

# 面向高轨目标的强度相干成像方法改进研究

高 昕 李希宇 唐 嘉 陆长明

北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

**摘要** 利用强度相干方法对高轨目标成像时存在着频谱模值测量信噪比低和相位恢复复杂等问题,严重影响成像质量。为获得高轨目标的清晰图像,根据高轨卫星空间频谱分布先验信息、图像分布先验信息和强度相干测量噪声分布特点,探讨了利用先验信息对强度相干成像的频谱模值估计方法和相位恢复方法进行改进与优化,并设计了室内实验验证了改进算法的有效性。室内实验表明,通过对频谱模值估计方法和相位恢复算法的改进能够显著提高强度相干成像质量,减小恢复结果中的噪声斑点与歧义图像。

**关键词** 成像系统; 强度相干成像; 相位恢复; 先验信息; 极大似然估计; 空间频谱

中图分类号 O438.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0611002

## Ameliorated Method of Intensity Correlation Imaging Towards High-Orbit Satellites

Gao Xin Li Xiyu Tang Jia Lu Changming

Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

**Abstract** In the process of high-orbit target imaging with intensity correlation method, the low detecting signal to noise ratio and inaccurate phase retrieval algorithm seriously affect the imaging quality. To realize the high-orbit target imaging clearly, the amelioration and optimization of estimation method to spatial spectral modulus and phase retrieval is discussed according to the priori information of spatial spectral distribution of high-orbit satellite, priori information of satellite images and noise distribution characteristics of intensity correlation imaging method, indoor experiment is designed to verify the validation of algorithm. Laboratory experiments indicate that the imaging quality is significantly improved as well as the ambiguous images and noise speckle reduced with improvements and optimization of estimation method of spatial spectral modulus and phase retrieval algorithm.

**Key words** imaging systems; intensity correlation imaging; phase retrieval algorithm; priori information; maximum likelihood estimation; spatial spectrum

**OCIS codes** 110.3175; 030.6610; 070.1675

## 1 引 言

对目标的高分辨力成像是空间目标识别的重要手段<sup>[1]</sup>。然而受大气湍流和望远镜衍射极限限制,利用现有地基望远镜难以获得中高轨目标的清晰成像。而干涉成像方法可在不增大光学系统口径的前提下获得较高的成像分辨力,目前针对中高轨卫星的干涉成像方法主要有振幅干涉成像<sup>[2]</sup>、傅里叶望远镜成像<sup>[3]</sup>和强度相干成像<sup>[4]</sup>。其中强度相干成像方法通过测量目标光强涨落的相干性获得目标图像的空间频谱模值,结合相位恢复方法获得目标图像。此方法具有成像分辨力高、设备精度要求低和对大气湍流不敏感等优点<sup>[5]</sup>,在中高轨目标成像领域具有较大发展前景。

由于大多数高轨目标的亮度较低且角直径较大,目标图像形状复杂,利用现有强度相干方法对高轨目标成像时存在着频谱模值测量信噪比低、相位恢复困难<sup>[6]</sup>等问题,严重影响了恢复图像质量。为提高强度相

收稿日期: 2014-11-18; 修返日期: 2015-01-13

基金项目: 国家863高技术研究发展计划(2011AA8080110)

作者简介: 高 昕(1973-),男,博士,博士生导师,主要从事飞行器光学测控设备、高轨目标成像等方面的研究。

E-mail: gaixin526@sina.com

干方法对高轨目标的成像质量,本文根据高轨目标先验信息和强度相干成像噪声分布特点,对强度相干成像的频谱模值估计方法和相位恢复算法进行了优化,以提高对高轨目标的成像质量。

