

光学稀疏孔径成像系统复合阵列设计的仿真研究*

赵娟,王大勇[†],万玉红,江竹青,陶世荃

(北京工业大学 应用数理学院,北京 100124)

摘 要:在典型环形、典型 Golay-6 型和典型 Y 型阵列结构的基础上,研究了两种不同的复合孔径阵列构造方式.利用仿真实验对系统进行模拟成像及图像重构,并运用相关系数对成像结果进行评价.结果表明:对不同类型的复合孔径阵列,构造方式对成像质量的影响是不同的,并不具有一致规律;应针对主阵列结构的特征去选择其子阵列的构造方式,做到阵列优化.

关键词:稀疏孔径;光学成像系统;复合孔径阵列;相关系数;仿真

中图分类号:TH751;O43

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2009)08-1967-5

0 引言

随着空间探索和天文研究的不断推进,需要越来越高的观测精度和分辨天体细节的能力,这使得不断提高望远镜的空间分辨率成为迫切的要求.由于传统单片式(指主镜)望远镜的空间分辨率与其口径有关(越高的空间分辨率需要越大的口径),而随着望远镜口径的增大,整个系统的重量、体积和制造检测难度急剧增大,从而导致了非常高的费用,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.8 m 的地基系统和 2.4 m 的哈勃望远镜(空基系统)在当前被认为已经达到了系统设计和经济承受的极限.在不增加单个望远镜直径的前提下,可实现更高的分辨率光学稀疏孔径成像系统得到了广泛的研究^[1-7].这种成像系统在空间开发、地球观测、天文学等领域有着重要的应用.

光学稀疏孔径阵列结构对子孔径口径 8 m 以内的系统可以适用,如果口径再增大,同样会受到限制.为解决这一问题,研究人员提出了复合孔径阵列结构系统^[8-9],前期工作已经证实,在相同填充因子的条件下,经过图像复原后复合孔径阵列结构较典型孔径阵列结构获得更高的分辨率和成像质量,是得到甚高分辨率的一种有效手段^[10].另外,复合孔径阵列结构可通过复制的方式能够使光学系统的等效口径根据实际需要进行扩大,便于调试和安装,因此对复合孔径阵列结构的研究是很有意义的.本文在典型阵列结构的基础上,提出了两种不同类型的复合孔径阵列构造方式,利用数值仿真对其进行直接成像及图像重构,主要研究了不同构造方式对成

像结果的影响.

1 光学稀疏孔径成像系统的基本理论

1.1 光学稀疏孔径成像系统的简化模型

光学稀疏孔径系统对遥远物平面成像过程可以等效为非相干成像系统,考虑衍射受限情况,则对于由相同小孔径系统构成的光学稀疏孔径成像系统,光瞳函数可以表示为

$$P(x, y) = P_0(x, y) * \sum_{n=1}^N \delta(x - \bar{x}_n, y - \bar{y}_n) \quad (1)$$

式中, (\bar{x}_n, \bar{y}_n) 为第 n 个小孔径系统光瞳函数的中心坐标, $P_0(x, y)$ 为系统的小孔径的光瞳函数.则,系统点扩散函数可由式(2)表示

$$\text{PSF}(x_1, y_1) = |F\{P(x, y)\}|^2 \quad (2)$$

假设遥远物平面光强分布几何光学的理想像为 $I_g(x_i, y_i)$, 并且遥远物体发出中心波长为 $\bar{\lambda}$ 的准单色光,像平面光强分布为 $I_i(x_i, y_i)$, 对于线性空间不变非相干成像系统,物像光强度分布应满足下述卷积积分,

$$I_i(x_i, y_i) = I_g(x_i, y_i) * \text{PSF}(x_i, y_i) \quad (3)$$

在频域中,可令 $\tilde{I}_g(f_x, f_y)$ 和 $\tilde{I}_i(f_x, f_y)$ 分别为 $I_g(f_x, f_y)$ 和 $I_i(x_i, y_i)$ 的归一化频谱,则通过对式(3)运用卷积定理可得

$$\tilde{I}_i(f_x, f_y) = \text{OTF}(f_x, f_y) \cdot \tilde{I}_g(f_x, f_y) \quad (4)$$

式中,OTF 为此系统的光学传递函数,是点扩散函数 PSF 的傅里叶变换,它的模为调制传递函数(MTF),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.

