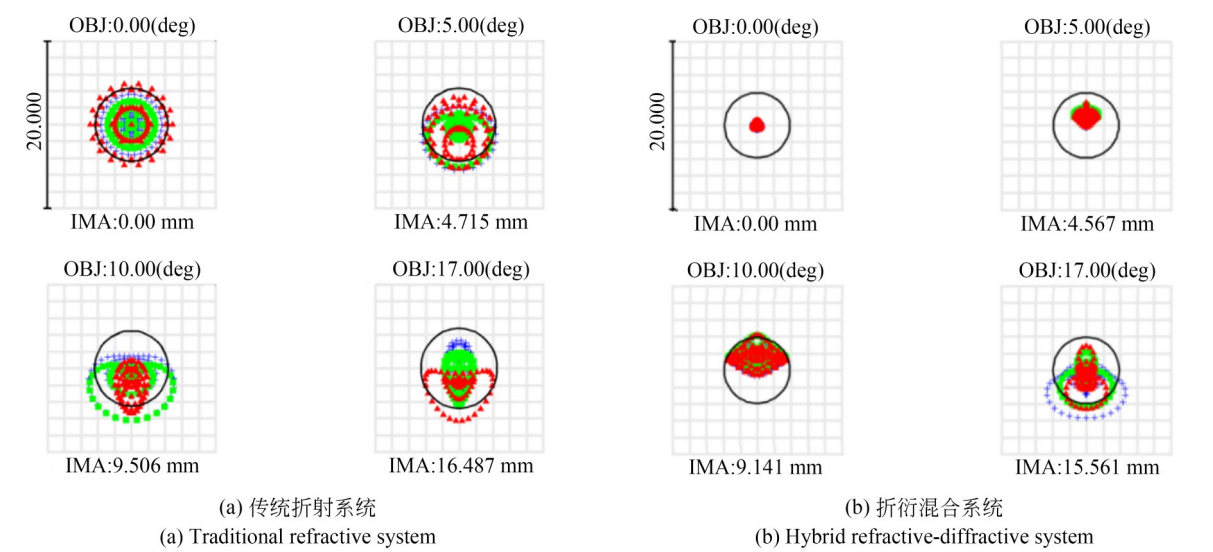


图 6 标准点列图
Fig. 6 Standard spot diagram

表 5 光学系统的点斑半径
Tab. 5 Spot radius of the optical systems

视场/(°)	RMS/ μm		GEO/ μm	
	传统折射系统	折衍混合系统	传统折射系统	折衍混合系统
0	2.721	0.282	4.872	0.554
5	2.692	1.402	5.455	2.669
10	2.825	2.596	6.194	4.172
17	2.421	2.074	6.306	5.862

域间仍存在局部变化差异:中心视场PSF主瓣更为紧凑,而靠近边缘及过渡区域的点扩散范围和形态变化更为显著。这表明PSF随视场位置的变化并非均匀一致,因此在后续空变建模中,有必要采用能够描述跨视场连续变化特征的主模

态建模方法,并结合光学误差约束确定模型复杂度,以提高退化描述精度与复原匹配性。

在工程化应用中,衍射光学元件的微结构参数是决定其制备难度与衍射效率达成率的关键。Zemax结果表明,Binary 2衍射面在全口径内约包含16.2个相位周期,最小环带宽度约为0.108 mm,如图7所示。其特征尺寸处于亚毫米量级,明显大于工作波长,说明该DOE不存在过窄环带,具有一定加工可行性。

4 参数选择与图像处理结果

4.1 PSF采样密度

在OC-PM-PSF建模框架下,空间变化PSF场通过对有限个采样PSF进行主模态分解,并对模态系数进行空间插值来实现全场重构。因此,PSF的空间采样密度至关重要。本节通过分析

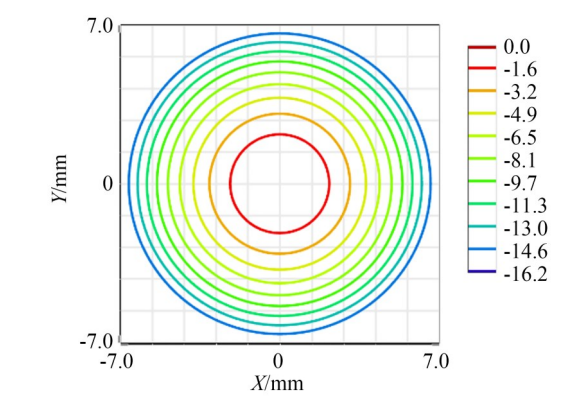


图 7 表面相位
Fig. 7 Surface phase

采样点数对 PSF 重构误差的影响,确定后续建模所采用的采样密度。

首先,定义采样视场或验证视场处的 PSF 相对重构误差为:

$$e_{\text{PSF}} = \frac{\|p_{\text{true}} - \tilde{p}\|_2}{\|p_{\text{true}}\|_2}, \quad (35)$$

其中: p_{true} 为 Zemax 导出的参考 PSF, $\tilde{p}$ 为重构 PSF。

通过对参考位置处的误差进行统计分析,得到采样密度与平均插值误差之间的关系,如图 8 所示。随着采样点数的增加,PSF 插值误差整体呈单调下降趋势。当采样点数为 49(即 7×7 的网格)时,误差下降幅度明显趋缓且已处于可接受水平,因此采用 49 个采样点。

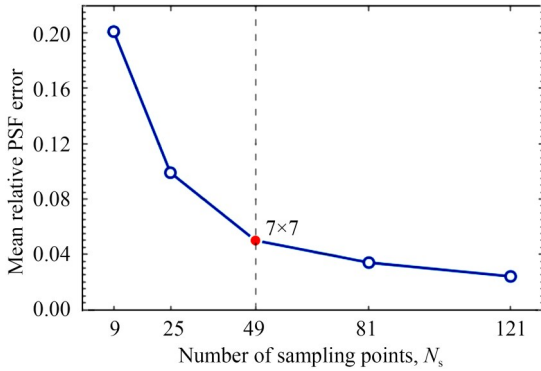


图 8 PSF 插值误差随采样点数的变化

Fig. 8 PSF interpolation error versus the number of sampling points

4.2 主模态数选择

在 OC-PM-PSF 建模中,截断模态数 m 的选择直接影响 PSF 重构精度与复原稳定性。若 m 过小,则难以准确描述边缘视场的非对称拖尾和旁瓣结构;若 m 过大,则会增加计算量,并可能引入高阶扰动,降低复原过程的稳定性。