## 2 强度相干成像方法

### 2.1 强度相干成像原理

强度相干成像原理如图1所示,不同空间位置的集光面将待观测目标的光集中到焦点位置,利用窄带滤光片对光谱宽度进行限制后,使用高频探测器对目标的光强涨落进行采集并转化为相应的光电流,利用模拟乘法器计算不同位置光强涨落相干度<sup>[7]</sup>。根据中心极限定理可知,接收光场大致服从于复数高斯分布<sup>[8]</sup>,根据高斯定理可知,目标光强涨落的相干度可表示为

$$\langle I_A(t)I_B(t) \rangle = \langle E_A(t)E_A^*(t)E_B(t)E_B^*(t) \rangle = \langle E_A(t)E_A^*(t) \rangle \langle E_B(t)E_B^*(t) \rangle + \langle E_A(t)E_B^*(t) \rangle \langle E_B(t)E_A^*(t) \rangle = \langle I_A(t) \rangle \langle I_B(t) \rangle [1 + |\gamma_{AB}(t)|^2], \quad (1)$$

式中  $\gamma_{AB}$  表示目标光场空间相干度,  $I_A(t)$ 、 $I_B(t)$  分别为探测器 A、B 上接收的光强涨落,  $\langle \cdot \rangle$  表示在时间域内的均值。根据 Van Citter-Zernike 定理可知,非相干光源的光场空间相干度  $\gamma_{AB}$  与目标光强分布图像  $I(\xi, \eta)$  的相应空间频谱成正比:

$$\gamma(\Delta x; \Delta y) = \frac{\exp(-j\phi) \iint I(\xi, \eta) \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda z}(\Delta x\xi + \Delta y\eta)\right] d\xi d\eta}{\iint I(\xi, \eta) d\xi d\eta}. \quad (2)$$

而根据(1)式可知,高轨目标的光场空间相干度可通过不同基线的光强涨落相干度获得:

$$|\gamma_{AB}| = \sqrt{\frac{\langle \Delta I_A \Delta I_B \rangle}{\langle I_A \rangle \langle I_B \rangle}}, \quad (3)$$

式中  $\Delta I_A$ 、 $\Delta I_B$  分别为 A、B 处光强涨落的交流部分。利用强度相干阵列对目标光强涨落进行采集后,经过相关运算即可获得目标的多个空间频谱模值。结合相位恢复算法获得目标空间频谱相位,即可恢复获得高轨目标的光强分布图像  $I(\xi, \eta)$ 。空间频谱相位恢复方法详见参考文献[9-11]。

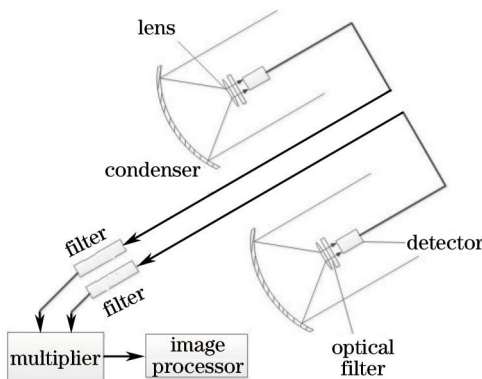


图1 强度相干成像原理示意图

Fig.1 Principle diagram of intensity correlation imaging

### 2.2 高轨目标成像问题

强度相干成像方法起初主要应用于恒星角直径测量与恒星成像领域<sup>[12]</sup>,成像分辨力最高可达到毫角秒量级,近年来正在探索利用强度相干方法对中高轨卫星成像。然而由于中高轨卫星亮度较低,强度相干阵列在单个采样周期内接收到的光子数较少,探测器输出光电流中含有较大的散粒噪声<sup>[13]</sup>,严重影响强度相干成像的探测信噪比。因此在对高轨目标成像过程中,通常采用地基激光对目标进行主动照明,并使用大口径的低精度集光面对目标光强涨落进行接收。而在成像过程中,过大的集光面会使得探测光强涨落不完全相干,在测量结果中引入部分相干测量误差<sup>[14]</sup>。为保证测量精度,需使用较小的集光面对光强涨落进行采集,集光面面积需满足:  $A < \lambda^2/\Omega$ , 其中  $A$  为集光面积,  $\lambda$  为探测波长,  $\Omega$  为目标立体角。

