

基于单点像的光学稀疏孔径图像复原

伏西洋^{1,2,3}, 王大勇⁴, 郭红锋¹

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 太阳活动重点实验室, 北京 100012;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 4. 北京工业大学 应用数理学院, 北京 100124)

摘要: 为了定量评价光学稀疏孔径系统的图像复原效果, 提出了一种以稀疏孔径系统单点像作为退化图像进行图像复原的方法. 对稀疏孔径系统的单点像进行适当的复原处理, 可获得类似爱里斑(即该稀疏孔径等效圆口径系统的单点像)的复原图像. 通过比较该复原图像和爱里斑相似程度, 即可对该复原算法(或者参数)进行评价. 以法国 SOLARNET 光学稀疏孔径系统为例演示了上述图像复原过程. 仿真结果表明, 基于单点像的图像复原方法是可行的.

关键词: 稀疏孔径; 图像复原; 单点像

中图分类号: TH 743

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)05-0793-04

Image Restoration of Optical Sparse Aperture Based on Single Point-image

FU Xi-yang^{1,2,3}, WANG Da-yong⁴, GUO Hong-feng¹

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;
2. Key Laboratory of Solar Activity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
4. College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To quantitatively evaluate of image restoration of optical sparse aperture systems, a image restoration method that uses single point image as the degradation image is presented. When this degradation image is processed by appropriate restoration algorithm (with proper parameters), a distribution similar to Airy pattern is obtained. By calculating the correlation coefficient of the restored image and equivalent filled system's Airy pattern, the restoration algorithm can be evaluated. As an example, image restoration and evaluation of SOLARNET (France optical sparse aperture system) are achieved to demonstrate this method. Results show that complicated image can be restored as the same resolution and image quality as an equivalent filled system's, by using the same restoration algorithm of the single point image.

Key words: sparse aperture; image restoration; single point image

天文和空间遥感事业的不断推进,对望远镜空间分辨率的要求越来越高,但传统光学望远镜(主

镜为单片式)由于受到口径的限制,在当前一段时期内已经达到了极限^[1]. 在这种情况下,提出了光

收稿日期: 2010-06-01.

基金项目: 法国政府奖学金资助项目(BGF 200540).

作者简介: 伏西洋(1979—),男,博士研究生,主要从事光学信息处理、数字图像处理方面的研究, E-mail: fuxiyang2001@yahoo.com.cn.

学稀疏孔径系统(由数个独立望远镜或镜面组成的特定阵列)^[2-4],该系统可以获得远高于其单个望远镜或镜面的空间分辨率(即等效某个大孔径系统).由于稀疏孔径系统的入瞳只是其等效系统入瞳的部分填充,因此该系统的调制传递函数在大部分频率范围内比其等效系统小,形成的是低对比度的模糊图像,必须进行图像复原处理以获得清晰像.

光学稀疏孔径图像复原研究通常在实际光学稀疏孔径系统建成之前就开展了,因此,研究时无法获得真实的低对比度模糊图像.目前的作法是先给出一幅清晰遥感(或者分辨率板)图像作为目标,然后对该目标模拟稀疏孔径系统成像过程以获得退化图像,最后对该退化图像进行图像复原研究^[5-8].本文给出了一种以单点像作为退化图像进行光学稀疏孔径图像复原的方法,并用该方法对法国 SOLARNET 光学稀疏孔径系统进行了图像复原仿真.

1 稀疏孔径单点像图像复原方法

光学稀疏孔径系统的物像映射关系可以表示为

$$I(x_i, y_i) = T\{O(x_i, y_i)\} \quad (1)$$

式中, O 和 I 分别为几何光学理想像和像面光强度分布; $T\{\cdot\}$ 为系统成像运算符. 为了简便起见,仅考虑光学稀疏孔径系统为空不变系统的情况(非空不变系统可以通过将像面划分成若干等晕区的方式来实现小区域内的空不变),同时叠加实际问题中存在的加性噪声 n , 则式(1)转变为

$$I(x_i, y_i) = \iint_{+\infty}^{-\infty} O(\xi, \eta) T\{\delta(x_i - \xi, y_i - \eta)\} d\xi d\eta = \iint_{+\infty}^{-\infty} O(\xi, \eta) h_s(x_i - \xi, y_i - \eta) d\xi d\eta + n(x_i, y_i) = O(x_i, y_i) * h_s(x_i, y_i) + n(x_i, y_i)$$

