

文章编号 1004-924X(2019)07-1465-08

# 空间大口径衍射成像系统的图像 反演恢复与增强

乔 凯<sup>1</sup>, 智喜洋<sup>2\*</sup>, 江世凯<sup>2</sup>, 张 蕾<sup>1</sup>, 尹忠科<sup>3</sup>

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

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;

3. 北京遥感信息研究所, 北京 100192)

**摘要:**面向高轨监视领域对超大口径、轻量化的高分辨率光学载荷的迫切需求,提出了一种以衍射元件为主镜的空间大口径衍射成像系统图像反演恢复与增强方法。针对大口径光学系统像差和主镜衍射效应引起的模糊严重以及点扩散函数空间变化性大等降质问题,基于正则化理论框架和等晕区分块思想,提出了基于多正则化约束的衍射成像系统图像反演恢复方法,研究了多参量多约束模型的高效求解方法。针对衍射效率不足和非设计级次背景杂波引起的图像信噪比低和对比度下降严重的问题,结合小波阈值滤波与非线性变换,提出了自适应的衍射成像系统图像质量增强方法。最后进行了实验验证,实验结果表明:当空变等级达到了 3.0 时,恢复结果与原始图像的结构相似度在 0.8 以上,信噪比提升 10% 以上,信息保真度在 80% 以上。该方法在有效提升图像清晰度与对比度的同时,提高了图像的信噪比,对超大口径薄膜衍射成像系统的实际空间应用具有一定的理论研究意义和工程应用价值。

**关键词:**空间大口径衍射成像系统;衍射成像系统严重降质;反演恢复模型;图像质量增强

中图分类号:O434.1;TP391.41 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192707.1465

## Image inversion and quality enhancement for space large aperture diffractive imaging system

QIAO Kai<sup>1</sup>, ZHI Xi-yang<sup>2\*</sup>, JIANG Shi-kai<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, YIN Zhong-ke<sup>3</sup>

(1. *Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;*

2. *Research Center for Space Optical Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*

3. *Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: zhixiyang@hit.edu.cn*

**Abstract:** To address the urgent need for ultra-large aperture and lightweight high-resolution optical payloads in the field of high-orbit military monitoring, an image inversion and quality enhancement method was proposed for large-caliber diffractive imaging systems with diffractive optical elements used as the primary mirror. First, an image inversion model was established for the diffraction imaging system based on the regularization and iso-halo block theories. Here, the multi-regularization and

收稿日期:2018-12-20;修订日期:2019-01-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61605035)

multi-constraint algorithm was adopted for theoretical model optimization, and two bottleneck problems were in turn solved to a certain extent. One was the image blurring caused by both the large-caliber optical system aberration and the diffraction effect of the main mirror; the other was the large spatial variation of the point spread function. Nonlinear transformation and wavelet threshold filtering were then used to formulate a contrast enhancement method to address the low signal-to-noise ratio and low contrast problems that derive from low diffraction efficiency and non-design level sub-background clutter. Finally, experiments and a simulation were conducted to test the proposed method. Experimental results show that the structural similarity of degraded and original images exceeds 0.8, the Signal to Noise Ratio(SNR) is increased by 10% and fidelity is more than 80% with CLE of 3.0. The proposed method improves image quality, including image clarity and contrast as well as the suppression of noise and background radiation. The proposed method thus has great theoretical significance and engineering application value for the practical application of ultra-large aperture thin-film diffraction systems.

**Key words:** large aperture diffractive optical system; degradation of diffraction imaging quality; inversion recovery model; imaging quality enhancement

## 1 引言

随着高轨监视领域对空间分辨率需求的不断提高,空间光学载荷需要同时具有超大口径、轻量化、加工周期短、成本低等特点,传统的反射式或折射式光学系统已无法满足这些要求。薄膜反射镜是解决空间超大口径、超轻型载荷光学系统最有前景的技术途径之一,它采用超薄可控薄膜材料作为主镜材料,例如聚酰亚胺等,具有重量超轻、易于折叠/展开和成本低等优点。但薄膜反射镜易受环境、温度、压力等因素的影响,目前难以实现较高的面形精度,无法满足传统载荷成像的要求。

衍射光学成像技术具有克服这一局限的潜力。在薄膜上加工衍射光学结构,不仅能实现超大口径、超轻量化,而且利用衍射成像对主镜面形控制精度要求低的特点,还能增加薄膜衍射成像系统空间应用的可行性<sup>[1-4]</sup>。然而相比传统成像系统,衍射成像系统的图像质量退化更加严重,图像的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)较低,且不同视场的点扩散函数(Point Spread Function, PSF)空间变化性大,主镜衍射效率不足和非设计级次辐射能量所致的背景杂波还会严重降低图像的信噪比和对比度,较