同时,由于高轨目标图像的形状与恒星目标相比较为复杂,空间频谱的高频分量较为丰富。而强度相干成像时中高频段的空间频谱模值测量信噪比较低<sup>[15]</sup>,根据测得空间频谱模值对高轨目标的频谱相位进行

恢复时会产生较大的恢复噪声,因此仍需对现有相位恢复方法进行改进,降低恢复图像对空间频谱模值测量噪声的敏感度,并结合高轨目标的图像先验信息,提高恢复图像质量。

### 3 基于先验信息的强度相干成像方法改进

由于高轨目标亮度较低、角直径大且图像形状复杂,利用现有强度相干成像方法难以获得目标的清晰图像。与恒星目标相比,高轨卫星图像的先验信息较多,根据目标的先验信息和强度相干成像噪声分布特点,对空间频谱模值估计方法和相位恢复方法进行改进,以提高成像质量。

#### 3.1 频谱模值估计方法

高轨目标亮度较低,强度相干阵列中的高频探测器上单位时间内获得的光子数较少,输出光电流中散粒噪声是影响强度相干成像质量的主要因素。由于不同光强探测器输出的散粒噪声相互独立,在计算光强涨落相干度时,探测散粒噪声不会影响测得频谱模值的数学期望,仅会在测量结果中引入零均值高斯噪声,目标频谱模值的测量结果可表示为

$$|\gamma|_{\text{mea}}^2 = |\gamma|^2 + N(0, \sigma^2). \quad (4)$$

测量噪声的标准差的大小可表示为

$$\sigma = A\alpha\eta\Delta\nu\sqrt{2\Delta f/T}, \quad (5)$$

式中  $A$  为强度相干阵列集光面积,  $\alpha$  为探测器量子效率,  $\eta$  为目标单位光谱宽度内的光子数,  $N(0, \sigma^2)$  为标准差为  $\sigma$  的高斯噪声,  $|\gamma|$  为光场空间相干度,  $\Delta\nu$  为目标光谱宽度,  $\Delta f$  为探测器响应带宽。为提高对高轨卫星的强度相干探测信噪比,可采用冗余基线阵列对目标单一空间频谱进行多次测量<sup>[16]</sup>,通过矩估计方法降低频谱模值测量噪声。然而此方法需使用较多的高频探测器对目标进行观测,极大的增加了观测设备复杂度。

而根据强度相干成像原理可知,目标空间功率谱  $|\gamma|^2$  恒为正值,且仅在零频位置取得最大值。对于高轨目标而言,目标空间频谱模值  $|\gamma|$  的大小近似与测量基线长度的  $-3/2$  次方成正比<sup>[17]</sup>,目标空间频谱模值的包络线可近似表示为

$$|\gamma(Bk_0\Phi_{\text{obj}})_{\text{max}}| = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.74/\pi)(B|k_0\Phi_{\text{obj}})|^3}}, \quad (6)$$

式中  $k_0$  为探测光场波数,  $B$  为探测基线长度,  $\Phi_{\text{obj}}$  为目标角直径大小。图2模拟了观测波长为 632 nm 时 1 m 直径的地球同步轨道(GEO)卫星空间频谱分布规律,蓝色实线和红色点线为两个高轨卫星在不同观测基线上的频谱模值,黑色虚线为根据频谱模值包络线(6)式获得的频谱模值估计上限。由图2可知:强度相干成像中可根据目标角直径、测量波长和测量基线长度大致确定目标空间频谱模值取值上限  $\gamma_{\text{max}}$ 。而受测量高斯噪声的影响,利用强度相干方法测得的目标功率谱  $|\gamma|_{\text{mea}}^2$  的取值满足功率谱先验限制条件:  $0 \leq |\gamma| \leq |\gamma|_{\text{max}}$ 。为提高强度相干成像中频谱模值估计精度,需利用频谱模值先验信息对测量结果进行约束。

