

# 光学稀疏孔径系统的成像及其图像复原

王大勇<sup>1</sup> 伏西洋<sup>1</sup> 郭红锋<sup>2</sup> 赵博<sup>2</sup> 郑怡嘉<sup>2</sup> 陶世荃<sup>1</sup>

(1 北京工业大学应用数理学院, 北京 100022)

(2 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

**摘要** 由多个小口径成像系统通过特殊排列综合而成的光学稀疏孔径系统是实现高分辨率天文目标成像观测的一种新方法. 建立了光学稀疏孔径系统的衍射受限非相干成像模型, 并针对某一具体的光学稀疏孔径系统, 运用图像复原维纳滤波器完成了系统成像和图像恢复处理的计算机仿真实验. 结果表明, 光学稀疏孔径系统可以等效实现单个大口径成像系统的成像观测效果.

**关键词** 稀疏孔径阵列; 高分辨率成像; 图像复原; 共相望远镜

**中图分类号** TH751; O43 **文献标识码** A

## 0 引言

衍射受限的光学望远镜系统口径越大, 它的空间分辨率就越高. 但由于单片式(指主镜)望远镜随着口径的增大, 系统的重量、体积和制造检测难度急剧增大, 从而导致非常高的费用, 甚至当口径大到一定程度时, 当前的技术根本制造不出来, 或难以发射到太空. 为了在不增加单个望远镜直径的前提下实现更高的分辨率, 人们开始研究各种基于多个子系统共相干涉的综合孔径成像方法, 包括甚长基线光干涉成像和光学稀疏孔径系统成像<sup>[1~7]</sup>. 这些成像系统在空间开发、地球观察、天文学等领域有着重要的应用.

由于光学稀疏孔径系统是通过多个相同的小成像系统构成的阵列, 此阵列在一定视场范围内允许低于某一空间频率的所有物空间信息通过, 从信息传递的角度看, 光学稀疏孔径系统可以等效实现传统单片式望远镜同样的观测效果, 即实现高空间分辨率. 同时光学稀疏孔径系统具有较大的视场, 理论上可以达到单个小成像系统的视场, 因而研究光学稀疏孔径系统具有特殊的意义<sup>[8~12]</sup>.

## 1 光学稀疏孔径系统成像的简化模型

光学稀疏孔径系统对遥远物体的成像过程可以等效为如图 1 所示的衍射受限非相干成像系统. 图中准单色平面光源  $\Sigma$  位于透镜  $L_1$  的前焦面  $x_0, y_0$  上, 用以模拟遥远物体光强分布; 观测区域  $\Sigma'$  位于透镜  $L_2$  的后焦面  $x_i, y_i$  上, 用以模拟像平面光强分布; 平面  $xy$  上的通光孔径  $P$ , 用来模拟光学稀疏孔径系统的光瞳函数; 参数  $f_0$  和  $f_i$  分别为透镜  $L_1$  的前焦距和透镜  $L_2$  的后焦距, 并且光源本身的线度和

观察区域的线度分别比  $f_0$  和  $f_i$  距离小得多.

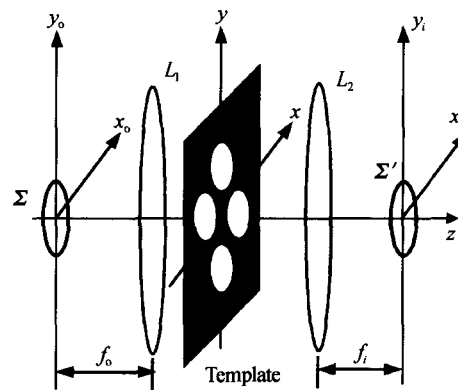


图 1 光学稀疏孔径系统的等效模型

Fig. 1 Equivalent model of an optical sparse-aperture system

假设遥远物体的几何理想像的光强分布为  $I_g(x_i, y_i)$ , 像平面光强分布为  $I_i(x_i, y_i)$ , 由傅里叶光学理论可知, 此系统物像光强度分布应满足下述卷积积分

$$I_i(x_i, y_i) = I_g(x_i, y_i) * \text{PSF}(x_i, y_i) \quad (1)$$

式中, 符号  $*$  表示卷积运算, PSF 为系统点扩散函数, 由式(2)给出

$$\text{PSF}(x_i, y_i) = |F\{P(x, y)\}|_{f_x = \frac{x_i}{\lambda f_i}, f_y = \frac{y_i}{\lambda f_i}} \quad (2)$$

式中,  $F\{\cdot\}$  表示傅里叶变换运算,  $P(x, y)$  为系统光瞳函数,  $\lambda$  为准单色光源的中心波长.