难满足图像的应用需求<sup>[5-6]</sup>。因此,需要针对衍射成像系统图像质量的特殊退化特性,结合后续的图像处理来反演恢复原始景物信息。目前,国内在薄膜衍射成像技术方面仅处于概念设计、原理性研究阶段,关于其成像特性及图像处理方面的研究鲜有报道<sup>[7-10]</sup>。本文针对衍射成像系统的图像退化特性,以提升图像清晰度与对比度、提高图像信噪比、保持图像纹理细节为目标,开展多目标正则化约束的图像反演恢复方法以及图像对比度自适应增强方法的研究,并进行了实验验证。

## 2 衍射成像系统图像反演恢复模型与方法

立足于衍射成像系统的图像质量退化机理,无论是衍射元件主镜的面形形变还是衍射成像造成的图像质量退化均可由衍射效率和 PSF 的空间变化性得以反映<sup>[7]</sup>,因此建立衍射成像系统的图像质量退化模型为:

$$g(x, y, \omega_x, \omega_y) = ah(x, y, \omega_x, \omega_y) * f(x, y, \omega_x, \omega_y) + \beta + n, \quad (1)$$

式中: $\omega_x, \omega_y$  分别是  $x, y$  方向的视场角, $\alpha$  表示设计级次衍射效率,非设计级次背景杂波  $\beta=1-\alpha$ ,  $n$  为噪声。

由于背景杂波与噪声的存在,上述图像反演恢复过程存在较严重的病态性,很难直接从中获

取唯一、稳定的解。同时,考虑到衍射成像系统的图像反演恢复需要解决图像的 PSF 空变大、模糊严重、信噪比低等多目标问题,本文首先以贝叶斯先验为理论基础构造图像先验,基于正则化理论框架,构造融入多约束项的图像反演恢复模型,将图像反演恢复问题转化为求解最小化问题,即:

$$\min J(f) = \frac{\chi}{2} \|h * f - g\|^2 + \frac{1}{2} J_a(f), \quad (2)$$

式中:  $\|h * f - g\|^2$  为数据保真项,用于度量观测数据  $g$  与理想数据估计结果  $f$  之间的保真或拟合程度;  $J_a(f)$  是正则项,用于约束解的正则性;  $\chi$  为正则化参数,用于平衡保真项和正则项两者之间的关系。  $J_a(f)$  和  $\chi$  的引入将病态问题转换为良性问题<sup>[11-13]</sup>。为抑制噪声放大的同时保留图像的纹理细节,基于总变分思想构造相应的正则项:

$$J_a(f) = \int_{D_u} \varphi(|\nabla f|) dx dy, \quad (3)$$

式中:  $\nabla f$  表示图像梯度。在图像平滑区域,即  $|\nabla f|$  很小,应有较高的光滑程度。为此要求  $\varphi(t)$  满足:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\varphi'(t)}{2t} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\varphi''(t)}{2} = M, \quad (4)$$

其中  $M$  为大于 0 的常数。

另一方面,在纹理边缘附近  $|\nabla f|$  很大。为保留纹理边缘,要求在梯度方向不做平滑,而在与梯度正交的方向上仍平滑,为此要求  $\varphi(t)$  满足:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi''(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\varphi'(t)}{t} = c > 0, \quad (5)$$

然而,难以构造同时满足式(4)和式(5)的函数,所以适当降低式(5)的要求:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi''(t) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\varphi'(t)}{t} = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi''(t) / \left( \frac{\varphi'(t)}{t} \right) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

满足上述条件的正则项对解的平滑作用将决定局部梯度值,平滑作用是各向异性的,在与梯度垂直的方向上有大的平滑,而在梯度方向上的平滑作用较小。为了构造一个合理的正则项并适合于分析和数值求解,还应满足:

- (1)  $\varphi(t) \geq 0, \forall t$  并且  $\varphi(0) = 0$ ;
- (2)  $\varphi(t) = \varphi(-t)$ ;
- (3)  $\varphi(t)$  连续可微;
- (4)  $\varphi(t)/t$  连续且严格单调下降;
- (5)  $\varphi'(t) \geq 0, \forall t \geq 0$ 。

从而  $\varphi(t)$  的凸性和在无限远处的线性能保证  $J(f)$  的最小化问题在有界变差函数空间中解的存在性和唯一性,此时必存在一个严格凸且降的函数  $\psi: (0, M] \rightarrow [0, \beta)$  使得:

$$\varphi(t) = \inf_{0 < b \leq M} (bt^2 + \psi(b)), \quad (7)$$

$$\beta = \lim_{t \rightarrow +\infty} \left( \varphi(t) - t^2 \frac{\varphi'(t)}{2t} \right). \quad (8)$$