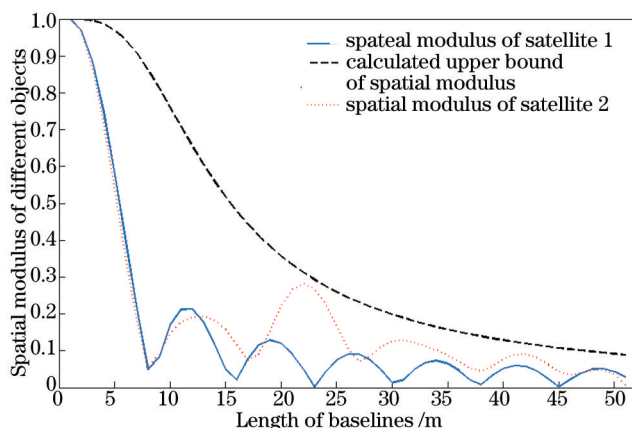


图2 高轨卫星空间频谱模值分布规律

Fig.2 Distribution rule of high-orbit satellite spatial frequency spectrum modulus

在对频谱模值估计方法优化时,假设目标空间功率谱  $|\gamma|^2$  在 0 到  $|\gamma|_{\max}^2$  区间内取值概率相同,当测得结果为  $|\gamma|_{\text{mea}}^2$  时,通过极大似然方法估计获得目标空间功率谱,目标空间功率谱估计值  $|\gamma|_{\text{estab}}^2$  可表示为

$$|\gamma|_{\text{estab}}^2 = \begin{cases} 0 & , \quad |\gamma|_{\text{mea}}^2 < 0 \\ |\gamma|_{\text{mea}}^2 & , \quad 0 \leq |\gamma|_{\text{mea}}^2 \leq |\gamma|_{\max}^2 \\ |\gamma|_{\max}^2 & , \quad |\gamma|_{\text{mea}}^2 > |\gamma|_{\max}^2 \end{cases} \quad (7)$$

当目标空间功率谱上限估计较为准确时,利用该方法能够在较大程度上减小目标空间频谱模值估计方差。

### 3.2 频谱相位恢复方法

由(5)式可知,强度相干探测噪声分布与测量结果无关,探测信噪比与目标空间功率谱  $|\gamma|^2$  成正比。在对中高轨目标成像时,目标中高频段的空频谱模值探测信噪比较低,利用现有迭代傅里叶变换(IFT)算法恢复获得的目标图像质量较差。在此根据高轨目标形状先验信息和频谱模值测量信噪比分布特点,对现有相位恢复算法进行改进,以提高频谱相位和目标图像恢复质量。

在相位恢复中,现有 IFT 算法可在数学上等效成有边界限制条件的多维函数优化问题<sup>[18]</sup>:

$$x^* = \text{arc min} \{ |\text{DFT}[x(m,n)]| - |X(u,v)| \}^2, \text{ s.t. } \begin{cases} x(m,n) \geq 0, x \subset S \\ x(m,n) = 0, x \notin S \end{cases} \quad (8)$$

式中 DFT 为离散傅里叶变换,  $x(m,n)$  为恢复获得的图像,  $|X(x,y)|$  为测得目标空间频谱模值,  $S$  为目标图像空间限制条件。然而空间目标的高频空间频谱信噪比较低,利用该算法恢复获得的目标图像易产生对空频谱模值噪声过拟合现象,严重降低恢复图像质量。同时,在求解多维函数(8)式中极小值过程中,求解结果易陷于目标函数的局部极小值中,导致相位恢复过程停滞。