其中, h_s 为该系统的点扩散函数; $*$ 为卷积运算符. 考虑到光学稀疏孔径系统的光瞳函数可以表示为一个子孔径光瞳函数与 δ 函数阵列的卷积

$$P(x, y) = \text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D/2}\right) * \sum_{k=1}^N \delta(x - \bar{x}_k, y - \bar{y}_k)$$

式中, D 为子孔径直径; N 为子孔径数目; \bar{x}_k 和 \bar{y}_k 为第 k 个子孔径中心的位置坐标; $\text{circ}(\cdot)$ 为圆域函数. 因此,当采用中心波长为 $\bar{\lambda}$ 的准单色光照明时,该系统的点扩散函数为

$$h_s(x_i, y_i) \propto \left[\frac{2J_1\left(\pi D \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{\lambda f_{\text{eff}}}\right)}{\pi D \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{\lambda f_{\text{eff}}}} \right]^2 \times$$

$$\left| \sum_{k=1}^N \exp\left[-j(2\pi)\left(\frac{x_i}{\lambda f_{\text{eff}}}\bar{x}_k + \frac{y_i}{\lambda f_{\text{eff}}}\bar{y}_k\right)\right] \right|^2$$

式中 f_{eff} 为该系统的等效焦距. 相应地,该系统的光学传递函数为

$$H_s(f_x, f_y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H_0\left(f_x + \frac{x_i - x_j}{\lambda f_i}, f_y + \frac{y_i - y_j}{\lambda f_i}\right)$$

其中 H_0 为子系统的光学传递函数,其表达式为

$$H_0(f_x, f_y) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1}\left(\frac{\rho}{2\rho_0}\right) - \frac{\rho}{2\rho_0} \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{4\rho_0^2}} \right], & \rho \leq 2\rho_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式中, $\rho = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$; $\rho_0 = D/(2\lambda f_{\text{eff}})$.

光学稀疏孔径图像复原是为了获得高对比度的清晰图像,当复原算法适当时,复原图像可以获得大口径系统的图像清晰度. 显然,当退化图像为一个单点像时,经过适当复原处理后,复原图像应该与大口径系统的点扩散函数(即爱里斑)相当. 由于爱里斑的函数表达式已知,因此可直接计算出大口径系统的像面光强分布,再通过与特定复原算法获得的复原图像进行比较,即可对该复原算法进行评价.

2 基于单点像的图像复原仿真

SOLARNET 是法国高层大气所用于研究绝对位相测量和共相控制技术的光学稀疏孔径系统^[9],该系统由 3 个独立的子望远镜组成(见图 1、2),子望远镜口径为 60 mm,子望远镜数为 3 个,2 个子望远镜中心距离 90 mm,系统等效焦距 800 mm,准单色光中心波长 0.5 μm ,系统外接圆直径 165 mm.



图1 法国 SOLARNET 系统实物

Fig. 1 Breadboard of SOLARNET system

该系统在均值为 0、方差为 0.01 的高斯噪声下对单物点形成的仿真像如图 3 所示. 图 4 是与该稀

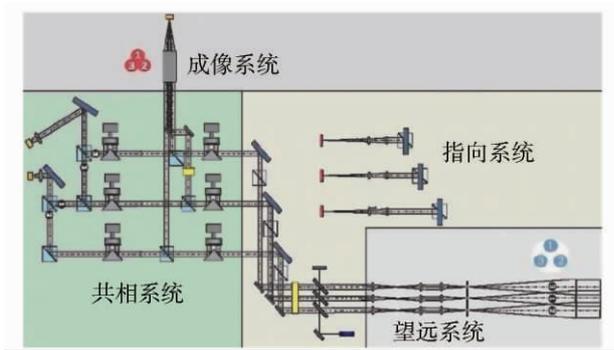


图 2 法国 SOLARNET 实验系统光路
Fig. 2 Optical layout of SOLARNET system

疏孔径系统等效的大孔径系统的单点仿真像。

采用不同 K 值的维纳滤波器

$$W(f_x, f_y) = \frac{H_s^*(f_x, f_y)}{|H_s(f_x, f_y)|^2 + K} H_c(f_x, f_y) \quad (3)$$