图 9 给出了主模态数量与累计能量占比之间的关系。可以看出,随着模态数增加,累计能量占比迅速上升,并在较少模态数下趋于饱和。当前 21 个主模态被保留时,累计能量已接近 1,说明有限数量的主模态能够表征全视场宽光谱 PSF 的主要变化特征。因此,选取 $m=21$ 作为 OC-PM-PSF 模型的主模态数量,以兼顾建模精度和模型复杂度。

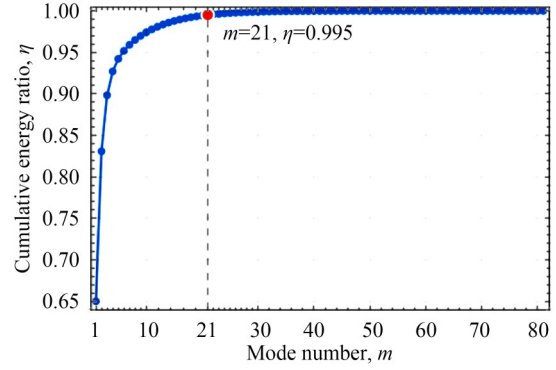


图 9 主模态数量与累计能量占比关系

Fig. 9 Relationship between principal PSF modes and cumulative energy ratio

4.3 空间变化 PSF 建模结果与误差分析

为验证 OC-PM-PSF 模型对未参与建模视场的空间插值能力,进一步构建独立验证视场。在 13×13 高密度视场网格中,间隔选取 7×7 个视场 PSF 用于主模态分解。其余 120 个未采样视场按照视场半径和方位均衡划分为 60 个参数验证视场和 60 个独立测试视场。参数验证视场用于权重参数敏感性分析,独立测试视场不参与参数调整和模型构建,仅用于评价未采样视场的最终重构性能。图 10 和图 11 及表 6 和表 7 中的最终误差均基于独立测试视场统计。

从独立验证集中选取由中心向边缘过渡的 4 个未采样位置,对由 Zemax 导出的多波长单色 PSF 按式(9)加权合成的等效宽谱参考 PSF 与 OC-PM-PSF 重构结果进行比较。所选视场坐标分别为 $(2.83^\circ, 0^\circ)$ 、 $(8.50^\circ, 2.83^\circ)$ 、 $(8.50^\circ, 8.50^\circ)$ 和 $(14.17^\circ, 8.50^\circ)$, 对应等效视场半径分别为 2.83° 、 8.96° 、 12.02° 和 16.52° 。所有 PSF 均采用相同窗口尺寸进行裁剪和能量归一化,并使用统一显示范围。

MTF 相对重构误差定义为:

$$e_{\text{MTF}} = \frac{\left\| \mathcal{F}\{p_{\text{true}}\} - \left| \mathcal{F}\{\tilde{p}\} \right| \right\|_2}{\left\| \mathcal{F}\{p_{\text{true}}\} \right\|_2}, \quad (36)$$

其中: $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示二维傅里叶变换。与仅基于 PSF 空域误差的判据相比,MTF 误差能够进一步反映 PSF 重构对频率传递能力的保持情况,更适合用于评价光学系统复原模型的有效性。