为克服原有相位恢复方法的缺点,根据相位恢复模型,对目标函数和极小值求解过程进行改进以提高成像质量。根据强度相干成像噪声分布特点和高轨目标图像的先验信息,将相位恢复方法的目标函数设定为

$$J_k = \{W(u,v)[|X_k(u,v)| - |X_0(u,v)|]\}^2 + \eta \left\{ \frac{x_k(m,n) + \delta}{x_{\text{prior}}(m,n) + \delta} - 1 \right\}^2, \text{ s.t. } x(m,n) \geq 0, \quad (9)$$

式中  $W(u,v)$  为噪声权重函数,  $|X_0(u,v)|$  为测得空间频谱模值,  $|X_k(u,v)|$  为待恢复图像  $x_k(m,n)$  的空间频谱模值,  $x_{\text{prior}}(m,n)$  为目标先验图像,  $\delta$  为修正小量。其中噪声权重函数可减小低信噪比测量结果对恢复图像的影响,目标函数的先验信息正则项使得恢复图像趋近于目标的真实图像,降低出现歧义图像的概率。

若能在边界条件内求解获得(9)式的全局最小值,则理论上可恢复获得噪声较小的目标图像。然而目标函数维度极高,在空间限制条件下,目标函数(9)式存在较多的局部极小值。利用现有最优化方法难以获得目标函数的全局最小值,探讨利用迭代算法求解目标函数的全局最小值,以提高求解速度和恢复图像质量,迭代求解过程为

1) 根据测得空间频谱模值和目标图像先验信息对目标函数进行修正后,求解获得目标函数(9)式在各维度上的导数:

$$\frac{\partial J}{\partial x_k(m,n)} = 2 \cdot \text{real}(y - y_1) + \frac{2\eta[x_k(m,n) + \delta]}{[x_{\text{prior}}(m,n) + \delta]^2}, \quad (10)$$

式中  $y = \text{IFFT}[W^2(u,v)X_k(u,v)]$ ,  $y_1 = \text{IFFT}[W^2(u,v)\frac{|X_0(u,v)|}{|X_k(u,v)|}X_k(u,v)]$ , IFFT 为傅里叶逆变换。

2) 令恢复图像  $x_k(m,n)$  沿导数方向移动至此方向上的目标函数极小值,获得新恢复图像  $x'_k(m,n)$ 。

$$x'_k(m,n) = x_k(m,n) - \alpha \frac{\partial J}{\partial x_k(m,n)}. \quad (11)$$

3) 对于目标函数(9)式,利用快速下降方法获得的新恢复图像  $x'_k(m,n)$  不再符合目标图像的空间限制条件,需对相位恢复结果  $x'_k(m,n)$  进行修正。为防止相位恢复过程中恢复图像出现对测量噪声的过拟合,根据目标先验图像对相位恢复结果进行修正:



$$x_{k+1}(m,n) = \begin{cases} x'_k(m,n), & x'_k(m,n) \geq 0 \text{ and } |x'_k - x_{\text{prior}}| \leq \varepsilon x_{\text{prior}}, \\ \kappa[x_k(m,n) - \beta x'_k(m,n)], & \text{others} \end{cases}, \quad (12)$$

式中  $\beta$  为修正参数,通常设定为 0.9,  $\kappa$  为小于 1 的实数,  $\varepsilon$  为估计误差限制条件。将以上修正后的相位恢复结果  $x_{k+1}(m,n)$  带入(9)式中进行迭代运算,多次迭代后即可获得较高质量的目标图像。

#### 4 实验验证

为提高中高轨卫星的强度相干成像质量,根据空间目标先验信息和测量噪声分布特点对强度相干方法进行改进。由于现阶段尚不具备对高轨目标的强度相干成像条件,因此进行了室内模拟实验,对改进的强度相干方法的有效性进行了验证。利用强度相干方法对高轨目标成像时,需采用多个高频探测器采集目标光强涨落,观测设备较为复杂。采用赝热光源和电荷耦合器件(CCD)代替自然光源和高频探测器来模拟强度相干成像过程,利用该方法获得的测量数据噪声分布与实际强度相干成像方法近似,实验系统如图 3 所示。

