

# 对迭代位移叠加像复原方法的改进

金振宇 刘 忠 邱耀辉

(中国科学院国家天文台云南天文台, 云南 昆明 650011)

**摘要** 迭代位移叠加法(ISA)是一种天文高分辨空域统计重建方法,对双星等多点源天文目标的空域统计重建试验表明,多点源目标的重建效果优于经典的重谱法,计算速度也比重谱法快。该方法不能直接应用于太阳或卫星等天文和空间扩展目标的高分辨重建中,因此对迭代位移叠加法进行修正后进行了不同光子水平下的人造卫星的高分辨重建的数值仿真试验。对暗弱扩展目标的仿真重建试验表明,修正的迭代位移叠加法具有明显的抑制光子噪声的效果,具有比重谱法等频域重建方法更好的重建效果。

**关键词** 图像处理; 迭代位移叠加法; 扩展目标; 数值仿真

**中图分类号** P123 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092905.1205

## Improvement of Iterative Shift-and-Add Image Reconstruction Method

Jin Zhenyu Liu Zhong Qiu Yaohui

(Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650011, China)

**Abstract** Iterative shift-and-add technique(ISA) refers one of the space domain statistical reconstruction methods. The experiments of the space domain statistical reconstruction, of which objective is the multipoint-source objective such as binary star, show that the effect of ISA is better than the speckle masking and also its speed is faster than the speckle masking. ISA cannot be directly used to the high-resolution reconstruction of astronomical and space extended objective such as the sun or satellites so that this article discusses the possibilities of applying ISA to extended objective reconstruction by modification and carries out numerical simulation experiments of high resolution reconstruction of satellites under different photon noises. The simulation experiments show the improved ISA can silence photon noise and for the faint expanding objective reconstruction it has better reconstruction effect than frequency reconstruction method such as speckle masking.

**Key words** image processing; iterative shift-and-add technique; extended object; numerical simulation

## 1 引 言

由于地球湍流大气的影响,地基天文望远镜的长曝光像的空间分辨率仅仅取决于大气视宁度参数  $r_0$  (Fried 参数)<sup>[1]</sup>,在良好视宁度条件下,  $r_0$  的平均值约为 10 cm,长曝光像的分辨率只有 1 角秒(1")左右。当曝光时间小于大气相干时间<sup>[1]</sup>(通常约为 10 ms)时,将使大气湍流“冻结”,得到的图像是呈散斑状的“斑点图”。在等晕假设条件下,目标的瞬时斑点图应满足线性空不变卷积成像公式

$$i(x, y) = o(x, y) \otimes h(x, y), \quad (1)$$

式中  $i(x, y)$  是瞬时斑点图,  $o(x, y)$  为目标的强度分

布,  $h(x, y)$  是大气-望远镜综合系统的瞬时点扩展函数,  $x$  和  $y$  分别是二维空间坐标变量,  $\otimes$  是卷积运算符。统计高分辨重建技术是指,拍摄一系列短曝光像,对短曝光像进行某种统计,从统计结果中重建目标高分辨像或高分辨信息的技术。目前主要有两类统计高分辨重建技术,一类是频域统计重建法,如斑点干涉术<sup>[2]</sup>、Knox-Thompson 法<sup>[3]</sup>和重谱法(Speckle masking)<sup>[4, 5]</sup>等;另一类是空域统计重建法,如简单位移叠加法(SAA 法)<sup>[6]</sup>和迭代位移叠加法(ISA 法)<sup>[7, 8]</sup>等。频域统计重建方法比较成熟,目前已经成功应用于双星<sup>[9]</sup>等多点源天文目标和太阳<sup>[10]</sup>以及卫星<sup>[11]</sup>等扩展目标的高分辨重建中。但

收稿日期: 2008-05-28; 收到修改稿日期: 2008-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(10778636, 10573035)资助项目。

作者简介: 金振宇(1974—),男,博士,副研究员,主要从事天文技术与方法方面的研究。E-mail: kim@ynao.ac.cn

是频域统计重建方法有算法复杂、计算速度比较慢和不能有效抑制噪声等缺点,而迭代位移叠加法与频域统计重建方法相比具有计算速度快和有效抑制噪声等优点<sup>[12]</sup>。