并且对于每个固定的  $t$ , 函数  $(bt^2 + \psi(b))$  有唯一的极小化子  $b_t$ :

$$b_t = \varphi'(t) / (2t). \quad (9)$$

本文选取  $\varphi(t) = 2 \sqrt{1+t^2} - 2$  以及对应的辅助函数  $\psi(b) = b + 1/b - 2$ , 构造一种新半二次规整化的代价函数:

$$\begin{aligned} J^*(f, b^x, b^y) = & \|HF - G\|^2 + \\ & \alpha \sum_k [b_k^x (\Delta_x f)_k^2 + \psi(b_k^x)] + \\ & \alpha \sum_k [b_k^y (\Delta_y f)_k^2 + \psi(b_k^y)], \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $(\Delta_x f)_{i,j} = (I_{i,j+1} - I_{i,j}) / \delta$ , 表示  $x$  方向的离散差分;  $(\Delta_y f)_{i,j} = (I_{i+1,j} - I_{i,j}) / \delta$ , 表示  $y$  方向的离散差分。

由于函数  $(bt^2 + \psi(b))$  存在唯一的极小化子  $b_t$ , 再根据  $\varphi(t)$  的性质可知, 当梯度大时,  $b_t$  趋于零; 而当梯度小时,  $b_t$  趋于  $M > 0$ , 那么  $b$  的值决定了是否存在边缘, 或者说能够标记边缘位置, 因此该目标方程能够在保持纹理细节的同时, 有效抑制噪声。

考虑到衍射成像系统大尺寸 PSF 的空间变化特性, 本文结合分块处理思想<sup>[14-15]</sup>, 将图像分成若干近似具有空不变特性的区域, 首先利用式(10)对各子块进行反演恢复, 然后对相邻图像块的重叠区域进行像素灰度值渐变融合, 以改善边界灰度的不连续性, 经拼接后即可得到图像反演恢复结果。对固定的  $b^x$  和  $b^y$ ,  $J^*(f, b^x, b^y)$  关于  $f$  是二次的, 且对固定的  $f$ ,  $J^*$  关于  $b^x$  和  $b^y$  是凸的。采用确定性的交替最小化求解方法如下:

Start

For  $n = 0$  to stop rule

Step1 对于给定的  $F_n$ , 计算最小化子  $b_{n+1}^x$  和  $b_{n+1}^y$ :

$$\begin{cases} (b_{n+1}^x)_k = \frac{\varphi'((\Delta_x f_n)_k)}{2(\Delta_x f_n)_k} \\ (b_{n+1}^y)_k = \frac{\varphi'((\Delta_y f_n)_k)}{2(\Delta_y f_n)_k} \end{cases}, \forall k. \quad (11)$$

Step2 对于给定的  $b_{n+1}^x$  和  $b_{n+1}^y$ , 利用共轭梯度法迭代求解  $f$ , 法方程为:

$$(H^T H - \alpha C_{n+1}) F_{n+1} = H^T G, \quad (12)$$

式中:

$$\begin{cases} C_{n+1} = -\Delta_x^T B_{n+1}^x \Delta_x - \Delta_y^T B_{n+1}^y \Delta_y \\ B_{n+1}^x = \text{diag}\{(b_{n+1}^x)_k\} \\ B_{n+1}^y = \text{diag}\{(b_{n+1}^y)_k\} \end{cases}. \quad (13)$$

Step3 判断收敛

End

### 3 衍射成像系统图像质量增强方法

为更有效地解决由于衍射效率和背景杂波所致的图像“雾状感”模糊, 动态范围偏小, 低端灰度值偏高, 图像的灰度层次不够丰富等问题, 本文采用基于灰度累计分布的非线性变换法对图像的动态范围进行展宽, 并研究基于图像特性的自适应对比度增强方法。灰度累计分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) 定义为:

$$T(\omega) = \frac{1}{N} \int_0^\omega N(\omega) d\omega, \quad (14)$$

式中:  $N(\omega)$  表示灰度大小等于  $\omega$  的像素点数量,  $N$  为总像素数量。

在累积分布函数中寻找  $T$  值为 0.1% 和 99.9% (此数值可根据实际要求适当调整) 所对应的灰度值  $\omega_m$  和  $\omega_M$ , 并分别变换到最小和最大灰度值附近。