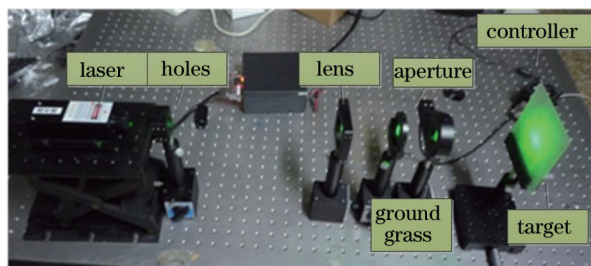


图 3 强度相干成像室内实验示意图

Fig.3 Indoor experimental schematic diagram of intensity correlation imaging

激光通过透镜和光阑后准直为平面波,经旋转的毛玻璃片调制获得赝热光,利用赝热光对透射目标进行照射,使用 CCD 阵列在 1.5 m 外采集透射目标的光强涨落,计算不同像素上光强涨落的相干度即可获得目标的含噪声空间频谱模值,利用改进后的空间频谱模值估计算法和相位恢复算法对测量数据进行处理,验证算法的可行性。

1) 验证频谱模值估计算法的有效性。设强度相干方法的测量噪声是均值为 0、方差为 1 的高斯噪声。根据频谱模值先验信息将功率谱边界限制条件约束在 0~1 之间,利用极大似然方法对频谱模值进行估计,当目标空间功率谱取值在 0~1 之间变化时,估计方差的大小如图 4 所示。

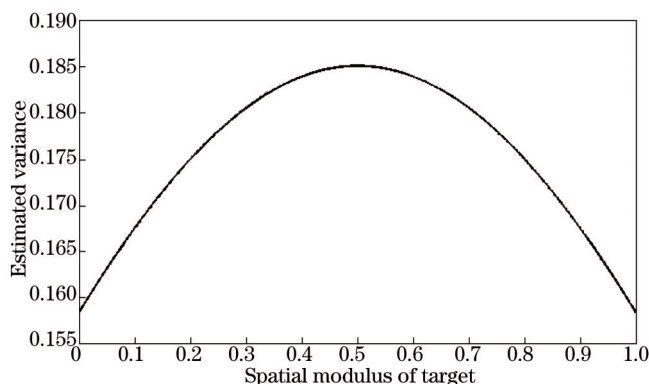


图 4 改进后相位恢复算法的估计方差

Fig.4 Estimated variance of improved phase retrieval algorithm

由图 4 可知,利用有边界限制的极大似然方法获得的频谱模值估计方差均小于 1,且其真实值越接近于边界限制条件,频谱模值估计方差越小,频谱模值信噪比提高效果越明显。若能根据目标空间频谱分布先验信息对空间功率谱上边界进行更精确的估计,则可更大程度上降低测量结果估计方差。利用强度相干实验平台对 1.5 m 外的 3 mm 目标进行观测,根据空间频谱模值分布先验信息(6)式获得空间频谱上边界,并利用极大似然方法对目标空间功率谱  $|\gamma|^2$  进行估计,获得目标修正频谱模值。利用现有 IFT 算法恢复获得的