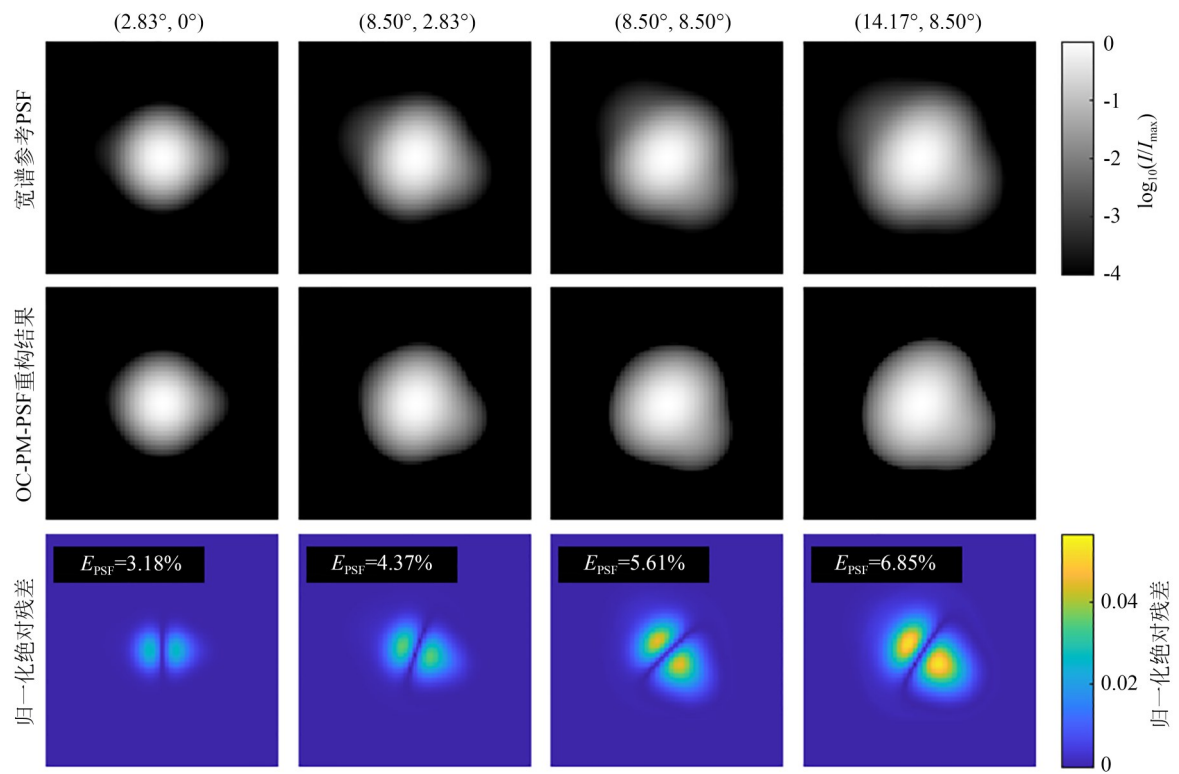


图 10 未采样视场下 Zemax 宽谱 PSF、OC-PM-PSF 重构结果及残差分布

Fig. 10 Zemax broadband PSFs, reconstructed OC-PM-PSFs, and residual maps at unsampled fields

表 6 未采样视场下 OC-PM-PSF 重构误差

Tab. 6 Reconstruction error of OC-PM-PSF in unsampled fields of view

未采样视场(θ_x, θ_y)	等效视场半径/(°)	PSF 相对误差	MTF 相对误差	最大绝对残差
(2.83°, 0°)	2.83	0.031 8	0.025 4	0.006 8
(8.50°, 2.83°)	8.96	0.043 7	0.034 6	0.010 2
(8.50°, 8.50°)	12.02	0.056 1	0.044 3	0.014 7
(14.17°, 8.50°)	16.52	0.068 5	0.054 2	0.018 9

图 10 和表 6 表明,OC-PM-PSF 重构结果能够保持未采样视场 PSF 的主瓣位置和主要扩展方向。随着等效视场半径由 2.83°增至 16.52°,PSF 相对重构误差由 0.031 8 增至 0.068 5,MTF 相对重构误差由 0.025 4 增至 0.054 2,表明离轴程度增加后 PSF 形态变化及空间插值难度逐渐增大。4 个代表性未采样视场的平均 PSF 相对误差约为 0.050 0,与 7×7 建模网格下的整体插值误差量级一致。

为进一步分析模型在波长和视场两个维度上的重构性能,分别在 450,540 和 660 nm 单色条件以及 450~660 nm 等效宽谱条件下,对 60 个独立测试视场计算 PSF 相对重构误差,并绘制全视

场误差分布。由图 11 可见,不同光谱条件下的误差分布具有相似的空间变化趋势,中心区域误差相对较低,较大误差主要位于边缘视场及 PSF 形态变化较快的过渡区域。

在 540 nm 设计波长附近,验证视场的平均 PSF 相对误差为 0.043 6,最大误差为 0.067 5,均低于短波端和长波端。450 nm 和 660 nm 条件下的平均 PSF 误差分别为 0.056 8 和 0.052 7,表明波长偏离 DOE 设计波长后,PSF 空间变化复杂度和重构难度有所增加。宽谱条件下,平均 PSF 误差、95% 分位误差和最大误差分别为 0.049 8,0.069 8 和 0.077 6,平均 MTF 误差和最大 MTF 误差分别为 0.039 1 和 0.059 8。

表 7 不同光谱条件下未采样视场 PSF 重构误差统计

Tab. 7 PSF reconstruction error statistics in unsampled FOV across different spectra

光谱条件	独立测试点 数量	平均 PSF 误差	PSF 误差 95% 分位值	最大 PSF 误差	平均 MTF 误差	最大 MTF 误差
450 nm	60	0.056 8	0.079 5	0.087 2	0.044 6	0.067 8
540 nm	60	0.043 6	0.060 9	0.067 5	0.034 2	0.052 1
660 nm	60	0.052 7	0.073 6	0.081 4	0.041 3	0.063 0
450~660 nm 宽谱	60	0.049 8	0.069 8	0.077 6	0.039 1	0.059 8