扩展目标是统计高分辨重建技术的重要应用领域,重谱法、Knox-Thompson法和斑点干涉术等频域统计重建方法已经成功应用于太阳<sup>[10]</sup>、人造卫星<sup>[11]</sup>等扩展目标的高分辨重建中,国内也对频域重建方法在扩展目标的高分辨重建方面<sup>[13]</sup>进行了深入的研究。迭代位移叠加法在双星等多点源目标的高分辨重建中获得了成功,但是目前还未能成功应用于扩展目标的高分辨重建中。为了迭代位移叠加法能够被成功应用于扩展目标高分辨重建中,需要解决以下两个问题:首先是初始估计值的选择会影响迭代算法的收敛性;其次是由于扩展目标的高频信息明显弱于低频信息,不能利用相关方法准确寻找目标强度最大衍射像。在本文中讨论如何通过修正迭代位移叠加法来解决上述两个问题,使迭代位移叠加法能够成功地应用于扩展目标的高分辨重建中。在此基础上本文对数值仿真获得的有限光子条件下的卫星的目标斑点图分别进行了迭代位移叠加法和重谱法的高分辨重建实验,对重建效果进行了比较。

## 2 迭代位移叠加法原理

由刘忠和邱耀辉等人提出的迭代位移叠加法(ISA法)<sup>[7,8]</sup>是一种空域统计重建技术,目前已成功的应用于双星和三星等多点源天文目标的高分辨重建中。该技术的原理<sup>[8]</sup>是,每一幅斑点图中都存在目标的最强衍射像,以最强目标衍射像为基准对目标斑点图进行位移叠加,从其统计结果中可以重建目标的高分辨信息。由于最强目标衍射像是大气-望远镜综合系统的瞬时点扩展函数的最大值与目标卷积的结果,最强目标衍射像的偏移量由大气-望远镜综合系统的瞬时点扩展函数的位置所决定。

以最强目标衍射像的位置进行位移叠加的统计结果为

$$\overline{i(x,y)} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k(x-x_{mk}, y-y_{mk}) = o(x,y) * \left( \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N h_k(x-x_{mk}, y-y_{mk}) \right), \quad (2)$$

式中  $k$  表示第  $k$  时刻,  $x_{mk}$  与  $y_{mk}$  分别是第  $k$  时刻目标斑点图的最强目标衍射像的偏移量。由于最强目标衍射像是大气-望远镜综合系统的瞬时点扩展函

数的强度最大值与目标的卷积,上式中的  $\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N h_k(x-x_{mk}, y-y_{mk})$  相当于单星的简单位移叠加的结果。由 Hunt<sup>[10]</sup>等人对单星简单位移叠加结果的分析可知(2)式所示的统计结果具有目标的望远镜衍射受限分辨率信息,因此通过解卷积从统计结果可以重建目标的高分辨像。迭代位移叠加法是试图以相关的方法寻找最强目标衍射像的偏移量,即以目标某种估计值与斑点图进行相关,则其相关函数是

$$\Gamma_{o'_i}(x,y) = i_k(x,y) \otimes o'(x,y) = h_k(x,y) * [o(x,y) \otimes o'(x,y)], \quad (3)$$

式中  $\Gamma_{o'_i}(x,y)$  是相关函数,  $o'(x,y)$  目标的某种估计值,“ $\otimes$ ”是相关运算符。(3)式表明相关函数  $\Gamma_{o'_i}(x,y)$  是目标与目标估计值的相关与大气-望远镜系统瞬时点扩展函数  $h_k(x,y)$  的卷积结果。以  $\Gamma_{o'_i}(x,y)$  极大值点为基准对目标斑点图进行叠加,得到的统计结果中利用解卷积方法获得目标的重建像。由于选用的目标初始信息自身必有的误差使相关函数的极大值位置与最强目标衍射像的偏移量存在偏差,所以要通过迭代减少相关函数极大值位置与最强目标衍射像的偏移量的偏差,使目标重建像逐步逼近目标衍射极限像。对双星和三星等天文点源目标的重建试验<sup>[14]</sup>表明,当重建多点源目标时,如果选择目标的自相关像为初始估计值,则经过多次迭代,重建像会收敛到目标衍射极限像。