此外, 为保证图像亮度适中, 图像均值应处于灰度动态范围中央位置, 如图 1 所示, 为同时满足以上条件, 选取非线性变换函数:

$$f(\omega) = a\omega^2 + b\omega + c, \quad (15)$$

式中  $a, b, c$  为待定系数。进而得到方程组:

$$\begin{cases} f(\omega_m) = a\omega_m^2 + b\omega_m + c = 0 \\ f(\omega_z) = a\omega_z^2 + b\omega_z + c = \eta \frac{W}{2} + (1-\eta)\omega_z, \\ f(\omega_M) = a\omega_M^2 + b\omega_M + c = W \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\omega_z$  为图像灰度均值;  $\eta \in [0, 1]$ , 为亮度权重参数。利用式 (14) 可以确定待定系数:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_m^2 & \omega_m & 1 \\ \omega_z^2 & \omega_z & 1 \\ \omega_M^2 & \omega_M & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \eta W/2 + (1-\eta)\omega_z \\ W \end{bmatrix}. \quad (17)$$

从而得到  $f(\omega)$  的具体表达形式, 然后进行灰度变换即可实现图像自适应对比度增强。

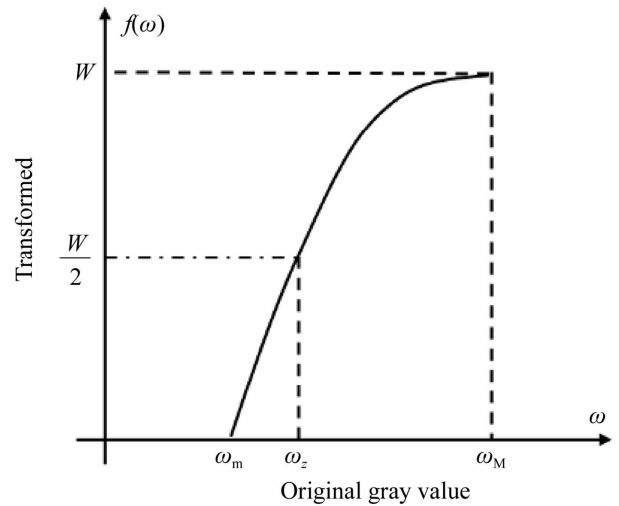


图 1 灰度变换函数曲线示意图

Fig. 1 Sketch of gray transform function curve

针对灰度非线性变换易产生噪声放大的问题, 本文将灰度非线性变换和小波阈值滤波<sup>[16]</sup>相结合, 通过对低频和低频小波系数分别进行非线性变换和阈值滤波处理, 实现图像自适应对比度增强。

根据衍射成像系统图像的对比度退化特性, 构造高斯型阈值函数:

$$F(\omega) = \omega \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\omega^2}{Th^2}\right) \right], \quad (18)$$

式中  $Th$  为滤波阈值。综合考虑图像信息特征、噪声特性以及小波分解尺度, 选取阈值为:

$$Th = 2^j \sqrt{\ln(L_j)} \frac{\sigma_n^2}{\sigma_x}, \quad (19)$$

式中:  $L_j$  和  $\sigma_x$  分别是待处理图像的小波变换结果的  $j$  尺度子带长度和标准差;  $\sigma_n^2$  为噪声方差。