再令  $\tilde{I}_g(f_x, f_y)$  和  $\tilde{I}_i(f_x, f_y)$  分别为  $I_g(x_i, y_i)$  和  $I_i(x_i, y_i)$  的归一化频谱, 则通过对式(1)运用卷积定理可得

$$\tilde{I}_i(f_x, f_y) = \tilde{I}_g(f_x, f_y) \cdot \text{OTF}(f_x, f_y) \quad (3)$$

式中

$$\text{OTF}(f_x, f_y) = \frac{P(\lambda f_i f_x, \lambda f_i f_y) \star P(\lambda f_i f_x, \lambda f_i f_y)}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} P(x, y) dx dy} \quad (4)$$

为此系统的光学传递函数, 符号  $\star$  表示相关运算. 从式(4)可以看出, 此系统的光学传递函数只在一有

限范围内不为零,并且在某一频率后光学传递函数的值将单调下降直至为零.

## 2 光学稀疏孔径系统的重构算法

由于光学稀疏孔径系统的孔径只是对其等效单个大孔径成像系统孔径的部分填充,所以系统的点扩展函数将会有相当程度的扩展;与等效的单个大孔径成像系统光学传递函数相比较,系统对中低空间频率成分的响应将降低,以致于成像结果较之其等效的单个大孔径系统所成像模糊,必须对其成像结果进行重构才能获得清晰的图像.

在光学稀疏孔径系统成像过程中,不可避免地会引入各种各样的噪声,假设为遍历性并且与物平面光强分布无关的加性噪声  $\text{Noise}(x_i, y_i)$ , 则有

$$I_i(x_i, y_i) = I_g(x_i, y_i) * \text{PSF}(x_i, y_i) + \text{Noise}(x_i, y_i) \quad (5)$$

$$\tilde{I}_i(f_x, f_y) = \tilde{I}_g(f_x, f_y) * \text{OTF}(f_x, f_y) + \text{Noise}(f_x, f_y) \quad (6)$$

式中,  $\text{Noise}(f_x, f_y)$  为系统的噪声功率谱. 通常可以认为噪声的功率谱随频率升高而下降的趋势要比典型的图像功率谱慢得多,故不能对式(5)两边直接去卷积,因为这样做将使占据高频主要部分的噪声被放大以使得图像失真.

想设计一个既去卷积又抑制噪声的滤波器  $w(x_i, y_i)$ , 用它和  $I_i(x_i, y_i)$  卷积, 以得到与遥远物体非常接近的复原图像  $\hat{I}_i(x_i, y_i)$ , 其示意图如图 2.

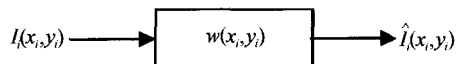


图 2 图像复原流程图

Fig. 2 The sketch map of image reconstruction

如果以复原图像与遥远物体之间的均方误差作为复原滤波器优劣的标准,则滤波器为维纳去卷积滤波器<sup>[4,5]</sup>,相应地,在频率域可以推导出光学稀疏孔径系统的最优复原滤波器的传递函数

$$W(f_x, f_y) = \frac{\text{OTF} * (f_x, f_y)}{|\text{OTF}(f_x, f_y)|^2 + \left| \frac{\text{Noise}(f_x, f_y)}{\tilde{I}_g(f_x, f_y)} \right|^2} \quad (7)$$

式中,  $\text{Noise}(f_x, f_y)$  为噪声的功率谱. 上式即为维纳去卷积滤波器<sup>[4,5]</sup>. 如果无法得知物平面光强分布和加性噪声的统计特性,也可以用常数  $K$  来近似物平面光强分布和加性噪声二者功率谱的比值. 此时,因为噪声功率谱接近为白噪声,可认为是常数;而原图像功率谱明显不是常数,故采用常数  $K$  近似会影响复原质量,不可能达到最佳复原,但这种常数的近似方法在实际应用中有一定的方便之处. 例如在需要复原的退化图像中往往会有部分图像具有先

验知识(如几个点、线或台阶等),这些先验知识可以通过其它观察手段得到,那么用这些先验知识做判断,调整  $K$  值,找到最合适复原的  $K$  值. 然后就可以用该  $K$  值方便地对具有类似图像和类似噪声条件下的同类退化图像进行复原,复原效果将会满足需要.