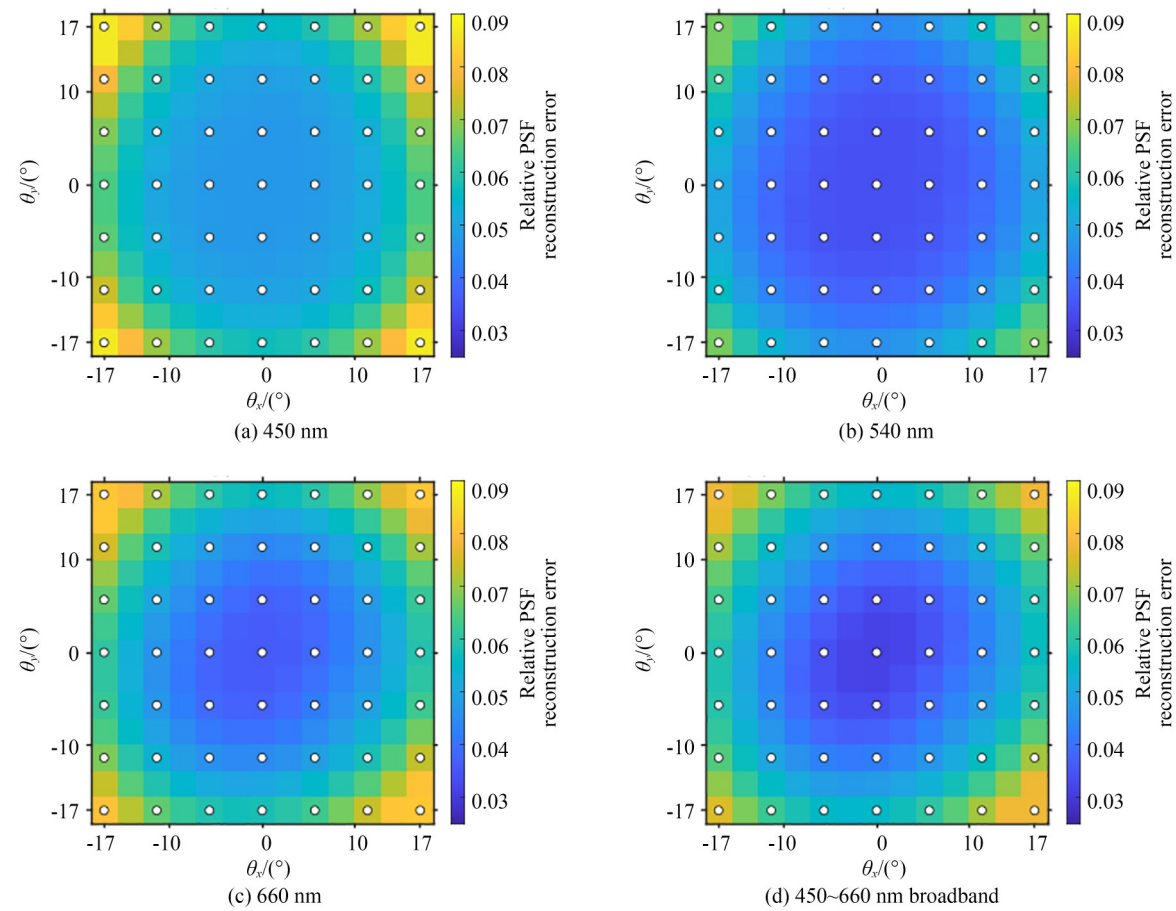


图 11 不同光谱条件下全视场 PSF 相对重构误差分布

Fig. 11 Full-field relative PSF reconstruction error distributions under different spectral conditions

上述结果表明,OC-PM-PSF 模型不仅能够准确描述建模视场处的 PSF,还能够对未参与建模的中间视场进行连续空间插值。在不同单色和宽谱条件下,大多数未采样视场均保持较低的 PSF 和 MTF 重构误差,从而进一步验证了所提模型在全视场范围内的空间泛化能力。

4.4 光权重参数敏感性与消融分析

公式(15)中的权重参数 α , β 和 γ 分别用于控

制视场位置、MTF 变化和点斑扩展三类光学信息对主模态分解过程的影响。为分析不同光学约束的实际作用,并避免仅依赖经验设定权重参数,进一步开展了参数敏感性与消融实验。

实验中采用高密度多视场宽谱 PSF 作为参考数据,从中间隔选取 7×7 个视场位置的 PSF 用于 OC-PM-PSF 模型构建,60 个参数验证视场用于权重参数敏感性分析和参数选择,独立测试

视场不参与本节参数调整。所有模型均保留 21 个主导模态,并保持 PSF 窗口尺寸、归一化方式、噪声设置、RL-TV 正则化参数及停止条件一致。分别设置无光学权重、单项光学约束、两项联合约束、三项等权约束和参数搜索最优约束,对全视场平均 PSF 重构误差、平均 MTF 重构误差、最大 PSF 重构误差以及非同源 PSF 条件下的图像复原指标进行比较,结果如图 12 所示。

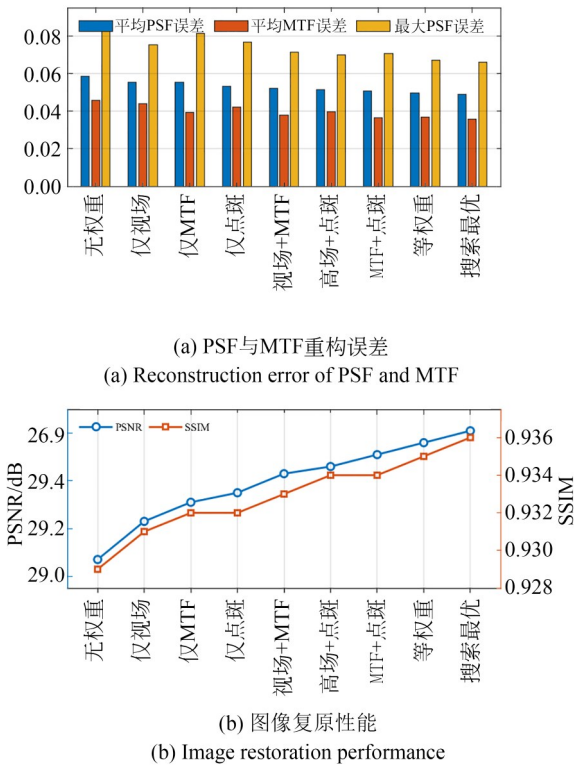


图 12 不同权重设置下的 PSF 重构误差与图像复原性能
Fig. 12 PSF reconstruction errors and image restoration performance under different weighting configurations

由图 12(a)可见,三类单项约束均能改善 PSF 重构,但作用侧重不同:视场位置约束主要降低边缘视场最大误差,MTF 约束主要降低频域重构误差,点斑约束对平均 PSF 误差改善更明显。两项或三项约束联合后,各项误差进一步降低,说明不同光学信息具有互补性。

三项等权约束下,平均 PSF 误差、平均 MTF 误差和最大 PSF 误差分别为 0.049 8、0.036 8 和 0.067 2,较无权重模型分别降低 14.7%、19.7% 和 22.0%。细化搜索得到的最优参数为 $\alpha = 0.30$, $\beta = 0.35$ 及 $\gamma = 0.35$,但相较等权设置,平

均 PSF 误差仅降低 0.000 7。

图 12(b)中,等权设置对应 PSNR 和 SSIM 分别为 29.56 dB 和 0.935,与搜索最优结果 29.61 dB 和 0.936 非常接近。为避免针对有限数据过度调参,并保持参数解释简单,后续实验采用 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ 。

4.5 图像处理

为验证所设计折衍混合系统的退化特性与后端空变复原方法之间的适配性,对传统折射系统和折衍混合系统生成的退化图像分别进行复原处理,并对比二者的复原图像质量。采用 PSNR 和 SSIM 对图像复原前后的质量进行定量评价^[24-25],PSNR 是一种基于像素误差的传统指标,主要从均方误差的角度反映图像的失真程度。而 SSIM 则进一步从视觉感知出发,通过比较两幅图像在亮度、对比度和结构三个方面的相似性来评估质量,其取值范围在 0 到 1 之间,越接近 1 表示与理想图像越相似。