对图 3 进行滤波, 得到图 5. 式中, H_s 为稀疏孔径系统的光学传递函数; H_c 为等效大口径系统 (165 mm) 的光学传递函数。

比较图 4 和图 5 可以看出, 退化图像经过复原处理后可以达到单个大口径系统的观测效果 (如图 5(c) ~ (f) 所示). 如果需要进一步分析不同 K 值的复原结果的优劣, 则可以通过相关系数来判定^[10]:

$$c = \frac{E[(f(x,y) - E[f(x,y)])(\hat{f}(x,y) - E[\hat{f}(x,y)])]}{\sqrt{E[f^2(x,y)] - (E[f(x,y)])^2} \sqrt{E[\hat{f}^2(x,y)] - (E[\hat{f}(x,y)])^2}}$$

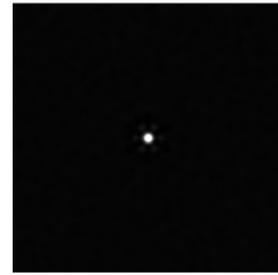


图 3 SOLARNET 对单个物点所成的有噪声图像
Fig. 3 SOLARNET's image of a point source with noise

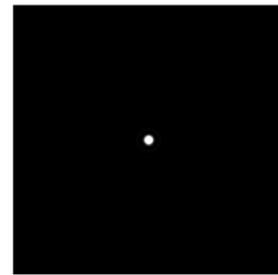


图 4 等效大口径系统单点像
Fig. 4 Equivalent large system's image of an aperture

式中, f 为稀疏孔径系统复原图像; \hat{f} 为等效大口径系统直接成的像, 该系数越大则说明 f 和 \hat{f} 越相似. 经过计算, 当 K 分别取 0.001、0.000 1、0.000 01 和 0.000 001 时, 对应的 c 值分别为 0.907 5、0.871 5、0.785 0 和 0.645 0, 因此当 K 取 0.001 时, c 值最大, 复原结果最优。

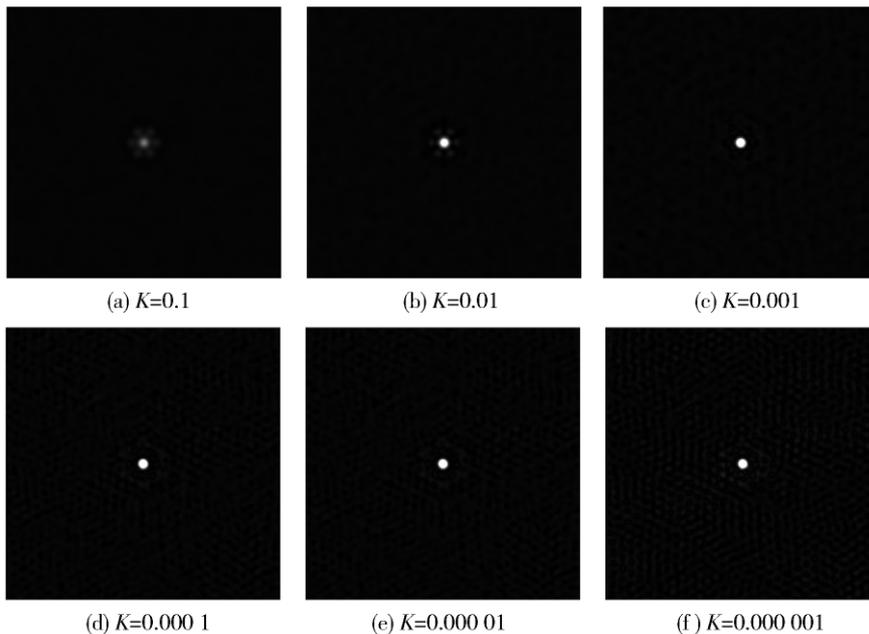


图 5 不同 K 值的复原图像
Fig. 5 Restoring images with different K values

对稀疏孔径的单点像可以恢复到等效大口径系统的观测效果,因此,对由若干点像组成的其他任意复杂图像,采用上述相同的算法和参数进行恢复,也应该可以实现其等效大口径系统相同的观测效果.下面给出一个复杂目标图像的例子,即 21 行 21 列的点阵,其中相邻 2 点间距为 $4\ \mu\text{m}$. 图 6 和图 7 分别为 SOLARNET 对该目标所成的退化图像和复原图像,图 8 为等效大口径系统所成的像.

