

文章编号:1001-9014(2007)05-0372-05

空间扩展目标对准误差图像的高分辨复原

罗林^{1,2}, 樊敏³, 王黎¹, 沈忙作²

(1. 西南交通大学 理学院, 四川 成都 610031;

2. 中国科学院光电技术研究所 微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;

3. 成都信息工程学院, 四川 成都 610041)

摘要:大气湍流、光子噪声和光学跟踪系统对准误差严重降低了空间目标观测图像的分辨率。根据最大似然估计原理,建立了提高目标图像分辨率的多帧盲反卷积算法,用共轭梯度优化方法从目标记录图像估计出原始目标函数和点扩散函数。运用低通平滑滤波技术在算法迭代过程中逐步完成对噪声的抑制。模拟实验数据和实际图像的复原结果表明,论文建立的盲反卷积算法有效地克服了大气湍流、光子噪声和光学系统对准误差,提高了目标图像的分辨率,复原目标图像的分辨率达到了光学衍射极限的水平。

关键词:大气湍流;反卷积;图像恢复;红外成像

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

HIGH RESOLUTION RESTORATION OF THE SPACE EXTENDED OBJECT IMAGES WITH COLLIMATE FAULT

LUO Lin^{1,2}, FAN Min³, WANG Li¹, SHEN Mang-Zuo²

(1. Science College, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. State Key Lab of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

3. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610041, China)

Abstract: The resolution of space object images was decreased seriously by the atmospheric turbulence, photon noise and collimating fault of optical track system. The multiframe blind deconvolution algorithm for improving the resolution of object images based on the maximum-likelihood estimation was presented. From the record images the object function and point spread function were estimated by the conjugation gradient optimization method. The reduction of photon noise was reached by using the smoothing low-pass filter during the algorithm iteration. The restoration results of simulation and real data show that the proposed blind deconvolution algorithm can overcome the effects of the atmospheric turbulence, photon noise and collimating fault of optical system on object images, and improve the resolution of object images to arrive at the level of diffraction-limited.

Key words: atmospheric turbulence; deconvolution; image restoration; infrared imaging

引言

众所周知,地面大孔径光学望远镜观测空间目标,由于大气湍流、成像路径的光子噪声和观测系统误差,使目标图像的分辨率被严重降低。为了提高空间目标图像的分辨率,提出了斑点成像和图像盲反卷积方法^[1-6],图像盲反卷积是一种只利用少量帧目标短曝光像,不需要有关目标先验信息和大气点

扩散函数(包括光学系统)而获得高分辨目标图像的方法。

在红外光学系统成像中,大气湍流的强度与可见光成像相比要弱许多,但当用大孔径地基望远镜(如4m孔径)观测目标时,其分辨率(0.5~1秒)仍然低于衍射极限的水平。2002年美国W. M. Keck Observatory^[7]实现了自适应光学红外卫星图像的高分辨成像,Dainty^[8]研究了斑点成像对近红外天文

收稿日期:2006-12-21,修回日期:2007-06-18

Received date: 2006-12-21, revised date: 2007-06-18

基金项目:国家高技术研究发展863计划(863-2-7-7-4),四川省应用基础研究计划项目(05JY029-085-1)

作者简介:罗林(1963-),男,四川成都人,西南交通大学教授,博士,主要从事光电图像高分辨成像研究。

图像的处理能力,1997年 Schulz^[9]等人用图像盲反卷积完成了地面观测的哈勃空间望远镜红外图像的高分辨成像。除了大气湍流和光子噪声,在红外波段对高速运动目标观测时,光学跟踪系统轻微的对准误差会产生大的离焦像差,使图像的分辨率严重下降,如何克服对准误差对目标图像分辨率的影响是实际应用中需要解决的重要问题,为此我们提出了用盲反卷积消除目标图像对准误差的方法,研究的主要内容包括:建立严格约束的梯度优化盲反卷积算法,分析有效减少光子噪声的方法,通过实验证明盲反卷积消除图像对准误差的有效性,最后对实际天体目标图像进行了恢复。