迭代位移叠加法与重谱法相比具有计算速度快、有效抑制附加噪声<sup>[13]</sup>的特点,对多点源目标的重建试验表明了这一点。

## 3 扩展目标高分辨重建的修正方法原理

迭代位移叠加法在多点源目标的重建中获得了成功,但是还未能应用于扩展目标的高分辨重建中。迭代位移叠加法对扩展目标进行重建主要有以下几个难点:(1) 扩展目标的大多数细节一般叠加在一个强度较大但空间频率较低的背景上,因此所需要的高频信息的细节部分的信噪比较低;(2) 扩展目标的重建范围受限于线性空不变区域的有效范围大小,通常重建范围超过湍流大气导致的等晕区;(3) 往往不易找到可以合适的当作统计点扩展函数的参考单点源目标。限于篇幅本文中不讨论等晕区与参考点光源的问题,将着重讨论如何解决细节部分信噪比差影

响扩展目标的迭代位移叠加法重建的问题。

迭代位移叠加法重建目标时,主要影响重建效果的因素是用相关方法估计的最强目标衍射像的偏移量与真实的最强目标衍射像的偏移量之间存在的偏差。为了讨论方便,首先将相关方法估计的最强目标衍射像的偏移量与真实的最强目标衍射像的偏移量之间的偏差定义为“最强目标衍射像偏移量估计误差”。

为了了解当目标是扩展目标时“最强目标衍射像偏移量估计误差”对迭代位移叠加法重建效果的影响,进行了下面的模拟试验。对如图 1 所示的卫星图像和对应的 2000 幅模拟的卫星斑点图,统计了当目标估计值为卫星本身时“最强目标衍射像偏移量估计误差”的误差分布。另外比较了此时真实的迭代位移叠加法的统计传递函数与理想迭代位移叠加法的统计传递函数(具体的目标斑点图的模拟方法将在下一节中介绍)。其试验结果如图 2 所示,图 2(a)是“最强目标衍射像偏移量估计误差”的误差分布曲线,图 2(b)是真实统计传递函数与理想统计传递函数的比较。显然当目标为扩展目标时迭代位移叠加法的“最强目标衍射像偏移量估计误差”比较大,并且真实统计传递函数的高频信息明显弱于理想统计传递函数。出现这种现象的主要原因极有可能是由于扩展目标存在一个强度较大但空间频率较低的背景。如果由于目标的低频信息过强导致“最

强目标衍射像偏移量估计误差”比较大,则比较简单的思路是对相关函数(3)式进行高通滤波,抑制相关函数的低频信息来达到减少“最强目标衍射像偏移量估计误差”的目的。但是另外一方面需要注意,当目标斑点图有噪声时高通滤波放大的噪声的高频也会影响“最强目标衍射像偏移量估计误差”,使其变大。因此如何构造高通滤波器是重建成功与否的关键。

当目标为扩展目标时其目标估计值通常也会是比较接近目标本身的扩展目标,显然也会具有低频信息比较强,高频信息比较弱的频谱特征。如果从相关函数(3)中退卷积目标估计值的模,由于上述扩展目标的频谱特征,可以在一定程度上抑制相关函数的低频信息,也不会过分放大噪声的高频部分,其具体相关方法的修正为

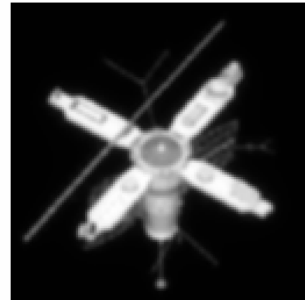


图 1 模拟的卫星衍射极限像

Fig. 1 Diffraction limited image of simulation satellite

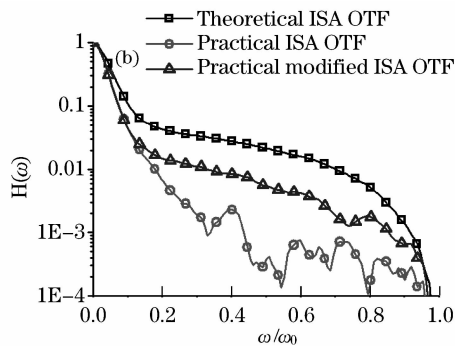
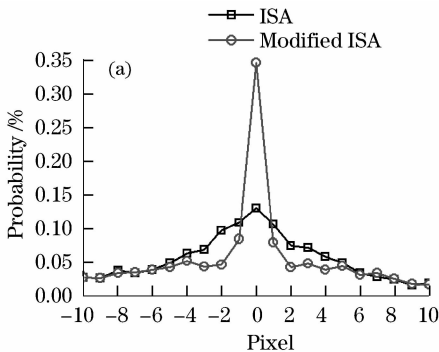