在理想仿真模糊的基础上,进一步模拟了包含复杂退化的非理想复原场景。在模糊图像中引入泊松-高斯混合噪声 (Poisson-Gaussian Mixed Noise),以模拟实际 CMOS 传感器的光子散粒噪声和暗电流读出噪声。考虑到引入噪声后 λ_{TV} 的选取至关重要,本文引入 L 曲线分析法来确定最优 λ_{TV} 。该方法通过绘制不同 λ_{TV} 下解的 TV 正则化项 $TV(f)$ 与数据保真项 $D(f)$ 的关系曲线,并将曲线的拐点视为平衡去噪与保真的最佳 λ_{TV} 。

曲线上的每一点均对应该 λ_{TV} 下满足 $\delta^{(k)} < 1 \times 10^{-6}$ 的稳定解。图 13 中的曲线呈现出较明显

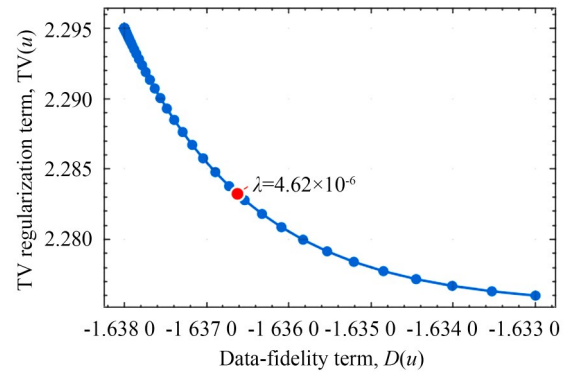


图 13 L 曲线分析与拐点识别

Fig. 13 L-curve analysis and corner identification

的 L 型结构,其拐点所对应的 $\lambda_{TV}=4.62\times 10^{-6}$ 即为该噪声水平下的理论最优参数。具体详细的实验关键参数如表 8 所示。

表 8 OC-PM-PSF 建模与复原参数设置

Tab. 8 Parameter configuration for OC-PM-PSF modeling and restoration

参数	取值
PSF 采样网络	7×7
主模态数量	21
α	1/3
β	1/3
γ	1/3
RL-TV 停止阈值	1×10^{-6}
TV 正则化参数	4.62×10^{-6}

采用该最优 λ_{TV} 对退化图像进行复原。由图 14 和表 9 可知,复原图像在边缘锐度、纹理可辨性及局部对比度方面均有所改善。特别是在面部特征和服饰的线条部分,复原图像恢复了更多的细节。模糊图像中的细节丢失和模糊现象得到了有效修复,复原后的图像呈现出更高的视觉质量。复原后 PSNR 由 22.54 提升至 30.11, SSIM 由 0.840 提升至 0.940,说明在本文模拟实验条件下,所采用的空变 PSF 建模与 RL-TV 复原流程能够改善图像清晰度与结构保持。

为比较两类系统在相同复原条件下的表现,在相同测试图像、相同空变 PSF 采样密度下,对传统折射系统与折衍混合系统的复原结果进行

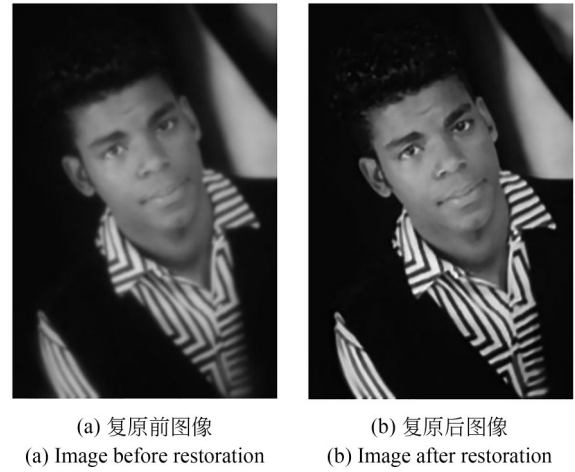


图 14 图像复原结果对比

Fig. 14 Comparison of image restoration results

表 9 评价结果

Tab. 9 Evaluation result

条件	PSNR/dB	SSIM
复原前	22.54	0.840
复原后	30.11	0.940

了对比。折衍混合系统在复原前具有更小的 PSF 扩展和更高的中高频传递能力;在此基础上,经相同算法复原后,其 PSNR 和 SSIM 均优于传统折射系统,如表 10 所示。

表 10 光学系统的图像质量指标

Tab. 10 Image quality indicators for optical systems

条件	PSNR/dB		SSIM	
	传统折射系统	折衍混合系统	传统折射系统	折衍混合系统
复原前	22.08	22.54	0.831	0.840
复原后	27.73	30.11	0.920	0.940

4.6 不同算法复原性能对比

为评估基于 OC-PM-PSF 建模的 RL-TV 空变复原方法在折衍混合系统退化图像复原中的有效性,选取分块复原法、Nagy 空变复原法、MultiWienerNet 法和 EigenCWD 法作为对比方法。分块拼接复原法^[26]将图像划分为 7×7 个子块,并假设各子块内 PSF 近似空间不变,分别复原后再进行拼接;Nagy 方法^[27]则从整体空间变化成像模型出发,利用视场内 7×7 个参考 PSF 构建空变退化算子,并通过迭代求解实现全图复原;MultiWienerNet 法^[28]利用空间变化 PSF 信息构建多 Wiener 滤波与神经网络联合复原框架,该方法通过多个可微 Wiener 滤波器与 CNN 结合处理空间变化退化,并报道了相对于传统空间变化迭代方法的计算效率优势;EigenCWD 法^[29]利用特征分解近似空间变化 PSF 并结合总变分正则化与 ADMM 求解,该方法在保证去模糊效果的同时显著提升了计算效率。为保证比较的公平性,5 种方法采用相同的退化图像、噪声设置和 PSF 数据来源。