如图 2 所示,该方法能够在增强图像对比度 的同时,有效抑制噪声的放大。

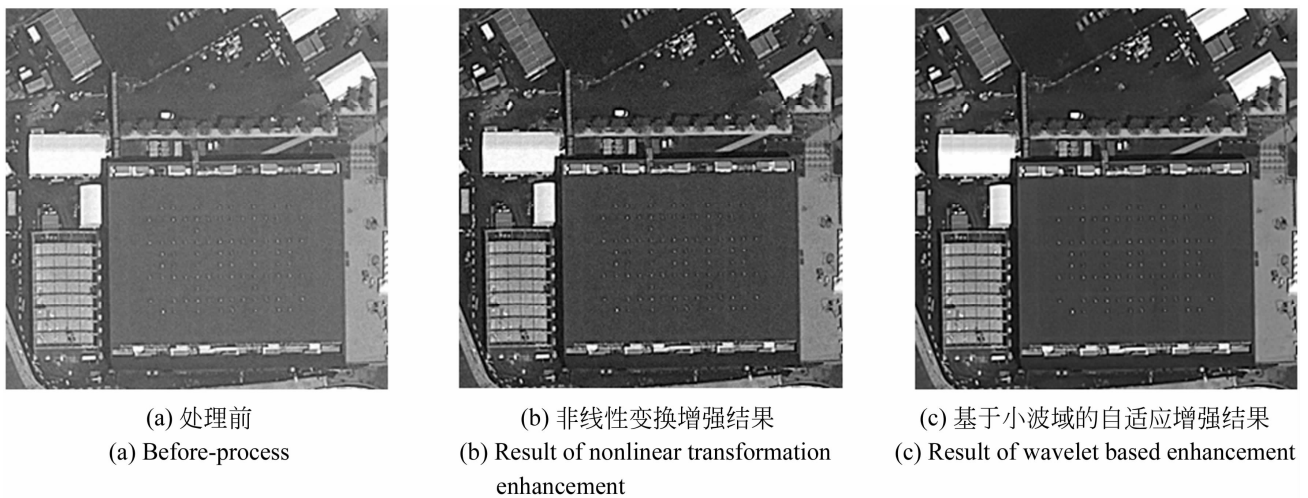


图 2 图像对比度增强处理前后的结果

Fig. 2 Contrast of images with pre- and post-processing

### 4 实 验

为验证本文提出方法的空变处理、噪声放大抑制、纹理边缘保持以及对比度增强等处理能力,本文结合特征靶标与光学遥感图像数据进行了实验验证。首先利用靶标图像验证方法的有效性与

空变处理能力。原始靶标与衍射光学成像后的空变降级图像如图 3(a)和 3(b)所示,可以看出图像质量随视场的变化明显。图 3(c)和 3(d)分别为利用经典复原方法和本文方法处理后的结果,从图可见,本文方法能够从整体上提高图像质量,有效避免中心视场的过处理与边缘视场的欠处理问题,更好地解决空变问题。

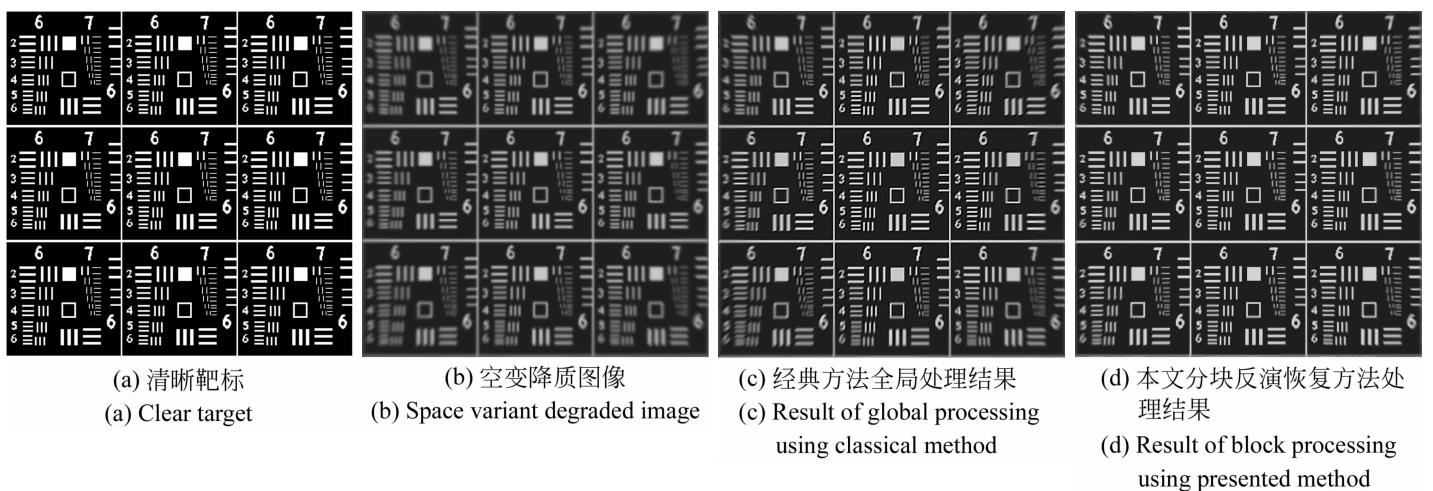


图 3 分块处理与全局处理结果比较

Fig. 3 Contrast of block and global processing methods

然后利用光学遥感图像数据,进一步分析本文提出方法在对比度增强、纹理细节保持及噪声抑制等方面的综合处理能力。图像不同视场 MTF 的差异可表征衍射成像系统的空间变化性,定义空变等级为:

$$CLE = \frac{\iint |MTF_{cen} - MTF_{bor}| dx dy}{\iint MTF_{bor} dx dy}, \quad (20)$$