1 盲反卷积算法

非相干光学成像系统在空间线性不变条件下,目标成像满足卷积关系

$$g(x) = f(x) * h(x) \quad (1)$$

式中单变量 x 表示空间二维坐标。 $f(x)$ 表示目标函数, $h(x)$ 表示瞬时大气光学点扩散函数(含光学系统), $g(x)$ 表示记录图像函数。实际中图像测量数据存在光子噪声,其成像关系为

$$d(x) = g(x) + n(x) \quad (2)$$

式中 $d(x)$ 是实际测量数据, $n(x)$ 是光子噪声。因此,盲反卷积所要解决的问题归结为:如何从实际记录图像数据 $d(x)$ 中估计真实的目标函数和点扩散函数 $f(x)$ 、 $h(x)$ 。根据贝叶斯原则,在测量数据条件下估计参数为 $\hat{f}(x)$ 、 $\hat{h}(x)$ 概率为

$$\Pr(\hat{f}, \hat{h} | d) = \frac{\Pr(d | \hat{f}, \hat{h}) \Pr(\hat{f}) \Pr(\hat{h})}{\Pr(d)} \quad (3)$$

取对数形式为

$$\ln[\Pr(\hat{f}, \hat{h} | d)] = \ln[\Pr(d | \hat{f}, \hat{h})] + \ln[\Pr(\hat{f})] + \ln[\Pr(\hat{h})] - \ln[\Pr(d)] \quad (4)$$

式中 $\ln[\Pr(d)]$ 为常数,可以去掉。因而估计真实的目标函数和点扩散函数的问题转变为极大化或等价于极小化函数

$$\begin{aligned} J(\hat{f}, \hat{h}) &= -\ln[\Pr(\hat{f}, \hat{h} | d)] \\ &= -\ln[\Pr(d | \hat{f}, \hat{h}) - \ln[\Pr(\hat{f})] \\ &\quad - \ln[\Pr(\hat{h})] \end{aligned} \quad (5)$$

作进一步简化

$$J(\hat{f}, \hat{h}) = E_{conv} + E_f + E_h \quad (6)$$

式中 $E_{conv} = -\ln[\Pr(d | \hat{f}, \hat{h})]$, $E_f = -\ln[\Pr(\hat{f})]$, $E_h = -\ln[\Pr(\hat{h})]$, E_{conv} 的最小化是保证估计参数的卷积 $\hat{f} * \hat{h}$ 和测量数据一致,其形式由光子噪声模型决定,当为 Gaussian 型分布时,实际测量数据 $d(x)$

的误差概率为

$$\Pr(d | \hat{f}, \hat{h}) = \prod_x \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma} \sum_x [d(x) - \hat{f}(x) * \hat{h}(x)]^2\right\} \quad (7)$$

式中 σ 是测量数据的方差,取对数并去掉无关项后得

$$\begin{aligned} E_{conv} &= -\ln[\Pr(d | \hat{f}, \hat{h})] \\ &= \frac{1}{2} \sum_x [d(x) - \hat{f}(x) * \hat{h}(x)]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

式(6)中 E_f 和 E_h 项的最小化是确保估计参数 \hat{f} 、 \hat{h} 收敛到有物理意义的最优解,并方便进行各种优化约束,其中 E_f 项代表对目标特性的约束,由于在实际中有关目标的信息事先并不知道,因此不进行目标特性的约束是合理的;对 E_h 进行频率带宽有限约束使点扩散函数的频率在有意义的范围内,因此优化目标函数为

$$\begin{aligned} J(\hat{f}, \hat{h}) &= \sum_k \left\{ \frac{1}{2} \sum_x [d_k(x) - \hat{f}(x) * \hat{h}_k(x)]^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} w_c(u) |H_k(u)|^2 \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $k=1, 2, \dots, K$ 是记录图像序号,单变量 u 表示二维频域坐标, $H_k(u)$ 是瞬时大气光学传递函数, $w_c(u)$ 是约束点扩散函数频率带宽有限函数

$$w_c(u) = \begin{cases} 0 & u \leq f_c \\ 1 & u > f_c \end{cases} \quad (10)$$

式中 f_c 是光学系统传递函数的截止频率。

用共轭梯度法求使函数 $J(\hat{f}, \hat{h})$ 取得极值的参数 $\hat{f}(x)$ 、 $\hat{h}_k(x)$,用梯度决定优化过程修改函数 $J(\hat{f}, \hat{h})$ 变量的方向,式(9)的梯度为