1.2 复合孔径阵列

讨论表明,光学稀疏孔径阵列结构形式决定了系统的光瞳函数,从而决定了系统的光学传递函数分布,也就导致相应的系统成像特性.下面给出六种复合孔径阵列模型并对其调制传递函数进行分析.

复合孔径阵列是一种建立在典型光学稀疏孔径

* 国家自然科学基金(60577029)北京市委组织部优秀人才培养(20051D0501523)和北京市属市管高等学校人才强教计划资助

[†] Tel: 010-67392084

Email: wdyong@bjut.edu.cn

收稿日期: 2008-07-11

修回日期: 2008-09-25

阵列基础上的阵列结构. 如果典型阵列结构中的孔径又由某种阵列结构组成, 这样就构成了复合孔径阵列结构, 我们称典型阵列结构为主阵列结构, 单个孔径中的阵列结构为子阵列结构. 子阵列可以是相同的也可以是不同的, 一般取相同的阵列, 这样, 就可以通过复制的方式将光学系统的等效孔径扩大. 复合阵列的构成一般有两种方式: 子阵列正置型(I型)、子阵列旋转对称型(II型). 图 1(a)中分别给出了主阵列为典型环形、典型 Golay6 型和典型 Y 型, 子阵列均为 Golay3 型且子阵列对称轴方向一致的复合阵列 I 型结构. 图 1(b)中对应的给出了主阵列为典型环形、典型 Golay6 型和典型 Y 型, 子阵列均为 Golay3 型且子阵列以主阵列圆心为对称中心排列的复合阵列 II 型结构. D 为等效单孔径的直径, d 为通光孔径的直径, N 为通光孔径个数, 图中 $N=18$.

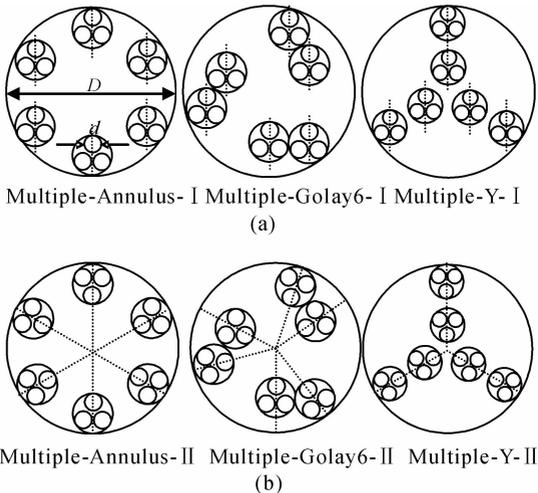


图 1 六种光学稀疏孔径复合阵列结构
Fig. 1 Six multiple-array configuration

如图 2, 为了对光学稀疏孔径成像系统的 MTF 有直观的了解, 下面给出了上述六种复合孔径阵列的 MTF 沿最大和最小截止频率方向的截面图. 系统参量为: $D=10\text{ m}$, $F\# = 20$, $F = 20\%$, $N = 18$, $d=1.0541\text{ m}$. 为了对比, 同时也给出了等效单孔径系统的 MTF 曲线.

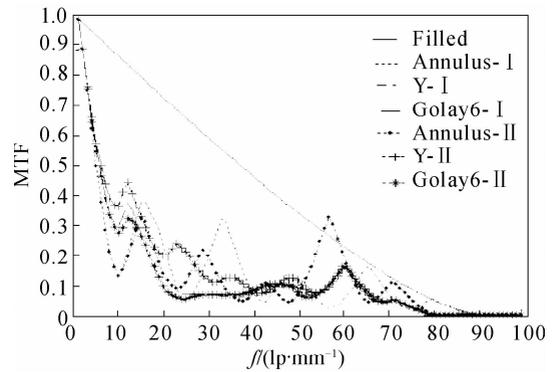
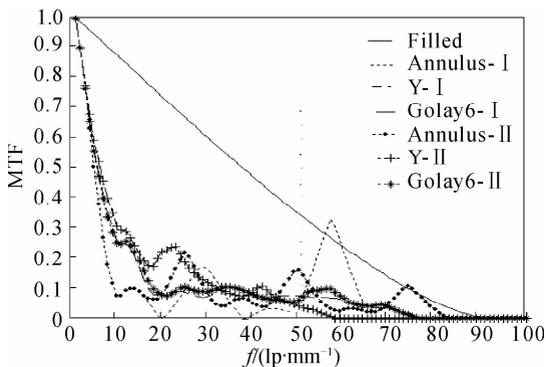