式中: $MTF_{cen}$ 和  $MTF_{bor}$  分别表示中心视场与边缘视场的传递函数。

以美国 MOIRE 项目 55% 衍射效率<sup>[17]</sup> 为依

据,结合式(1)所示的退化模型与文献[7]所述的衍射成像系统图像仿真方法,获取一系列不同空变等级的仿真退化图像,并采用本文方法进行处理,然后选取图像信噪比、结构相似度、信息保真度、清晰度和纹理对比度等指标客观评价处理前后的图像<sup>[18]</sup>。

图 5 给出了其中一组原始图像和不同空变等级的仿真退化图像,图 5(b)~5(d)的中心视场具有相同的传递函数。显然,空变等级越高,边缘视场处的图像质量越差,各图像中心视场和边缘视场的 MTF 曲线如图 4 所示。

图 6 和表 1 分别给出图像反演恢复、对比度增强结果及处理前后的图像质量评价结果。由图 6 可知:本文提出的方法能够在提高图像清晰度和纹理细节的同时,有效抑制噪声。

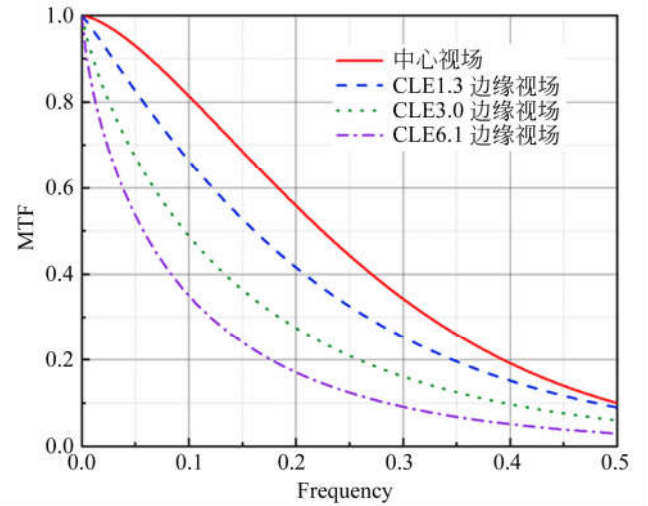
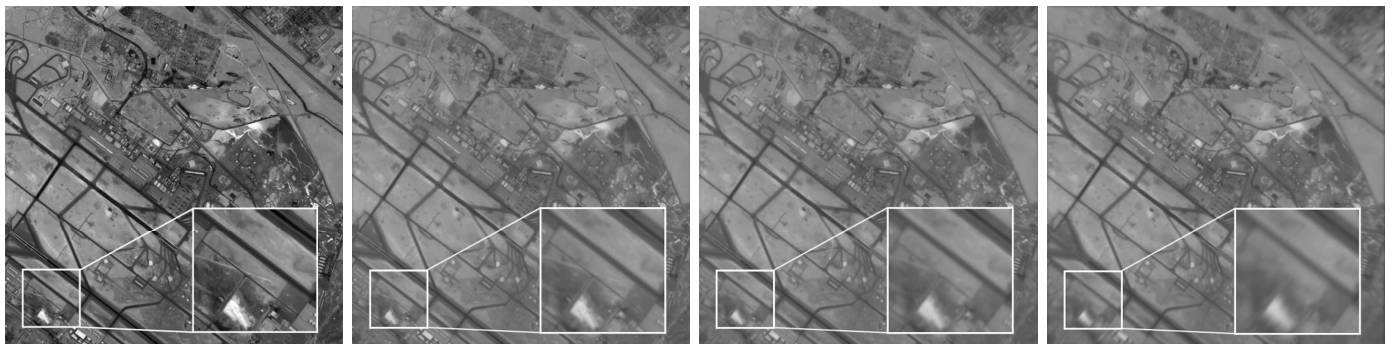


图 4 各退化图像中心视场和边缘视场的 MTF 示意图  
Fig. 4 MTFs of central and edge view fields of degraded images



(a) 未退化图像 (阿联酋某机场) (a) Original image (an airport in the U.A.E)  
(b) 1.3 级空变退化图像 (b) CLE1.3 degraded image  
(c) 3.0 级空变退化图像 (c) CLE3.0 degraded image  
(d) 6.1 级空变退化图像 (d) CLE6.1 degraded image

图 5 原始图像和不同空变等级退化图像  
Fig. 5 Original image and degraded images with different CLEs