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{f}} = -\sum_k \sum_x \{ [d_k(x) - \hat{h}_k(x) * \hat{f}(x)] * \hat{h}_k(-x) \} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \hat{h}_k} &= -\sum_x \{ [d_k(x) - \hat{h}_k(x) * \hat{f}(x)] * \hat{f}(-x) \} \\ &\quad + w_c(u) \hat{H}_k(u) \frac{\partial \hat{H}_k(u)}{\partial \hat{h}_k} \end{aligned} \quad (12)$$

为避免修改变量过程中出现负数,用 $\hat{f}(x)$ 、 $\hat{h}_k(x)$ 平方根 $\hat{\phi}^2(x)$ 、 $\hat{\psi}^2(x)$ 作为函数 $J(\hat{f}, \hat{h})$ 的变量,根据优化原理,对原始目标函数和点扩散函数的修改为

$$\hat{\phi}^2(x)^{new} = \hat{\phi}^2(x)^{old} + 2\alpha \hat{\phi}(x) \frac{\partial J}{\partial \hat{\phi}(x)} \quad (13)$$

$$\hat{\psi}_k^2(x)^{new} = \hat{\psi}_k^2(x)^{old} + 2\alpha \hat{\psi}_k(x) \frac{\partial J}{\partial \hat{\psi}_k(x)} \quad (14)$$

式中 α 是优化步长,用一维寻优搜索方法确定,由 Polak-Ribiere 公式确定梯度增量大小,并用规定的

精度或一定的迭代次数确定目标函数优化的预期。由于优化估计中图像各点能量不断被重新分配,为保持总能量不变,在算法迭代时对估计目标函数和点扩散函数应作单位能量守恒约束。

2 噪声抑制

光子噪声对图像的影响在频域空间表现为目标函数的高频成分处有随机起伏的尖峰,在盲反卷积恢复目标正确的频率成分时噪声频率会被同时放大,使 E_{conv} 的增大与减小 E_{conv} 的优化目标相反,因此当有严重光子噪声时,盲反卷积算法只能收敛到局部极值点。减少噪声的方法考虑了两个方面:一是采用低通滤波抑制噪声频率在盲反卷积中迅速增长;二是用平滑方式对随机起伏的尖峰进行削弱。多数大气点扩散函数的频域分布近似 Gaussian 型分布,相应的目标退化图像称为 G 型退化图像,因此选用 Gaussian 型滤波函数有利于滤波,属于这类的滤波函数有巴特沃思滤波器和高斯滤波器^[10]。算法在抑制噪声时,用滤波函数 $w_s(x)$ 作用于 E_{conv} 即

$$E_{conv} = -\ln[\Pr(d|\hat{f},\hat{h})] = \frac{1}{2} \sum_x [d(x) - \hat{f}(x) * \hat{h}(x)]^2 * w_s(x) \quad (15)$$

可以看出,这种形式抑制噪声不存在频率奇异性造成的病态问题,不要求知道卷积核 $h(x)$ 和噪声的有关知识,噪声的抑制是在算法迭代中逐步完成的。实验证明,选择适当的滤波函数截止频率可以有效抑制噪声频率,对减少滤波函数对原始目标函数

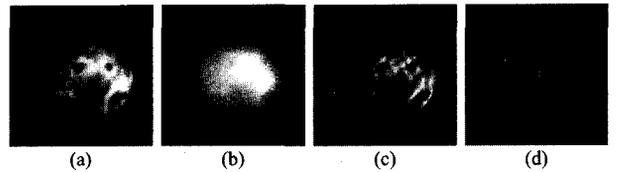


图1 木星 Galilean 卫星的盲反卷积算法复原图像:(a)原始图像,(b)短曝光像,(c)复原图像,(d)点扩散函数估计。
Fig.1 Restoration of Galilean satellite of Jupiter by blind deconvolution algorithm: (a) original image, (b) short exposure images, (c) restoration image, (d) point spread function estimated.