目标图像如图 5 所示。从恢复结果可知,利用先验信息对频谱模值取值边界进行限制后,采用极大似然估计方法能够提高频谱模值估计精度,获得更高质量的目标图像。

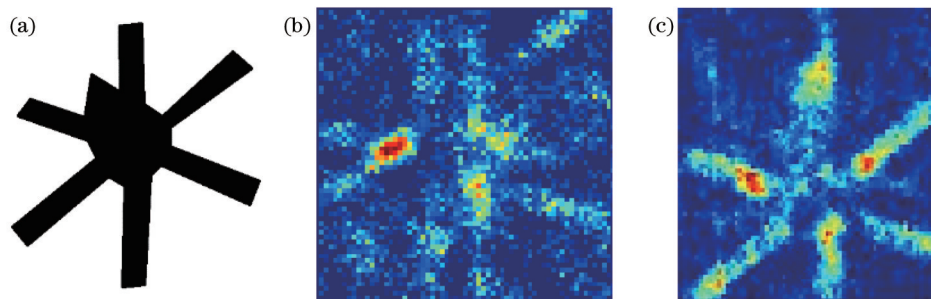


图 5 空间频谱模值估计方法改进结果。(a) 原始图像; (b) 原始数据恢复图像; (c) 改进频谱估计方法恢复图像

Fig.5 Improved result of improved spatial frequency spectrum modulus establish method. (a) Original image; (b) reconstituted image of original data; (c) reconstituted image of improved spectrum establish method

2) 将验证先验信息迭代(PII)相位恢复算法的有效性,在本次相位恢复过程中,目标光强分布先验图像选用洛伦兹光强分布模型:

$$x_{\text{prior}}(m, n) \propto \frac{1}{1 + 2m^2 + n^2/\omega^2}, \quad (13)$$

式中  $\omega$  为目标角直径,误差权重函数设定为  $|X_0(u, v)|^2$ ,图 6(a)为利用 PII 算法对目标测量频谱模值进行相位恢复获得的目标图像,图 6 (b)为利用 PII 算法和优化频谱模值估计算法恢复获得的目标图像。

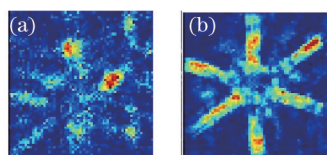


图 6 相位恢复算法改进结果。(a) 测量数据恢复图像; (b) 修正后数据恢复图像

Fig.6 Result of improved phase retrieval algorithm. (a) Reconstituted image of measured data; (b) reconstituted image of modified data

通过对比图 5(b)与图 6(a)、图 5(c)与图 6(b)可知,PII 算法较原有 IFT 算法能够更好的对含噪声频谱模值进行相位恢复,获得更好的目标图像。

图 7 为利用强度相干成像方法对图 7(a)目标的成像结果示意图,图 7(b)为利用原有强度相干成像方法获得的目标,图 7(c)为利用优化频谱模值估计算法和 PII 相位恢复算法获得的目标图像。从成像结果可知,改进的强度相干成像方法能够提高低测量信噪比条件下的成像质量,在面向高轨目标的强度相干成像领域具有一定应用前景。

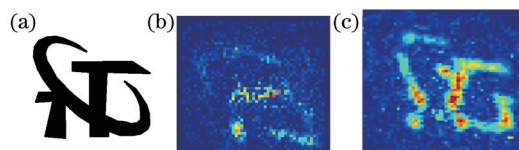


图 7 改进的强度相干成像方法。(a) 原始图像; (b)改进前图像; (c)改进后图像

Fig.7 Improved intensity correlation imaging method. (a) Original image; (b) image before improve; (c) image after improve

## 5 结 论

强度相干成像方法能够利用低精度光学设备实现对远距离目标的高分辨率成像,然而在高轨目标成像过程中存在着空间频谱模值测量信噪比低、相位恢复复杂等问题,难以获得目标的清晰图像。根据高轨目标的先验信息和强度相干测量噪声分布特点,对强度相干成像中的空间频谱模值估计方法和相位恢复方法进行改进,提高了强度相干成像质量,并进行室内实验对算法的有效性进行了验证。实验结果表明,有先验信息的极大似然估计方法能够显著减小空间频谱模值估计噪声,配合改进后的相位恢复算法能够显著提高强度相干方法对暗弱目标的成像质量。

本文算法仅对强度相干成像的数据处理方面进行了改进以提高强度相干成像质量,为进一步提高强度相干方法对高轨目标的成像质量,后续将针对激光主动照明、符合计数方法、高阶相干相位测量等新型强度相干成像方法进行研究,从而达到利用强度相干方法对高轨卫星成像的目的