图 2 复合孔径阵列和等效单孔径系统的 MTF 截面
Fig. 2 MTF curves of six multiple-array configuration of the sparse aperture system and their equivalent filled system

从图 2 中可以看出, 与等效单孔径系统的 MTF 相比, 稀疏孔径系统的 MTF 随空间频率的增大在中低频部分下降较快, 在中高频部分总体较平坦, 但有适当起伏. 由于 MTF 是归一化函数, 所以在某些频率区间稀疏孔径系统的 MTF 有可能大于等效单孔径的 MTF 值. 对上述六种复合孔径阵列结构按照其主阵列的类型分类比较, 可以看出: 复合 Y 型阵列 I 型结构和 II 型结构的 MTF 曲线几乎重合, 由此可判断, 两种结构可获得相近的成像质量; 而对于复合环形和复合 Golay-6 型阵列, I 型和 II 型两种结构的 MTF 曲线差异较大, 其成像结果预期将表现出较大的不同, 仅凭借 MTF 曲线无法给出完整的客观评价, 应采取其他方法评价. 需要注意的是, 复合环形阵列 I 型结构的 MTF 曲线在截止频率之前出现了零点, 这在阵列优化过程中是应该避免的.

1.3 图像复原

由于光学稀疏孔径系统的孔径只是对单个大孔径系统的部分填充, 所以系统直接输出的图像是低对比度的模糊图像, 为获得与等效单个大孔径系统相当的成像质量, 必须对直接输出的图像进行图像复原后处理^[11]. 实际中, 通常在频率域使用维纳滤波器进行图像复原,

$$W(f_x, f_y) = \frac{OTF^*(f_x, f_y)}{|OTF(f_x, f_y)|^2 + \frac{N(f_x, f_y)}{I_g(f_x, f_y)}} \quad (5)$$

式中, $OTF^*(f_x, f_x)$ 为 $OTF(f_x, f_x)$ 的复数共轭; $N(f_x, f_x)$ 为噪声频谱.

1.4 相关系数评价方法

对于实际的空间成像, 图像的质量好坏不能完全依赖于主观观察, 应还需要客观的评价方法. 由于光学稀疏孔径系统传递函数的复杂性, 仅凭借调制传递函数(MTF)曲线无法给出完整的客观评价. 因此, 对于稀疏孔径成像系统需要一个客观的全局判

定方法.我们使用相关系数^[12]来评价成像复原结果的质量,相关系数的定义式为

$$c = \frac{E[(f(x,y) - E[f(x,y)])(\hat{f}(x,y) - E[\hat{f}(x,y)])]}{\sqrt{E[f^2(x,y)] - (E[f(x,y)])^2} \cdot \sqrt{E[\hat{f}^2(x,y)] - (E[\hat{f}(x,y)])^2}} \quad (6)$$

式中, $E[\]$ 表数学期望 $f(x,y)$ 、 $\hat{f}(x,y)$ 分别为理想图像和待评价图像.若相关系数越趋近于1,则待评价图像与理想图像越相似;反之,待评价图像与理想图像的偏差越大.在本文的研究中,主要考虑光学稀疏孔径系统的成像性能能够逼近其等效的单个大孔径系统成像性能的程度,采用的是等效单个大孔径的成像结果作为理想参照图像.

2 复合孔径阵列结构成像的数值仿真

对上述六种复合孔径阵列结构按照其主阵列的类型分类,通过数值仿真比较同种主阵列结构中子阵列排布的不同对成像结果的影响.系统参量为: $D=10\text{ m}$, $F\# = 20$, $F=20\%$, $N=18$, $d=1.0541\text{ m}$.目标图像为含高斯噪音(均值为0,方差为0.001)的灰度图像,如图3.为了对比,这里还给出了等效单孔径成像的结果,如图4.