有效频率的衰减有利。

3 图像噪声和对准误差

根据实际经验,采用 Gaussian 型加性噪声模型更符合实际情况,实验图像的信噪比定义为^[11]:

$$SNR = 10\log_{10} \left\{ \frac{\sum_x [f(x) * h(x)]^2}{\sum_x [n(x)]^2} \right\} \quad (16)$$

在对高速运动空间目标成像时,由于跟踪系统和大气湍流等因素,目标在像面上呈现剧烈的抖动,对准误差较大,大小用光学系统入瞳面上离焦像差表示

$$\phi_D(u) = \frac{2\pi}{\lambda} A(\xi^2 + \eta^2) \quad (17)$$

式中 $u = (\xi, \eta)$ 是入瞳面上的坐标, $\phi_D(u)$ 是光学系统像差的波前相位, A 是离焦系数,由入瞳边缘最大离焦像差决定,其大气光学点扩散函数为

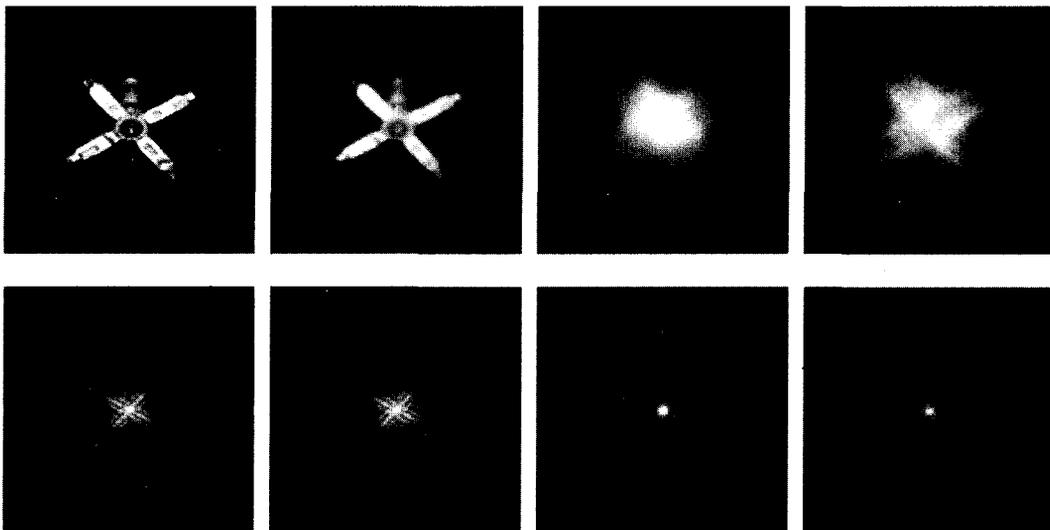


图2 实验模拟图像,上一行从左至右:原始图像,衍射图像,离焦 2λ 图像,有离焦 2λ 的短曝光像(10dB)。下一行为对应的对数功率谱图像。

Fig.2 Simulation images in experiment. Up row from left to right: original image, diffraction-limited image, image with the 2λ defocus, short exposure image with the 2λ defocus. Below row are their spectrum images.

$$h(x) = \frac{1}{A_0} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} P(u) \exp[j(\phi_s(u) + \phi_D(u))] \exp[j2\pi ux] du \right|^2, \quad (18)$$

式中 $\phi_s(u)$ 是大气随机波前相位, $P(u)$ 是光瞳函数, 瞳内取 1, 瞳外取零. 模拟实验图像时, 用原始目标图像与大气点扩散函数卷积生成大气目标短曝光图像.

4 实验结果

图 1(a) 是美国 10m Keck II 望远镜自适应光学系统(AO)在 2001 年 2 月 22 日记录的木星伽利略(Galilean)卫星的高分辨图像^[7], 成像中心波长 $1.6\mu\text{m}$, 图 1(b) 是用中国微细加工光学技术国家重点实验室提供的软件生成的 Galilean 卫星 128×128 像素短曝光像, 大气相干长度 $r_0 = 15\text{cm}$, 图 1(c) 是采用了 5 幅短曝光像、300 次算法迭代的盲反卷积复原高分辨图像, 从复原图像可以看出目标的细节已清晰可见, 图 1(d) 是点扩散函数估计.