因此只要对观测图像  $I_i(x_i, y_i)$  的频谱用式(7)进行频域滤波,再对滤波结果进行傅里叶逆变换即可求得清晰的复原图像  $\hat{I}_g(x_i, y_i)$ . 整个光学稀疏孔径系统成像和图像复原过程如图 3.

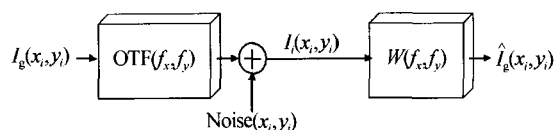


图 3 光学稀疏孔径系统成像及复原过程

Fig. 3 Imaging and image reconstruction of optical sparse-aperture systems

## 3 光学稀疏孔径系统的计算机模拟

模拟的光学稀疏孔径系统由三个相同的衍射受限子望远镜成像系统构成,每个子望远镜成像系统的口径均为 350 mm,三个子系统的光轴同时位于直径 600 mm 的圆周上,呈等边三角形均匀分布,整个系统可以等效成直径约为 1 m 的单口径成像系统,其立体光学结构示意图如图 4.

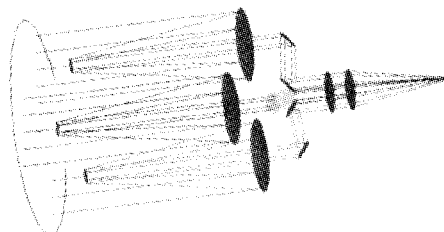


图 4 光学稀疏孔径系统三维结构

Fig. 4 Three-dimensional optical structure chart of a sparse-aperture system

用此系统对图 5 所示的遥远目标成像进行仿真实验(假设此目标分布区域在系统允许范围内,这样可不考虑视场的影响),并在像平面上叠加方差为 0.01 的高斯噪声,叠加上高斯噪声后的图像所有点

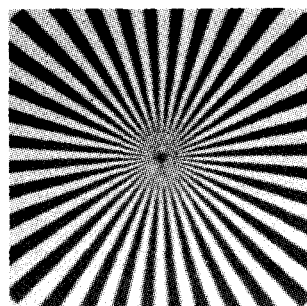


图 5 遥远目标图像

Fig. 5 Remote object image

的强度平均值和叠加高斯噪声前图像所有点的强度平均值相同,其最终成像结果为图 6 所示的模糊图像(图 7、图 8 为相同情况下 1 m 和 0.35 m 直径的单个孔径的衍射受限成像系统分别对图 5 的观测结果).

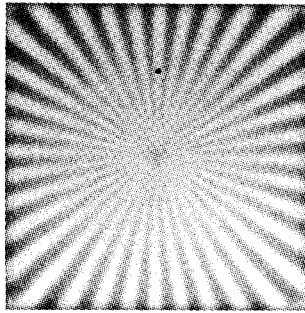


图 6 稀疏孔径系统直接成像结果  
Fig. 6 Imaging result of a sparse-aperture system

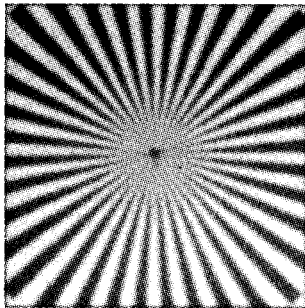


图 7 等效填充系统成像结果  
Fig. 7 Large filled system's imaging result

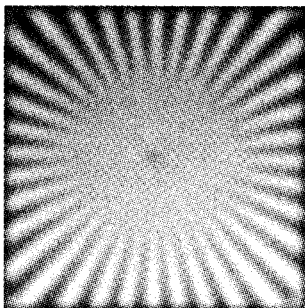


图 8 单个填充子系统成像结果  
Fig. 8 Small filled system's imaging result

用维纳去卷积滤波算法对图 6 进行图像重构,可以恢复出清晰的目标图像,如图 9;对比图 9 和图

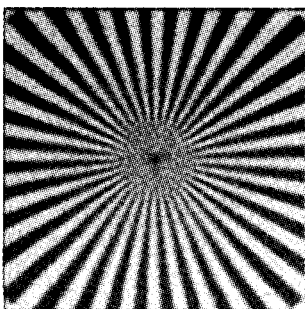


图 9 对图 6 中的结果维纳去卷积滤波输出  
Fig. 9 Wiener deconvolution filtered output of Fig. 6

7 可以看出,由小孔径成像系统组成的光学稀疏孔径系统配上合适的图像复原滤波器能够实现大孔径

成像系统的观测效果.