图 2 (a) 偏移量估计误差分布; (b) ISA 统计传递函数

Fig. 2 (a) Distribution of off set prediction error; (b) ISA transfer function

$$\Gamma_{o'_{ik}}(x,y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ I_k(u,v) \times \frac{O'^*(u,v)}{|O'(u,v)|} \right\}, \quad (4)$$

式中  $I_k(u,v)$  是第  $k$  幅斑点图  $i_k(x,y)$  的傅里叶变换,  $O'^*(u,v)$  是目标估计值  $o'(x,y)$  的傅里叶变换的共轭,  $|O'(u,v)|$  是目标估计值  $o'(x,y)$  的模,  $\mathcal{F}^{-1}$  表示傅里叶逆变换。对该修正方法也进行了模拟试验,其误差分布曲线由图 2(a) 给出,该方法的真实统计传递函数由图 2(b) 给出。显然经过这种修正

明显减少了“最强目标衍射像偏移量估计误差”,同时该方法的真实统计传递函数的高频部分虽然弱于迭代位移叠加法的理想统计传递函数,但明显强于迭代位移叠加法的真实统计传递函数。

除了相关方法进行修正以外,还需要修正目标初始估计值的寻找方法。扩展目标重建时我们认为对少量斑点图(几十幅左右)以重谱法重建的结果作为初始目标估计值是比较好的选择。

#### 4 扩展目标的高分辨重建试验

为了验证重建效果,进行了有限光子的斑点图的迭代位移叠加法和重谱法的仿真重建试验,仿真包含了大气随机相位屏的数值模拟、光子噪声的模拟和 CCD 附加噪声的模拟等部分。

卫星是一种比较典型的扩展面源,本文的仿真试验中所采用的目标是模拟的卫星,图 1 所示的是模拟卫星的衍射极限像。其具体参数为:观测中心波长是 550 nm,准单色光;观测望远镜的口径是 1 m;等效焦距是 65 m;CCD 的像素的尺寸是 16  $\mu\text{m}$ ;图 1 有 128 pixel $\times$ 128 pixel,相当于视场是 6.5'' $\times$ 6.5''。

在本文的仿真试验中都假设目标在等晕区内,因此目标的瞬时斑点图应满足线性空不变卷积成像

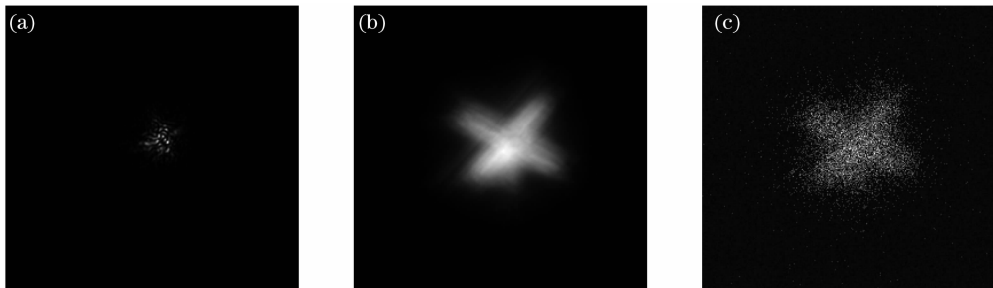


图 3 大气-望远镜瞬时点扩展函数与目标斑点图的模拟。(a) 大气-望远镜瞬时点扩展函数;  
(b) 理想卫星斑点图;(c) 有噪声的卫星斑点图

Fig. 3 Simulation of atmosphere-telescope instantaneous PSF and objective speckle image. (a) Atmosphere telescope instantaneous PSF; (b) theoretical satellite speckle image; (c) satellite speckle image with noise