表 1 图像质量客观评价结果

Tab. 1 Results of image quality assessment

—		SNR	SSIM	信息保真度	清晰度	纹理对比度
未退化图像		—	1	1	0.346 0	2.542 4
1.3 级空变	退化图像	22.974 8	0.705 0	0.508 0	0.183 2	0.505 0
	反演恢复结果	25.193 9	0.824 2	0.712 2	0.196 2	0.985 2
	对比度增强	26.723 0	0.931 9	0.893 4	0.339 9	2.501 9
3.0 级空变	退化图像	22.403 4	0.657 1	0.445 3	0.181 0	0.435 6
	反演恢复结果	24.648 1	0.802 5	0.668 2	0.195 3	0.921 8
	对比度增强	24.498 4	0.915 8	0.823 0	0.338 5	2.345 6
6.1 级空变	退化图像	21.196 2	0.518 8	0.331 1	0.176 5	0.328 7
	反演恢复结果	22.992 0	0.654 3	0.513 0	0.192 1	0.750 7
	对比度增强	19.791 4	0.715 9	0.617 6	0.333 2	1.906 8

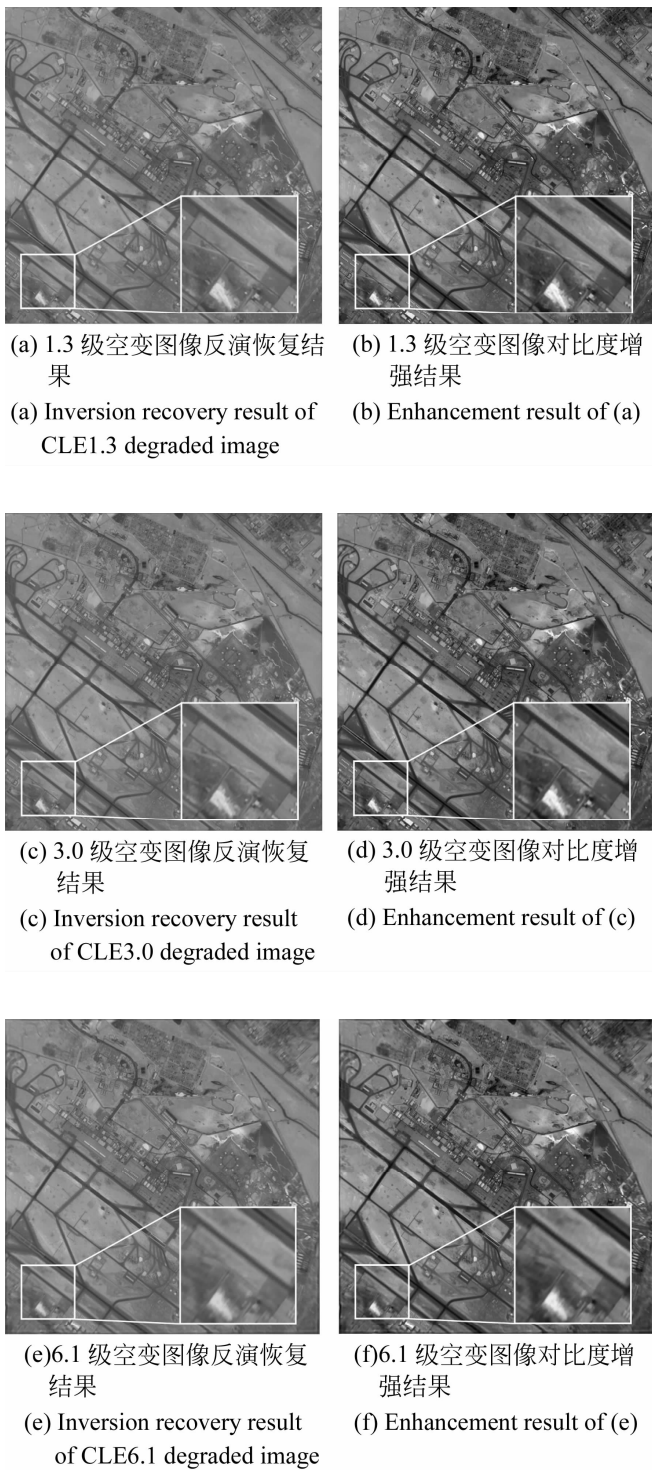


图 6 不同空变等级退化图像反演恢复和对比度增强结果

Fig. 6 Inversion recovery and enhancement results of degraded images with different CLEs

## 参考文献:

- [1] HYDE R A, DIXIT S N, WEISBERG A H, *et al.*. Eyeglass: a very large aperture diffractive space telescope[J]. *SPIE*, 2002, 4849: 28-39.
- [2] TANDY W, ATCHESON P, DOMBER J, *et al.*. MOIRE gossamer space telescope - structural chal-