图 2 中的原始图像资料来源于文献[12], 图像为 128×128 像素, 模拟图像的参数: 成像中心波长为 $1.6\mu\text{m}$, 最大边缘离焦像差为 2λ , 大气相干长度 $r_0 = 20\text{cm}$, 其中有噪声短曝光像的信噪比为 10dB, 图中下一行是对数功率谱图像($\log_{10}(1 + | \cdot |^2)$). 从图中可以看出, 由于大气湍流、光子噪声和离焦, 目标图像分辨率严重下降, 其频谱更集中在低频部分, 噪声使高频处有杂乱的成分, 整个功率谱图像充满噪声频率. 比较离焦图像和有离焦的短曝光像, 短

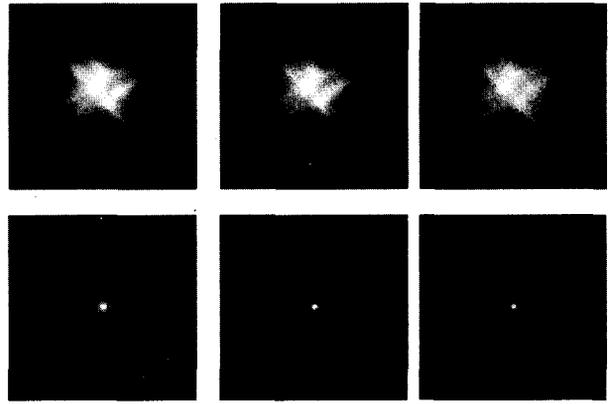


图 3 存在 2λ 离焦的模拟短曝光像图像, 上一行从左至右: 无噪声图像, 10dB 噪声图像, 5dB 噪声图像. 下一行为对应的对数功率谱图像.

Fig. 3 Simulation short exposure images with the 2λ defocus. Up row from left to right: short exposure image of no photon noise, 10dB image, 5dB image. Below row are their spectrum images.

曝光像功率谱中已看不出离焦的影响, 说明大气随机扰动有平滑离焦像差的作用^[13].

图 3 是有 2λ 离焦的模拟短曝光像, 从左至右分别是: 无噪声图像, 10dB 噪声图像, 5dB 噪声图像, 从功率谱图像可以看出, 随着噪声的增加, 目标频率更集中在低频部分.

图 4 是图 3 的盲反卷积复原图像, 采用 5 幅短曝光像 500 次算法迭代, 图中功率谱图像对应相应的复原图像, 图中的点扩散函数估计对应 5dB 噪声复原图像. 从复原图像可以看出, 在没有噪声情况

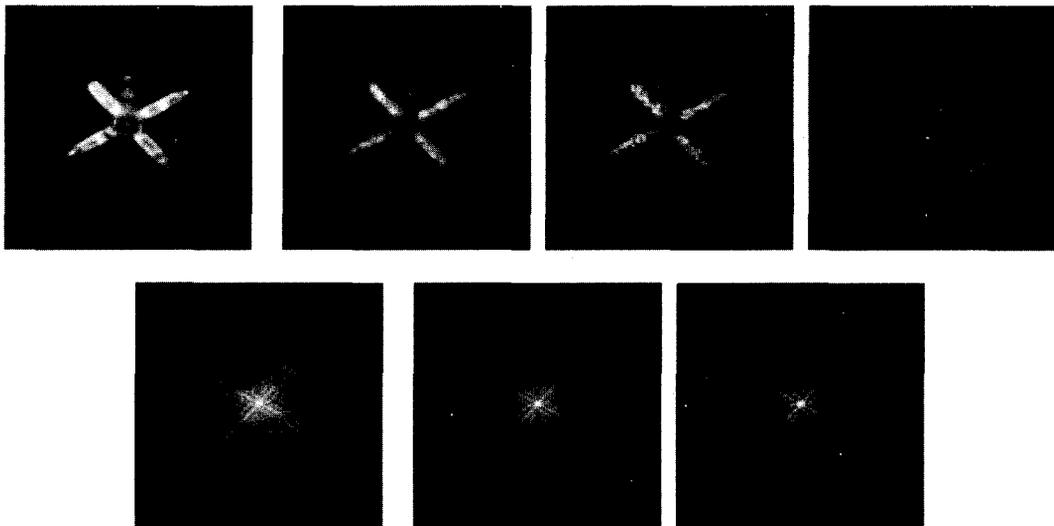


图 4 盲反卷积算法复原图像, 上一行从左至右: 无噪声图像复原, 10dB 噪声图像复原, 5dB 噪声图像复原, 点扩散函数估计. 下一行为复原图像的对数功率谱图像