## 4 结论

建立了光学稀疏孔径系统的简化成像模型,并给出了该系统在均方误差意义上的图像复原最优滤波器,最后针对某一特定光学稀疏孔径系统的成像和图像复原处理进行了计算机仿真实验.实验结果表明,用光学稀疏孔径系统实现单个大孔径的成像观测效果是完全可行的.

## 参考文献

- 1 Loreggia D, Gardiol D, Gai M, *et al.* Fizeau interferometer for global astrometry in space. *Applied Optics*, 2004, **43**(4): 721~728
- 2 Przygodda F, Blöcker T, Hofmann K-H, *et al.* Computer simulations of interferometric imaging with the very large telescope interferometer and its astronomical multibeam recombiner instrument. *Optical Engineering*, 2001, **40**(5): 753~760
- 3 Harvey J E, Kotha A, Phillips R L. Image characteristics in applications utilizing dilute subaperture arrays. *Applied Optics*, 1995, **34**(16): 2983~2992
- 4 Nakajima T, Matsuhara H. Sensitivity of an imaging space infrared interferometer. *Applied Optics*, 2001, **40**(4): 514~526
- 5 王海涛,周必方. 光学综合孔径望远镜阵的光束组合器. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1109~1115  
Wang H T, Zhou B F. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1109~1115
- 6 孙强,刘宏波,王肇圻,等. 红外折射/衍射超常温光学系统. *光子学报*, 2003, **32**(4): 466~469  
Sun Q, Liu H B, Wang Z Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 466~469
- 7 樊学武,马卫红,陈荣利,等. 具有二次像面的三反射光学系统的研究. *光子学报*, 2003, **32**(8): 1001~1003  
Fan X W, Ma W H, Chen R L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 1001~1003
- 8 Meinel A B, Meinel M P. Large sparse-aperture space optical systems. *Optical Engineering*, 2002, **41**(8): 1983~1994
- 9 Fieta R D, Tantaló T A, Calus J R, *et al.* Image quality of sparse-aperture designs for remote sensing. *Optical Engineering*, 2002, **41**(8): 1957~1969
- 10 Fienup J R. MTF and integration time versus fill factor for sparse -aperture imaging systems. *Proc SPIE*, 2000, **4091**: 43~47
- 11 Hainaut C R D, Duneman D C, Dymale R C, *et al.* Wide field performance of a phased array telescope. *Optical Engineering*, 1995, **34**(3): 876~880
- 12 陈荣利,张禹康,樊学武,等. 空间高分辨率 CCD 相机

次镜支架最佳结构设计. 光子学报, 光子学报, 2004, 33  
(10):1251~1254

Chen R L, Zhang Y K, Fan X W, *et al.* *Acta Photonica  
Sinica*, 2004, 33(10):1251~1254

## Imaging and Image Reconstruction of Optical Sparse-Aperture Systems

Wang Dayong<sup>1</sup>, Fu Xiyang<sup>1</sup>, Guo Hongfeng<sup>2</sup>, Zhao Bo<sup>2</sup>, Zhen Yijia<sup>2</sup>, Tao Shiquan<sup>1</sup>

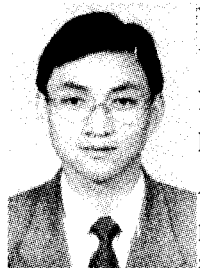
1 *College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100022*

2 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Science, Beijing 100012*

Received date: 2004-08-03

**Abstract** Optical sparse-aperture system can be designed to obtain high resolution in astronomical object imaging. It is a particular array synthesized by several small filled imaging systems. A diffraction-limited incoherent imaging model is proposed for sparse-aperture systems. Under the premise that the noise of sparse-aperture system can be regarded as ergodic random noise, and is uncorrelated to the object, then an optimum image reconstruction filter is given for sparse-aperture system in a sense of mean square errors. Finally, computer simulations of imaging and image reconstruction of a specific sparse-aperture system are performed by using the model and the filter. These numerical experiments indicate that optical sparse-aperture systems can achieve almost the same resolution and image quality as an equivalent filled system.

**Keywords** Sparse-aperture array; High resolution imaging; Image reconstruction; Phased telescopes



**Wang Dayong** received his B. S. degree in optical engineering in 1989 from Huazhong University of Science and Technology, and his Ph. D. degree in physics in 1994 from Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. From 1994 to 1996 he worked as a postdoctor in Xidian University. In 1996 he joined the Department of Applied Physics, Beijing University of Technology (BJUT). Since 2000, he has been a professor in the College of Applied Sciences, BJUT. His research interests include optical information processing, optical storage, holography and diffractive optical elements. Dr.

Wang is a member of COS, SPIE, and OSA.