图3 目标图像
Fig.3 Object image



图4 等效单孔径直接成像结果
Fig.4 Imaging results of equivalent filled system

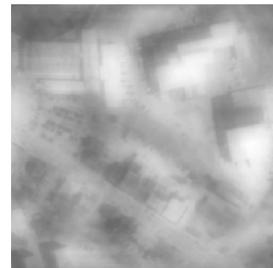
利用光学稀疏孔径成像的简化模型,完成了六

种复合阵列的成像和图像复原仿真.结果如图5~图7.图5为复合环形阵列成像结果.其中5(a)和(b)分别为复合环形I型阵列的直接成像结果和经过维纳滤波复原后的结果,5(c)和(d)分别为复合环形II型阵列的直接成像结果和维纳复原结果.同样,图6和图7也相应给出了当主阵列分别为Golay6型和Y型时,不同子阵列排布所得到的直接成像结果和复原结果.通过观察图像可以看出:所有六种复合孔径阵列结构的直接成像结果较模糊,经复原后的图像质量均有明显改善,更加接近单孔径的成像



(a) Direct image of model I

(b) Restored of (a)



(c) Direct image of model II



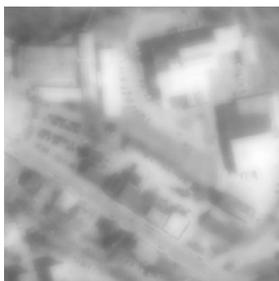
(d) Rstored of (c)

图5 复合环形阵列成像结果
Fig.5 Imaging results of multiple-annulus configuration of the sparse aperture system



(a) Direct image of model

(b) Restored of (a)



(c) Direct image of model II



(d) Rstored of (c)

图6 复合Golay6型阵列成像结果
Fig.6 Imaging results of multiple-golay6 configuration of the sparse aperture system

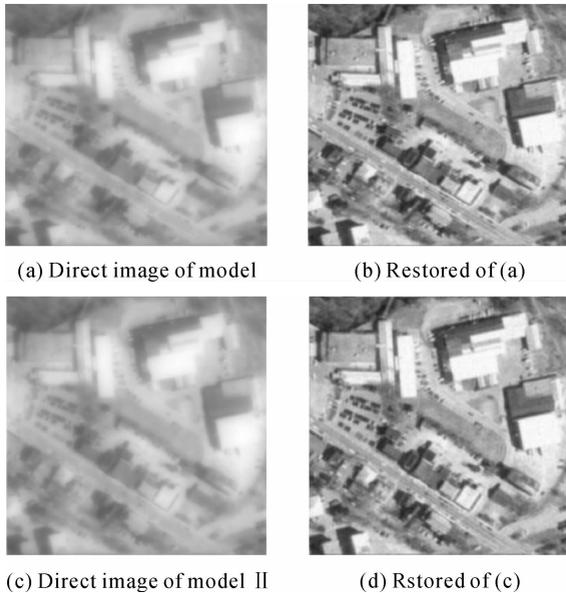


图7 复合Y型阵列成像结果

Fig. 7 Imaging results of multiple-Y configuration of the sparse aperture system

质量. 总体而言, 复合Y型阵列获得最好的成像质量, 复合环形阵列结构成像质量最差. 在填充因子相同的情况下, 成像质量的差异主要是由主阵列的结构决定, 不同的子阵列构造方式只能在有限程度上改善图像质量. 当主阵列结构相同时, 对于两种不同子阵列排布方式, 即I型结构和II型结构成像结果的差异, 是很难从直接视觉观测中分辨出来, 为进一步定量评价系统的成像质量, 对仿真成像结果计算了复合孔径阵列结构成像结果与等效单孔径系统成像结果之间的相关系数, 具体结果如表1.

表1 复合孔径阵列结构成像结果与等效单孔径系统成像结果之间的相关系数

阵列结构		相关系数	
主阵列	子阵列	直接成像	维纳滤波
环形	I型	0.876 0	0.986 2
	II型	0.871 9	0.991 1
Golay6	I型	0.918 6	0.995 8
	II型	0.917 1	0.995 1
Y型	I型	0.941 1	0.998 1
	II型	0.941 1	0.998 1

复原图像的相关系数比直接成像的相关系数有明显提高. 复合环形阵列中, II型结构较I型结构获得更高的相关系数; 复合Golay6型阵列中, I型结构较II型结构获得较高的相关系数; 复合Y型结构结果相同.