Fig. 4 Restoration image of blind deconvolution algorithm. Up row from left to right: restoration image with no noise, 10dB restoration image, 5dB restoration image, point spread function estimated

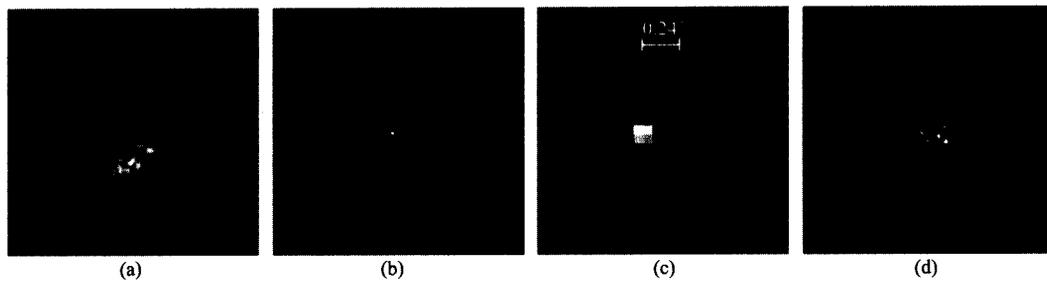


图5 猎户座 σ 盲反卷积算法复原图像。(a)短曝光像,(b)复原图像,(c)复原图像放大图,(d)点扩散函数估计
Fig.5 Restoration images of σ Orion by blind deconvolution algorithm: (a) short exposure image, (b) restoration image, (c) restoration amplified image, (d) point spread function estimated

下,算法复原效果可以达到衍射极限水平.对有噪声的目标图像,算法具有显著减少噪声的能力,目标的细节(天线)已被明显恢复出来,整个实验结果显示,目标的对准误差(离焦)已被消除.

图5(a)是云南天文台1.06m天文望远镜(综合焦距22.42m)2005年12月29日21:43分记录的猎户座 σ 128×128像素短曝光像,曝光时间为10ms.图5(b)是复原图像,采用5幅短曝光像500次算法迭代,图5(d)是估计出的点扩散函数.图5(c)是复原图像放大图,从复原数据可以算出,双星在成像面相距4.12个像素单位,结合望远镜光学系统参数计算双星角间距约为0.24".

图6是卷积误差与算法迭代次数的关系曲线,以此显示盲反卷积算法复原图像的收敛性,卷积误差定义为

$$E_c = \sum_k \sum_u |D_c(u) - \hat{F}(u) \cdot \hat{H}_k(u)|^2, \quad (19)$$

式中 $D(u)$ 、 $F(u)$ 、 $H(u)$ 分别是 $d(x)$ 、 $f(x)$ 、 $h(x)$ 的频域函数.图6表示图4无噪声图像复原和10dB噪声图像复原的卷积误差曲线,可以看出,无噪声时算法收敛性比有噪声时算法的收敛性要高,说明噪声对算法复原图像的收敛性有重要影响.

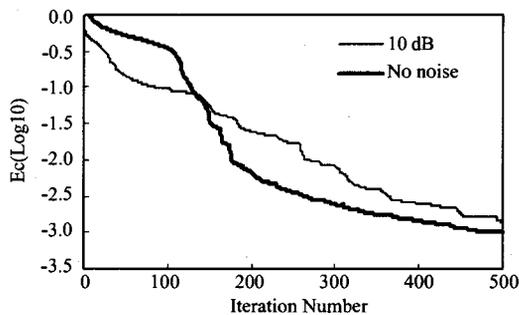


图6 盲反卷积复原图像的卷积误差和迭代次数的关系
Fig.6 Error between the convolution estimated image and record image as algorithm iteration increasing

5 结论

本文研究了有对准误差和严重噪声的空间扩展目标图像高分辨复原方法,建立了基于梯度优化的盲反卷积算法模型,通过最大似然估计函数从目标记录图像解算出原始目标函数和点扩散函数,提出了在盲反卷积算法中采用频域低通平滑滤波技术减少噪声的方法,实验证明,所建立的算法能从少量帧记录图像复原出原始目标函数和点扩散函数,可以有效克服大气湍流、消除对准误差、减少光子噪声和提高空间目标图像的分辨率并达到衍射极限水平.