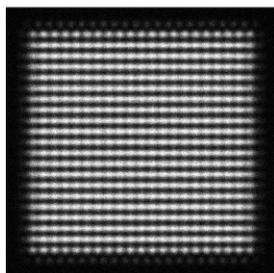


图 6 SOLARNET 对复杂目标所成像

Fig. 6 SOLARNET's image of a complicated object

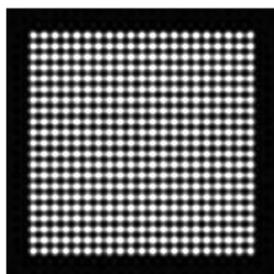


图 7 图 6 的复原图像

Fig. 7 Restored image of Fig. 6

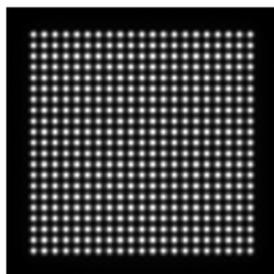


图 8 等效大口径系统对复杂目标所成像

Fig. 8 Equivalent large aperture system's image of a complicated object

显然,比较图 7 和图 8 可以看出,对单点像适用的复原算法对复杂图像也同样适用,因此,稀疏孔径图像复原研究完全可以基于简单的单点像进行而不失一般性.

3 结论

1) 当采用维纳滤波器对法国 SOLARNET 光学稀疏孔径系统进行图像复原处理时,在均值为 0、方

差为 0.01 的高斯噪声背景下,仿真结果表明 K 取 0.001 时图像复原结果最优.

2) 仿真结果也表明对单点像适用的复原算法对复杂图像也同样适用,因此该方法可以用于各种稀疏孔径图像复原算法的深入研究.

致谢: 本课题得到了国家天文台空间天文技术实验室王森研究员的支持和帮助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] WANG Da-yong, CHANG Jun, LIU Han-cheng, et al. Wide-field imaging design and image restoration with optical sparse-aperture system [C] // 2nd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies. Beijing: SPIE, 2006, 6149: 61493B-1-61493B-7.
- [2] GUO Hong-feng. Development on techniques of the optical interferometry and aperture synthesis [J]. Progress in Astronomy, 2003, 21(3): 219-230. (in Chinese)
- [3] MEINEL A B. Aperture synthesis using independent telescope [J]. Applied Optics, 1970, 9(11): 2501-2504.
- [4] QIAN Lin, WU Quan-ying, WU Feng, et al. Study on imaging of dual three sub-apertures design [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(8): 1030-1035. (in Chinese)
- [5] WANG Da-yong, FU Xi-yang, GUO Hong-feng, et al. Imaging and image reconstruction of optical sparse-aperture systems [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(10): 1557-1560. (in Chinese)
- [6] WU Quan-ying, QIAN Lin, SHEN Wei-min. Image recovering for sparse aperture systems [J]. Laser Journal, 2005, 26(6): 40-42. (in Chinese)
- [7] LI Bo, LI Yan, LI Xin. Research on the image restoration for sparse aperture optical systems [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(2): 275-278. (in Chinese)
- [8] FIETE R D, TANTALO T A, CALUS J R, et al. Image quality of sparse-aperture designs for remote sensing [J]. Optical Engineering, 2002, 41(8): 1957-1969.
- [9] DAME L. High resolution solar physics by interferometry SOLARNET [C] // Proceedings of a Crossroads for European Solar & Heliospheric Physics. Tenerife: ESA, 1998: 109-131.
- [10] WANG Da-yong, HAN Ji, LIU Han-cheng, et al. Imaging of optical sparse aperture systems and evaluate method [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(6): 1208-1212. (in Chinese)

(责任编辑 梁洁)