为进一步直观比较不同空变复原算法对局部纹理和边缘结构的恢复能力,选取相同高频纹理区域,给出分块复原法、Nagy 法、MultiWienerNet 法、EigenCWD 法和 OC-PM-PSF 方法的局

部放大结果及归一化绝对残差分布,如图 15 所示。各方法均采用相同退化图像、噪声设置和参考图像,所有局部图使用相同灰度显示范围,所有残差图使用统一线性色标。为降低仅依赖视觉判断带来的主观性,图中同时给出了局部残差

的平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 和 95% 分位值 (P_{95})。

如图 15 所示,图 15(a) 为相同区域的局部放大结果,图 15(b) 为相对于理想参考图像的归一化绝对残差图。可见,分块复原法和 Nagy 法在高对比度条纹边缘附近仍存在较明显的残余误差,MultiWienerNet 法和 EigenCWD 法进一步减弱了边缘残差并改善了纹理连续性。OC-PM-PSF 方法的局部放大结果保持了较清晰的条纹边界和较好的结构连续性,其残差图中低残差区域占比更高,高残差主要集中于少量强边缘位置。对应的局部 MAE 和 P_{95} 均低于其他对比方法,说明所提模型能够更准确地描述该衍射混合系统的空间变化退化,并提高局部结构恢复精度。

结合表 11 中的全图 PSNR、SSIM 和运行时间结果,OC-PM-PSF 方法获得了最高的复原精度和结构相似性。虽然其运行时间高于分块复原法、MultiWienerNet 法和 EigenCWD 法,但明显低于 Nagy 法,表明所提方法在计算量可接受的条件下实现了较好的复原精度与结构保持能力。

表 11 不同空变复原算法性能对比

Tab. 11 Performance comparison of different spatially variant restoration algorithms

方 法	运行时间/s	PSNR/dB	SSIM
分块复原法	50.46	28.52	0.935
Nagy 法	273.54	28.59	0.931
MultiWienerNet 法	38.64	29.38	0.934
EigenCWD 法	86.32	29.74	0.937
OC-PM-PSF	120.56	30.11	0.940

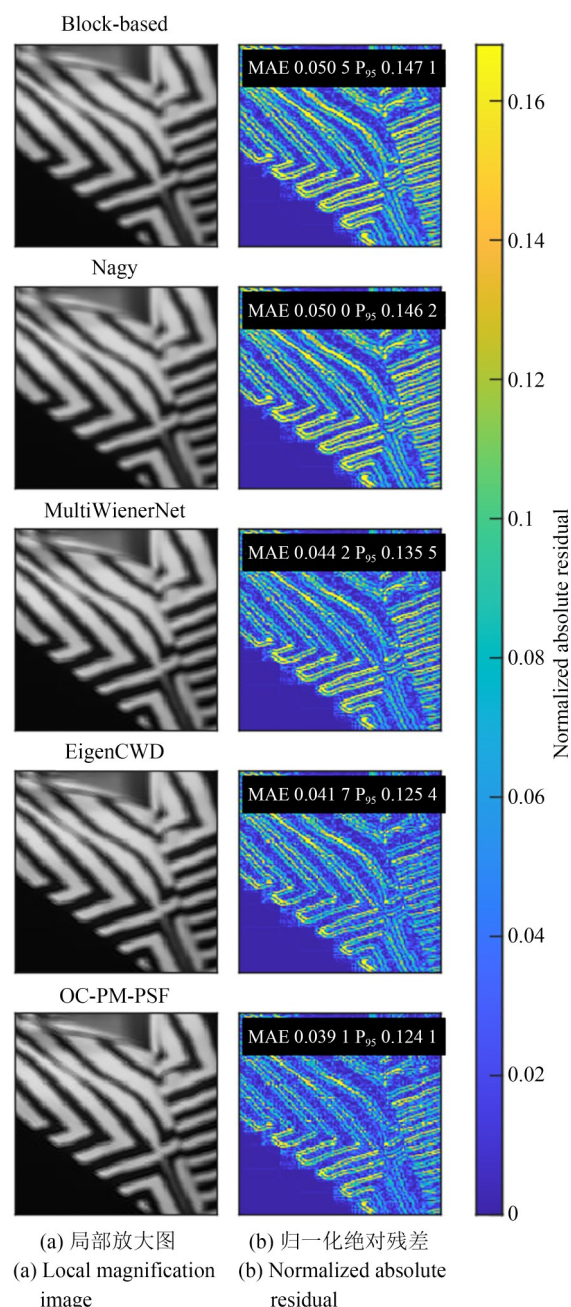


图 15 不同空变复原算法的局部放大结果与归一化绝对残差对比

Fig. 15 Comparison of enlarged local restoration results and normalized absolute residuals obtained by different spatially varying restoration algorithms

4.7 非同源 PSF 退化与 PSF 失配稳定性验证

为避免退化模型与复原模型完全一致导致的评价偏差,进一步开展非同源 PSF 退化验证实验。

由表 12 可知,在非同源 PSF 退化条件下,退化图像 PSNR 和 SSIM 分别为 22.38 dB 和 0.836。采用 OC-PM-PSF 模型复原后,PSNR 和 SSIM 分别提升至 29.56 dB 和 0.935。与同源 PSF 条件下 30.11 dB 和 0.940 的结果相比,非同源 PSF 条件下复原指标有所下降,说明 PSF 建模

表 12 非同源 PSF 退化条件下的复原结果

Tab. 12 Restoration results under non-identical PSF degradation conditions

实验条件	退化模型	复原模型	PSNR/dB	SSIM
退化图像	13×13 Zemax 宽谱 PSF 模型	—	22.38	0.836
同源 PSF 复原	7×7 采样 OC-PM-PSF 重构模型	7×7 采样 OC-PM-PSF 重构模型	30.11	0.940
非同源 PSF 复原	13×13 Zemax 宽谱 PSF 模型	7×7 采样 OC-PM-PSF 重构模型	29.56	0.935