REFERENCES

- [1] Labeyrie A. Attainment of diffraction-limited resolution in large telescope by Fourier-analyzing speckle patterns in star images [J]. *Astron. Astrophys.*, 1970, **6**(1):85—87.
- [2] Lawrence W T, Goodman D M, Johansson E M, et al. Speckle imaging of satellites at the U. S. Air Force Maui Optical Station [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(29):6307—6321.
- [3] Ayers G R, Dainty J C. Iterative blind deconvolution method and its applications [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(7):547—549.
- [4] Lane R G. Blind deconvolution of speckle images [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1992, **9**(9):1508—1514.
- [5] Jefferies S M, Christou J C. Restoration of astronomical images by iterative blind deconvolution [J]. *Astrophys. J.*, 1993, **415**(3):862—874.
- [6] HONG Han-Yu, ZHANG Tian-Xu, YU Guo-Liang. Regularized restoration algorithm of astronomical turbulence-degraded images using maximum-likelihood estimation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (洪汉玉, 张天序, 余国亮. 航天湍流退化图像的极大似然估计规整化复原算法. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(2):130—134.
- [7] Marchis F, Pater I de, Davies A G, et al. High-resolution Keck adaptive optics imaging of violent volcanic activity on Io [J]. *Icarus*, 2002, **160**:124—131.
- [8] Kliiickers V A, Wooder N J, Dainty J C. Comparison of shift-and-add and bispectrum image reconstruction methods for astronomy in the near infrared [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1996, **13**(7):1577—1583.

(下转 392 页)

- slot lines[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1980, **28**(6):523—528.
- [2] Jeong Phill Kim, Wee Sang Park. Novel configurations of planar multilayer magic-T using microstrip-slotline transitions[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2002, **50**(7):1683—1688.
- [3] LI Su-Ping, KE Zi-Hua, LI Ying, *et al.* Novel bandpass filters of planar dual-mode elliptic-function [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李素萍, 可子华, 李英, 等. 新型的平面双模椭圆函数带通滤波器. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(5):368—371.
- [4] XIE Xiao-Qiang, LIN Wei-Gan, XU Rui-Min. New-style millimeter wave power combining circuit [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谢小强, 林为干, 徐锐敏. 一种新型的毫米波功率合成电路. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(1):25—28.
- [5] TANG Hong-Jun, HONG Wei. Novel millimeter wave substrate integrated waveguide filter with compact configuration [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (汤红军, 洪伟. 一种紧缩结构的新型毫米波基片集成波导滤波器. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(2):139—142.
- [6] Xiaoxing Yin, Ziguo Su, Wei Hong, *et al.* An ultra wide-band tapered slot antenna [C]. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2005, **2A**(7):516—519.
- [7] Hart S M, Ho TQ. Novel planar excitation methods for printed antennas [C]. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1994, **2**(6):1210—1213.
- [8] Schüppert B. Microstrip-slotline transitions: modeling and experimental investigation [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1988, **36**:1272—1282.
- [9] Zinieris M M, Sloan R, Davis L E. A broadband microstrip to slotline transition [J]. *Microwave and optical technology letters*, 1998, **18**:339—342.
- [10] Yook Jong-Gwan, Nihad Dib, Katehi Linda P B. Theoretical and experimental study of microstrip-to-slot line uniplanar transition [C]. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1994, **2**(6):1206—1209.

(上接 376 页)

- [9] Schulz T J, Stribling B E, Miller J J. Multiframe blind deconvolution with real data: imagery of Hubble Space Telescope [J]. *Opt. Express*, 1997, **1**(11):335—362.
- [10] Gonzalez R C, Woods R E. *Digital Image Processing* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002, 171
- [11] Lam E Y, Goodman J W. Iterative statistical approach to blind image deconvolution [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2000, **17**(7):1177—1184.
- [12] Sheppard D G, Hunt B R, Narcellin M W. Iterative multi-frame superresolution algorithms for atmospheric-turbulence-degraded imagery [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1998, **15**(4):978—992.
- [13] LUO Lin, LIAO Sheng, SHEN Mang-zuo, *et al.* Effects of large telescope aberrations on speckle imaging [J]. *Acta Optica Sinica* (罗林, 廖胜, 沈忙作, 等. 天文望远镜像差对斑点成像技术的影响, *光学学报*), 2005, **25**(11):1447—1451.