3 结论

复合孔径阵列结构是扩展孔径阵列大小以得到甚高分辨率的一种有效手段. 本文在典型环形、典型Golay6型和典型Y型阵列结构的基础上, 研究了两种不同类型的复合孔径阵列构造方式: 子阵列正置型(I型)和子阵列旋转对称型(II型). 在相同填充因子的情况下, 对系统进行模拟成像及图像重构, 运用相关系数对成像结果进行评价. 结果表明, 在填充因子相同的情况下, 成像质量的差异主要是由主阵列的结构决定, 不同的子阵列构造方式只能在有限程度上改善图像质量. 复合环形阵列中II型较I型获得更好的成像质量; 复合Golay6型阵列中I型较II型获得更好的成像质量; 复合Y型结构结果相近. 从以上数据中可以分析, 相同类型的主阵列结构, 不同的子阵列构造方式有可能得到不同的成像结果, 不能笼统地认为某一种构造方式比另一中构造方式好, 应针对不同类型的复合阵列结构去选择其子阵列的构造方式, 做到阵列的优化.

参考文献

参考文献

- [1] 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.
- [2] CHUNG S J, MILLER D W, WECK O L. ARGOS testbed: study of multidisciplinary challenges of future spaceborne interferometric arrays[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(9): 2156-2167.
- [3] KENDRICK R L, AUBRUN J N, BELL R, *et al.* Wide-field Fizeau imaging telescope: experimental results[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(18): 4235-4240.
- [4] WANG Zhi-le, ZHANG Wei, LONG Fu-nian. Image quality evaluation for diffraction-limited optical synthetic aperture system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 35-39.
王治乐, 张伟, 龙夫年. 衍射受限光学合成孔径成像系统像质评价[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 35-39.
- [5] JIANG Yue-song. Size effects of sub-aperture on imaging of linear array of optical synthetic aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1042-1047.
江月松. 直线阵光学综合孔径成像中的子孔径尺寸效应[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1042-1047.
- [6] WANG Hai-tao, ZHOU Bi-fang. Beam combiner in optical aperture synthesis telescope Array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1109-1115.
王海涛, 周必方. 光学综合孔径望远镜阵的光束组合器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1109-1115.
- [7] FAN Wei-jun, ZHOU Bi-fang, XIA Liang-zheng, *et al.* Extracting optical aperture synthesis observation objective fourier information based on least-squares approach [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 472-475.
范伟军, 周必方, 夏良正, 等. 基于最小二乘法准则的光学综合孔径观测目标傅里叶信息提取[J]. *光子学报*, 2004, **33**(4): 472-475.
- [8] HAN Ji, WANG Da-yong, LIU Han-cheng, *et al.* Multiple-array configuration design of optical sparse-aperture imaging system [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2007, **18**(6): 649-652.
韩骥, 王大勇, 刘汉承, 等. 光学稀疏孔径成像系统复合孔径阵

- 列结构研究[J]. 光电子激光, 2007, **18**(6): 649-652.
- [9] WU Quan-ying, QIAN Lin, SHEN Wei-min. Imaging research on sparse-aperture systems of symmetrical configuration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8): 1259-1262.
- 吴泉英, 钱霖, 沈为民. 两种对称型稀疏孔径系统的成像研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(8): 1259-1262.
- [10] ZHAO Juan, WANG Da-yong, HAN Ji, *et al.* Imaging analysis of optical sparse aperture systems with multiple-array configuration designs[C]. *SPIE*, 2007, **6834**: 68340D.
- [11] WANG Da-yong, HAN Ji, LIU Han-cheng, *et al.* Experimental study on imaging and image restoration of optical sparse aperture systems[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(10): 103201.
- [12] 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.
- 王大勇, 伏西洋, 郭红锋, 等. 光学稀疏孔径系统的成像及其图像复原[J]. 光子学报, 2005, **34**(10): 1557-1560.

Imaging Analysis of Optical Sparse Aperture Systems With Different Multiple-array Configuration Design

ZHAO Juan, WANG Da-yong, WAN Yu-hong, JIANG Zhu-qing, TAO Shi-quan
(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Based on the traditional array configuration, including the annulus, Golay-6 and the Tri-arm, two ways for designing multiple-array configurations are investigated. Then the simulation with the multiple-array configurations are fulfilled with the specific system parameters. The direct imaging results and the restored images are obtained. By using the correlation coefficient as the evaluation criterion of imaging, the results show that different designs of the multiple-array configurations may produce the different quality of the imaging. It should consider the characteristics of the main-array to choose its sub-array configuration and to optimize the array.

Key words: Sparse aperture; Optical imaging; Multiple-array configuration; Correlation coefficient; Numerical simulation



ZHAO Juan has been M. S. degree candidate at College of Applied Sciences, Beijing University of Technology since 2006. Her research interests include optical information processing and digital image processing.