目标斑点图中主要的噪声有有限光子的光子涨落引起的光子噪声和 CCD 读出噪声,这两种噪声都服从泊松分布。在 CCD 每个像素上的光子涨落的模拟方法是,计算出每个像素上的平均光子数后以此平均值生成符合泊松分布的每个像素上的光子数。假设一幅斑点图中的平均光子数是  $N_P$ ,则每个像素上的平均光子数是

$$\bar{\eta}(x, y) = \frac{i(x, y)}{\sum_{x, y} i(x, y)} \times N_P, \quad (6)$$

其中  $\bar{\eta}(x, y)$  是指定像素的平均光子数,  $x$  和  $y$  分别是 CCD 像素的坐标。CCD 读出噪声是假设每个像素噪声平均值是相同的,则以此平均值生成符合泊松分布的每个像素的噪声。为了提高目标斑点图的信噪比,可以选择 EMCCD 或 ICCD 等增强型 CCD,这一类 CCD 是先增强后读出,因此可以有效地抑制读出噪声。目前 EMCCD 的增益的线性比较好,因此模拟 CCD 增益时并没有考虑增益的涨落。则有 CCD 噪声和有限光子以及线性增益的目

公式((1)式),即目标斑点图是目标卷积大气-望远镜瞬时点扩展函数。设望远镜无像差并且湍流大气满足近场近似条件,则当非相干光照明时大气-望远镜系统的瞬时点扩展函数为

$$h(x, y) = |\mathcal{F}\{P(u, v) \times \exp[\varphi(u, v)]\}|^2, \quad (5)$$

其中  $\mathcal{F}$  是傅里叶变换,  $P(u, v)$  是望远镜的光瞳函数,  $\varphi(u, v)$  是大气的瞬时随机相位屏,  $u, v$  分别是望远镜镜面坐标。大气的瞬时随机相位屏  $\varphi(u, v)$  的数值模拟将采用傅里叶变换法<sup>[14,15]</sup>。图 3(a), 图 3(b) 所示的分别是利用傅里叶变换法模拟的视宁度参数  $r_0$  为 10 cm 时的大气-望远镜系统的瞬时点扩展函数与对应的卫星的斑点图,其 CCD 采样区域大小是 256 pixel $\times$ 256 pixel,相当于视场是 13'' $\times$ 13''。

标斑点图的算法是

$$i_N(x, y) = \eta(x, y) \times M + N_N(x, y), \quad (7)$$

式中  $i_N(x, y)$  是有噪声的目标斑点图,  $\eta(x, y)$  是模拟的每一个 CCD 像素上的光子数,  $M$  是线性增益,  $N_N(x, y)$  是每一个像素上的读出噪声。图 3(c) 是模拟的有噪声的卫星斑点图,斑点图的平均光子数是 10000 个,读出噪声平均值是 30,线性增益为 100 倍。

我们模拟了三组卫星斑点图,模拟的大气视宁度参数是 10 cm, CCD 平均读出噪声是 30,每一幅斑点图的 CCD 采样区域大小是 256 pixel $\times$ 256 pixel,相当于视场是 13'' $\times$ 13'',每一组有 2000 幅斑点图。第一组的每一幅斑点图的平均光子数是  $10^5$  个,线性增益是 10 倍;第二组的每一幅斑点图的平均光子数是  $10^4$  个,线性增益是 100 倍;第三组的每一幅斑点图的平均光子数是  $2 \times 10^3$  个,线性增益是 100 倍。对每一组模拟的卫星斑点图都分别进行了重谱法和迭代位移叠加法的重建,其中迭代位

移叠加法的目标初始估计值是通过以其中 50 幅斑点图利用重谱法重建来获得的。图 4 是对第一组平均光子数为  $10^5$  个的卫星斑点图的重建结果,图 5

是对第二组平均光子数为  $10^4$  个的卫星斑点图的重建结果,图 6 是对第三组平均光子数为  $2 \times 10^3$  个的卫星斑点图的重建结果。