由表 1 可知:经反演恢复后,图像的信噪比、结构相似度以及信息保真度等指标均得到了显著提高,当空变等级达到 3.0 时,恢复结果与原始图像的结构相似度可达到 0.8 以上,且信噪比提升 10% 以上,同时能够有效抑制噪声放大;对比度增强处理则能够有效剔除背景杂波,提高图像的清晰度与对比度,当空变等级达到 3.0 时,增强处理结果的结构相似度可达 90% 以上,同时图像信息保真度达到 80% 以上。但当空变等级过高(超过 6 级)时,将超出反演恢复与增强方法的适用范围,后续研究将结合实测数据开展处理算法的应用边界分析与验证,从而为空间大口径衍射成像系统设计提供依据。

## 5 结 论

本文面向大口径衍射成像系统的空间应用问题,提出了一种衍射成像系统图像反演恢复与增强方法。首先结合衍射成像系统退化特性,基于贝叶斯理论构造图像先验与正则化约束项,建立多目标图像反演恢复模型,并利用共轭梯度法解决了多参量多约束模型的求解难题。同时结合等晕区分块思想和相邻图像块渐变融合拼接法,提出了图像反演恢复方法;并结合灰度非线性变换与小波域高斯阈值滤波,提出了图像自适应对比度增强方法;最后对方法的有效性与处理能力进行了实验验证。实验结果表明:本文方法能够提高图像的清晰度、对比度和信噪比,并保持纹理细节。该方法可直接应用于解决大口径衍射成像系统的图像质量退化问题,并为薄膜衍射成像系统的优化设计提供支持。

lenges and solutions[C]. *Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located Conferences*, AIAA, 2012.

- [3] ATCHESON P D, STEWART C, DOMBER J, *et al.*. MOIRE: initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight

- optical telescopes[J]. *SPIE*, 2012, 8442; 844221.
- [4] LIU T. Development of space-based diffraction imaging system and related technologies[J]. *Space International*, 2014(8): 46-52.
- [5] ATCHESON P, DOMBER J, WHITEAKER K, *et al.*. MOIRE - ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope[J]. *SPIE*, 2014, 9143; 91431W.
- [6] ASMOLOVA O, ANDERSEN G, DEARBORN M E, *et al.*. Optical testing of a membrane diffractive optic for space-based solar imaging [J]. *SPIE*, 2014, 9006; 90060D.
- [7] ZHI X Y, JIANG SH K, ZHANG W, *et al.*. Image degradation characteristics and restoration based on regularization for diffractive imaging[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 86; 226-238.
- [8] ZHANG SH Q, WANG Y Q, ZHI X Y. A novel design of membrane mirror with small deformation and imaging performance analysis in infrared system[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 82; 170-177.
- [9] ZHANG J, LI M J, YIN G H, *et al.*. Large-diameter membrane Fresnel diffraction elements for space telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1289-1296.
- [10] ZHENG Y H, RUAN P, CAO SH. Deployable structure design and analysis for space membrane diffractive telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0118004.
- [11] HE W, ZHANG H Y, ZHANG L P, *et al.*. Total-variation-regularized low-rank matrix factorization for hyperspectral image restoration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(1): 178-188.
- [12] JIDESH P, SHIVARAMA H K. Non-local total variation regularization models for image restoration[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2018, 67; 114-133.
- [13] REN D W, ZUO W M, ZHANG D, *et al.*. Simultaneous fidelity and regularization learning for image restoration[J]. arXiv: 1804.04522, 2018.
- [14] HAO J K, HUANG W, LIU J, *et al.*. Review of non-blind deconvolution image restoration based on spatially-varying PSF[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2016, 9(1): 41-50.
- [15] LA CAMERA A, SCHREIBER L, DIOLAITI E, *et al.*. A method for space-variant deblurring with application to adaptive optics imaging in astronomy [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, 579;1-11.
- [16] LI H D, LI Q. Wavelet denoising based on technique of threshold[J]. *Computer Technology and Development*, 2009, 19(7): 56-58.
- [17] DOMBER J L, ATCHESON P, KOMMERS J. MOIRE: ground test bed results for a large membrane telescope[C]. *Proceedings of Spacecraft Structures Conference*, AIAA, 2014; 13-17.
- [18] WANG Z M. Review of no-reference image quality assessment[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(6): 1062-1079.

#### 作者简介:



乔 凯(1981—),男,山西祁县人,助理研究员,2005年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光学遥感卫星论证、设计等方面的研究。E-mail: qk\_lucky@sohu.com

#### 通讯作者:



智喜洋(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,2012年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事光学遥感信息获取与处理技术、空间目标探测识别等方面的研究。E-mail: zhixiyang@hit.edu.cn