## 参 考 文 献

- 1 Zhou Chao, Yang Hongbo, Wu Xiaoxia, *et al.*. Structural analysis of ground-based large telescopes[J]. Optics and Precision Engineering, 2011(01): 138-145.  
周 超, 杨洪波, 吴小霞, 等. 地基大口径望远镜结构的性能分析[J]. 光学精密工程, 2011(01): 138-145.
- 2 Peng Renjun, Wu Jian, Yang Chunping, *et al.*. Synthesizing aperture in optics with interferometric imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(3): 355-359.  
彭仁军, 吴 健, 杨春平, 等. 用干涉法实现光学合成孔径技术[J]. 光学学报, 2002, 22(3): 355-359.
- 3 Yu Shuhai, Wang Jianli, Dong Lei, *et al.*. Numerical simulation of Fourier telescoping based on non-uniform sampling[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0811001.  
于树海, 王建立, 董 磊, 等. 非均匀采样的傅里叶望远镜数值模拟研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0811001.
- 4 Nuñez P D, Holmes R, Kieda D, *et al.*. High angular resolution imaging with stellar intensity interferometry using air Cherenkov telescope arrays[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, 419(1): 172-183.
- 5 Bates R. Contributions to the theory of intensity interferometry[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1969, 142: 413.
- 6 Liang Li, Yang Ling, Wang Zhongke, *et al.*. Two-dimensional phase retrieval based on TIE and accelerate angular spectrum iteration algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 021002.  
梁 丽, 杨 玲, 王中科, 等. 基于TIE和加速角谱迭代算法的二维相位恢复[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 021002.
- 7 Goodman J W. Statistical Optics[M]. New York: Wiley-Interscience, 1985.
- 8 Chen Mingliang, Li Enrong, Wang Hui, *et al.*. Ghost imaging based on sparse array pseudothermal light system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0503001.  
陈明亮, 李恩荣, 王 慧, 等. 基于稀疏阵赝热光系统的强度关联成像研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0503001
- 9 Zhuo Jingyi, Kong Lingjiang, Zhou Jianhua, *et al.*. An iteration-based phase retrieval algorithm in liquid-crystal phase array[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0505001.  
卓静一, 孔令讲, 周建华, 等. 一种液晶相控阵中基于迭代的相位恢复算法[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0505001.
- 10 Guizar-Sicairos M, Fienup J R. Understanding the twin-image problem in phase retrieval[J]. J Opt Soc Am A, 2012, 29(11): 2367-2375.
- 11 Etchepareborda P, Bianchetti A, Vadnjal A L, *et al.*. Simplified phase-recovery method in temporal speckle pattern interferometry[J]. Appl Opt, 2014, 53(30): 7120.
- 12 Fried D L, Riker J, Agrawal B. Signal-to-noise ratio limitations for intensity correlation imaging[J]. J Opt Soc Am A, 2014, 31(7): 1536-1546.
- 13 Strekalov D V, Erkmen B I, Yu N. Intensity interferometry for observation of dark objects[J]. Physical Review A, 2013, 88(5): 53837.
- 14 Strekalov D V, Kulikov I, Yu N. Imaging dark objects with intensity interferometry[J]. Opt Express, 2014, 22(10): 12339-12348.
- 15 Rou J, Nu N Ez P D, Kieda D, *et al.*. Monte Carlo simulation of stellar intensity interferometry[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 430(4): 3187-3195.
- 16 Dravins D, LeBohec S, Jensen H, *et al.*. Optical intensity interferometry with the Cherenkov Telescope Array[J]. Astroparticle Physics, 2013, 43: 331-347.
- 17 Holmes R, Calef B, Gerwe D, *et al.*. Cramer-Rao bounds for intensity interferometry measurements[J]. Appl Opt, 2013, 52(21): 5235.
- 18 Fienup J R. Phase retrieval algorithms: A comparison[J]. Appl Opt, 1982, 21(15): 2758-2769.

栏目编辑: 苏 岑