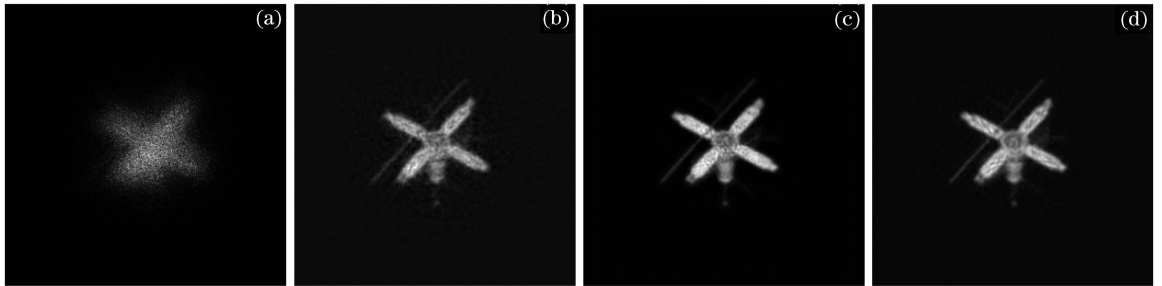


图 4 斑点图平均光子数为  $10^5$  个光子的重建效果。(a) 卫星斑点图;(b) 目标初始估计值;  
(c) 迭代位移叠加法重建像;(d) 重谱法重建像

Fig. 4 Reconstruction effect of the speckle image with average photon number  $10^5$ . (a) Satellite speckle image;  
(b) objective initial estimate image; (c) ISA reconstruction image; (d) speckle masking reconstruction image

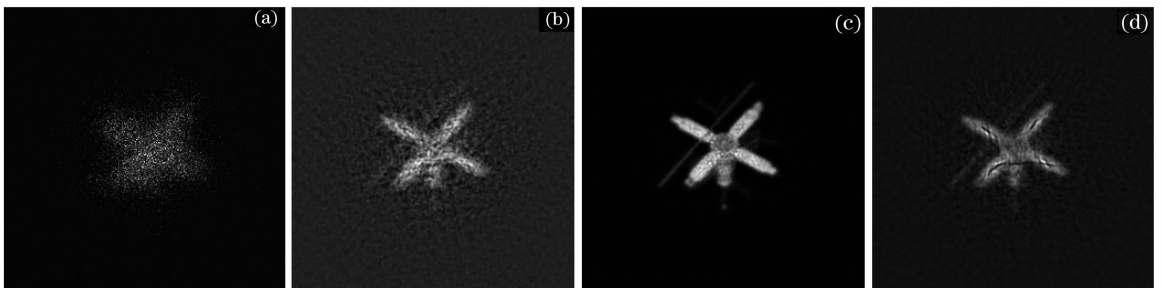


图 5 斑点图平均光子数为  $10^4$  个光子的重建效果。(a) 卫星斑点图;(b) 目标初始估计值;  
(c) 迭代位移叠加法重建像;(d) 重谱法重建像

Fig. 5 Reconstruction effect of the speckle image with average photon number  $10^4$ . (a) Satellite speckle image;  
(b) objective initial estimate image; (c) ISA reconstruction image; (d) speckle masking reconstruction image

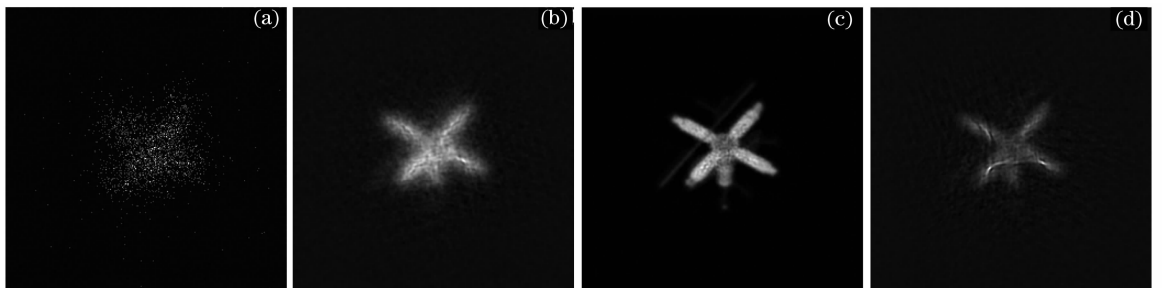


图 6 斑点图平均光子数为  $2 \times 10^3$  个光子的重建效果。(a) 卫星斑点图;(b) 目标初始估计值;  
(c) 迭代位移叠加法重建像;(d) 重谱法重建像

Fig. 6 Reconstruction effect of the speckle image with average photon number  $2 \times 10^3$ . (a) Satellite speckle image;  
(b) objective initial estimate image; (c) ISA reconstruction image; (d) speckle masking reconstruction image