误差会影响非盲复原性能。但该结果仍明显优于退化图像,并保持较高的结构相似性,表明所提方法在退化 PSF 与复原 PSF 不完全一致条件下仍具有较好的复原稳定性。

为进一步分析模型对 PSF 误差的敏感性,对退化 PSF 引入尺度扰动、空间位置扰动和光谱权重扰动,并在相同复原参数下进行对比。该实验用于评价 OC-PM-PSF 方法在有限 PSF 失配条件下的稳定性。

由图 16 可以看出,在 PSF 尺度、空间位置和光谱权重存在失配时,复原质量随失配程度增大而逐渐下降。其中,空间位置失配对复原质量影响最为明显,当位置失配达到 1 个采样间隔时,复原后 PSNR 和 SSIM 下降至 28.18 dB 和 0.913;PSF 尺度失配次之,当尺度扰动达到 10% 时,复原后 PSNR 和 SSIM 为 28.47 dB 和 0.918;光谱权重失配影响相对较弱,在 $\pm 10\%$ 光谱权重扰动下,复原后 PSNR 和 SSIM 仍可达到 29.17 dB 和 0.930。上述结果表明,所提 OC-PM-PSF 方法对有限 PSF 建模误差具有一定稳定性,但其复原性能仍依赖于 PSF 模型与实际退化过程之间的匹配程度。

5 结 论

本文面向星载小型可见光成像载荷的结构简化与空变复原需求,完成了折衍混合光学系统设计,并提出 OC-PM-PSF 建模方法。通过引入 Binary 2 衍射面,系统透镜数量由 6 片减至 4 片,最大通光口径由 19.130 mm 降至 13.998 mm,估算玻璃体积降低 62.3%。尽管系统总长增加 17.1%,在相同薄壁镜筒估算模型下,前端光机组件质量由 22.70 g 降至 14.78 g,降低 34.9%。因此,本文所述轻量化主要体现为镜片数量、径向包络、玻璃体积和估算组件质量降低,而非轴向长度缩短。

OC-PM-PSF 方法将视场位置、MTF 变化和 RMS 点斑半径变化以软约束形式引入多视场宽谱 PSF 主模态分解。采用 7×7 建模网格和 21 个主导模态后,宽谱未采样视场的平均和最大 PSF 相对重构误差分别为 4.98% 和 7.76%。在仿真条件下,RL-TV 复原使 PSNR 由 22.54 dB 提高至 30.11 dB,SSIM 由 0.840 提高至 0.940,并优于所采用的 4 种对比方法。

未采样视场、非同源退化及 PSF 失配实验表明,所提方法能够描述折衍混合系统的连续空变退化,并对有限模型误差保持一定稳定性。后续

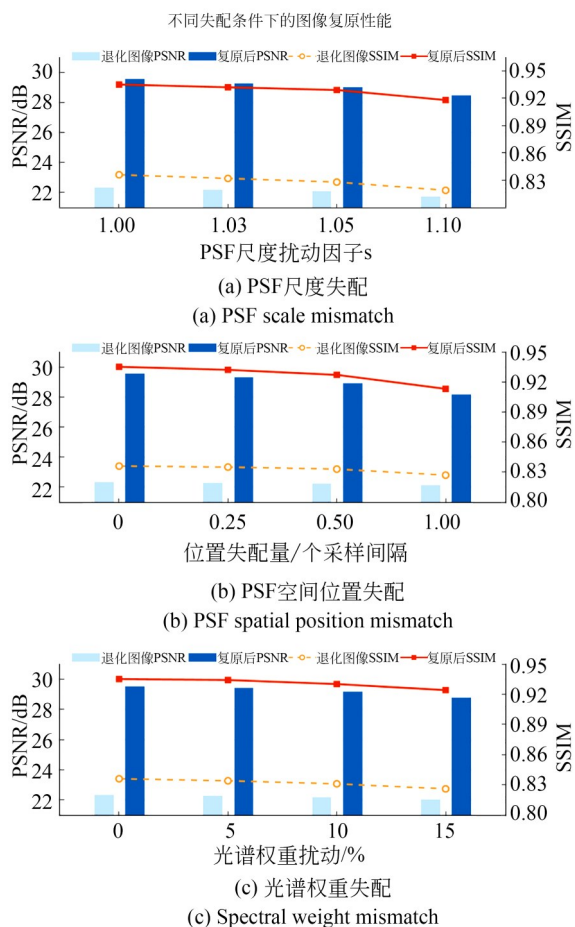


图 16 不同失配条件下的图像复原性能

Fig. 16 Image restoration performance under different mismatch conditions

工作将进一步结合真实样机图像、实测 PSF 及完整光机结构设计验证方法的工程适用性。

作者贡献声明:

苏盛明:论文构思与撰写,研究方案和系统设计,算法研究,仿真分析;

张昊苏:研究方案指导,关键技术问题分析,

论文审阅与修改;

上官爱红:研究思路指导,研究方案论证,论文审阅与修改;

王振宇:方案讨论与技术分析;

谢友金:研究方案论证与技术指导;

姜泳帆:仿真结果分析与论文修改;

王熹:数据整理和分析及论文校对。

参考文献:

- [1] STONE T, GEORGE N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(14): 2960.
- [2] NAKAI T, OGAWA H. Research on multi-layer diffractive optical elements and their application to camera lenses[J]. 2002: DMA2.
- [3] 徐娜,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 CH Y, WANG Y T, *et al.* Review of design methods of diffractive optical element [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 0822007. (in Chinese)
- [4] 杨洪涛,杨晓帆,梅超,等. 折衍混合红外双波段变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 20200036.
YANG H T, YANG X F, MEI CH, *et al.* Design of hybrid refractive-diffractive infrared dual-band zoom optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20200036. (in Chinese)
- [5] PENG Y F, FU Q, AMATA H, *et al.* Computational imaging using lightweight diffractive-refractive optics[J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 31393.
- [6] PENG Y F, FU Q, HEIDE F, *et al.* The diffractive achromat full spectrum computational imaging with diffractive optics [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(4): 1-11.
- [7] SITZMANN V, DIAMOND S, PENG Y F, *et al.* End-to-end optimization of optics and image processing for achromatic extended depth of field and super-resolution imaging [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2018, 37(4): 1-13.
- [8] LI Z L, HOU Q Y, WANG Z P, *et al.* End-to-end learned single lens design using fast differentiable ray tracing[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(21): 5453.
- [9] YANG X G, FU Q, HEIDRICH W. Curriculum learning for *ab initio* deep learned refractive optics [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 6572.
- [10] 左超,陈钱. 分辨率、超分辨率与空间带宽积拓展—从计算光学成像角度的一些思考[J]. 中国光学 (中英文), 2022, 15(6): 1105-1166.
ZUO CH, CHEN Q. Resolution, super-resolution and spatial bandwidth product expansion—some thoughts from the perspective of computational optical imaging [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(6): 1105-1166. (in Chinese)
- [11] 李江勇,吴晓琴,刘飞,等. 基于全局性优化的极筒光学系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2422004.
LI J Y, WU X Q, LIU F, *et al.* Design of minimalist optical system based on global optimization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2422004. (in Chinese)
- [12] 张楚骏,钟恒伟,赵晴,等. 基于改进遗传算法优化的大视角单透镜设计[J]. 光电工程, 2025, 52(11): 250083.
ZHANG CH J, ZHONG H W, ZHAO Q, *et al.* Design of WFOV single-lens based on improved genetic algorithm optimization[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2025, 52(11): 250083. (in Chinese)
- [13] 司亚中,李晨,杨帆. 基于一体化机制的对抗性沙尘图像复原算法[J]. 电光与控制, 2025, 32(12): 62-68.
SI Y ZH, LI CH, YANG F. An adversarial sand-dust image restoration algorithm based on integration mechanism[J]. *Electronics Optics & Control*, 2025, 32(12): 62-68. (in Chinese)
- [14] 何易德,朱斌,汤磊,等. 基于非局部先验红外运动模糊图像复原方法[J]. 激光技术, 2024, 48(4): 463-469.
HE Y D, ZHU B, TANG L, *et al.* A non-local prior of infrared motion blurred image restoration method[J]. *Laser Technology*, 2024, 48(4): 463-469. (in Chinese)
- [15] 郝建坤,黄玮,刘军,等. 空间变化 PSF 非盲去卷积图像复原法综述[J]. 中国光学, 2016(1): 41-50.
HAO J K, HUANG W, LIU J, *et al.* Review of non-blind deconvolution image restoration based on spatially-varying PSF [J]. *Chinese Optics*, 2016(1): 41-50. (in Chinese)

- [16] 杨航. 非盲图像复原综述[J]. 中国光学(中英文), 2022, 15(5): 954-972.
YANG H. Survey of non-blind image restoration[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 954-972. (in Chinese)
- [17] RICHARDSON W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, 62(1): 55.
- [18] LUCY L B. An iterative technique for the rectification of observed distributions[J]. *The Astronomical Journal*, 1974, 79: 745.
- [19] RUDIN L I, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1992, 60(1/2/3/4): 259-268.
- [20] DEY N, BLANC-FERAUD L, ZIMMER C, *et al.* Richardson-Lucy algorithm with total variation regularization for 3D confocal microscope deconvolution[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2006, 69(4): 260-266.
- [21] STARCK J L, PANTIN E, MURTAGH F. Deconvolution in astronomy: a review[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2002, 114(800): 1051-1069.
- [22] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [23] HERLOSKI R P, SEACHMAN N J, PRICE E E, *et al.* Double Gauss lens for a raster input scanner: US4863251[P]. 1989-09-05.
- [24] 刘一畅, 马伟, 徐士彪, 等. 基于卷积神经网络的边缘保真图像去噪算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32(11): 1822-1831.
- LIU Y CH, MA W, XU SH B, *et al.* Edge-fidelity image denoising based on convolutional neural network[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2020, 32(11): 1822-1831. (in Chinese)
- [25] 姚军财, 申静. 基于图像内容对比感知的图像质量客观评价[J]. 物理学报, 2020, 69(14): 281-296.
- YAO J C, SHEN J. Objective assessment of image quality based on image content contrast perception[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(14): 281-296. (in Chinese)
- [26] 陶小平, 冯华君, 雷华, 等. 一种空间变化 PSF 图像分块复原的拼接方法[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 648-653.
- TAO X P, FENG H J, LEI H, *et al.* A splicing method of sectioned restoration algorithm for images with space-variant point spread function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 648-653. (in Chinese)
- [27] NAGY J G, O'LEARY D P. Restoring images degraded by spatially variant blur[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1998, 19(4): 1063-1082.
- [28] YANNY K, MONAKHOVA K, SHUAI R W, *et al.* Deep learning for fast spatially varying deconvolution[J]. *Optica*, 2022, 9(1): 96.
- [29] YEO J, LOH N D, *et al.* EigenCWD: a spatially varying deconvolution algorithm for single metalens imaging[J]. *Optics Express*, 2025, 33(13): 28481.

作者简介:



苏盛明(2001—),男,安徽亳州人,硕士研究生,2023年于延边大学获得学士学位,主要从事光学设计和光学成像等方面的研究。E-mail: sushengming24@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



张昊苏(1985—),男,陕西西安人,博士,高级工程师,2020年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事空间光学结构设计力学仿真、高精度空间运动机构结构设计及力学仿真等方面的研究。E-mail: zhanghaosu@opt.ac.cn



上官爱红(1981—),女,河南三门峡人,博士,高级工程师,2019年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事空间光电载荷总体技术、激光传输与测量装置总体技术、空间载荷热控制技术等方面的研究。E-mail: xiner@opt.ac.cn