从三组重建结果看,当目标比较亮时迭代位移叠加法和重谱法的重建效果差不多,而目标比较暗弱时迭代位移叠加法的重建效果明显好于重谱法的重建效果,这表明迭代位移叠加法可以有效抑制斑点图的光子噪声。

## 5 结 论

本文提出了一种迭代位移叠加法的修正算法,这种算法对迭代位移叠加法的目标初始估计值的选择和相关寻找目标最大衍射像偏移量的方法进行了改进,该方法可以应用于太阳、人造卫星等扩展目标

的高空间分辨率的重建中。用该算法对模拟的卫星斑点图进行了仿真重建试验,仿真试验表明对暗弱扩展目标的该算法重建效果明显好于重谱法的重建效果。

### 参 考 文 献

- 1 D. L. Fried. Limiting resolution looking down through the atmosphere[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(10): 1380~1384
- 2 A. Labeyrie. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analyzing speckle patterns in star images [J]. *Astron. Aatrophs.*, 1970, **6**(1): 85~87
- 3 K. T. Knox, B. J. Thompson. Recovery of images from atmospherically degraded short-exposure photographs [J]. *Astrophysical. J.*, 1974, **193**(1): 45~48
- 4 Lohmann A W, Weigelt G P, Wirtzner B. Speckle masking in astronomy trible correlation theory and application[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 4028~4037
- 5 Liu Zhong, Qiu Yaohui, Lou Ke *et al.*. A positive restriction method to correct noise bais terms in bispectrum and the experiment in astronomical high resolution image reconstruction [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(2): 163~170  
刘 忠,邱耀辉,楼 柯 等. 改正重谱中噪声偏差的正性约束方法和天文高分辨率像复原实验[J]. *光学学报*, 1999, **19**(2): 163~170
- 6 B. R. Hunt, W. R. Fright, R. H. T. Bates. Analysis of the shift-and-add method for imaging through turbulent media[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(4): 456~465
- 7 Liu Zhong, Qiu Yaohui, Lu Ruwei. Reconstruction of video images through turbulent atmosphere[J]. *SPIE*, 1998, **3561**: 326~331
- 8 Qiu Yaohui, Liu Zhong, Lu Ruwei *et al.*. A new method for astronomical image reconstruction in spatial region; iterative shift-and-add technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 186~191  
邱耀辉,刘 忠,卢如为 等. 天文图像空域重建新方法:迭代位移叠加法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 186~191
- 9 Liu Zhong, Qiu Yaohui, Lou Ke *et al.*. Phase recovery methods in speckle masking and image reconstruction experiment[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 935~940  
刘 忠,邱耀辉,楼 柯 等. 斑点掩模法中的相位复原实施方法和像复原实验[J]. *光学学报*, 1999, **19**(7): 935~940
- 10 O. Von Der Luhe. Speckle imaging of solar small scale structure; I. methods[J]. *A&A*, 1993, **268**: 374~390
- 11 T. W. Lawrence, D. W. Goodman, E. M. Johansson *et al.*. Speckle imaging of satellites at the U. S. air force maui optical station[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(29): 6307~6321
- 12 Liu Zhong, Qiu Yaohui, Lu Ruwei *et al.*. Analysis of noise influence om astronomical speckle imaging techniques[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 417~421  
刘 忠,邱耀辉,卢汝为 等. 天文斑点成像技术中的噪声影响分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 417~421
- 13 Yang Lianchen, Shen Mangzuo. Simulation for high-resolution speckle imaging of extended objects [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(4): 7~10  
杨连臣,沈忙作. 扩展目标高分辨力斑点成像的模拟[J]. *光电工程*, 2000, **27**(4): 7~10
- 14 E. M. Johansson, D. T. Gavel. Simulation of stellar speckle imaging[J]. *SPIE*, 1994, **2200**: 372~383
- 15 Wang Lijin, Li Qiang, Wei Honhgang *et al.*. Numerical simulation and validation of phase screen distorted by atmospheric turbulence[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(3): 1~4  
王立瑾,李 强,魏宏刚 等. 大气湍流随机相位屏数值模拟和验证[J]. *光电工程*, 2007, **34**(3): 1~4