

两种对称型稀疏孔径系统的成像研究*

吴泉英^{1,2} 钱霖^{1,3} 沈为民¹

(1 苏州大学江苏省现代光学技术重点实验室, 苏州 215006)

(2 苏州科技学院实验中心, 苏州 215009)

(3 苏州大学物理科学与技术学院光电系, 苏州 215006)

摘 要 提出了复合三子镜稀疏孔径结构, 它由九个子镜组成, 每三个子镜组成一个次级光瞳, 三个次级光瞳组成一个主光瞳, 其结构是对称的冗余结构. 研究了三臂和复合三子镜两种对称型结构稀疏孔径系统, 比较复合三子镜和三臂结构的特点与调制传递函数, 对不同填充因子的两种结构的稀疏孔径模拟成像和维纳滤波, 并进行像质评价, 同时和非冗余的 Golay6 结构进行比较. 结果表明: 复合三子镜稀疏孔径系统在结构分布、成像质量等方面优于三臂对称结构稀疏孔径系统, 对称型稀疏孔径系统在结构排列上具有对称易装调的优点.

关键词 空间遥感; 稀疏孔径; 对称结构; 调制传递函数

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

0 引言

航天遥感技术的不断发展, 要求光学系统的空间分辨率越来越高. 分辨率提高, 光学系统的口径需要增大, 但口径增大受材料、工艺和重量等因素的制约. 因此, 人们开始研究稀疏孔径系统^[1~5]. 稀疏孔径系统是由各个子孔径按一定规律组合而成, 各个子孔径的口径比整个全口径口径小, 克服了大口径光学系统在制造等方面的困难. 稀疏孔径结构有环型、环面、三臂、Golay 结构等^[1]. 其中, 除 Golay 型是非冗余的结构外, 其余都是有一定冗余度的对称型结构. 本文提出的复合三子镜^[6]是一种高冗余度的稀疏孔径结构, 它与 Golay9 结构的成像比较已有另文发表^[7]. 本文着重研究复合三子镜与其它对称型稀疏孔径系统的成像比较, 具体讨论复合三子镜和三臂两种对称型稀疏孔径的结构形式、调制传递函数(MTF)分布、模拟成像, 以及维纳滤波图像处理, 并和 Golay6 结构进行了比较.

1 两种对称型稀疏孔径结构

1.1 结构形式

三臂结构的子镜以 Y 形排列合成一个大孔径结构, 每条臂上可有若干个子镜. 本文以每臂三个子镜, 共七个子镜的三臂结构为例(如图 1). 复合三子镜结构由九个子镜构成^[6], 每三个子镜组合成一个三子镜结构的次级光瞳, 直径 D_1 ; 三个次级光瞳

又组合成一个大孔径光瞳(又称包围孔径, 如图 2). 由图可见, 这两种结构均以 Y 轴对称, 也以圆心 120° 旋转对称.

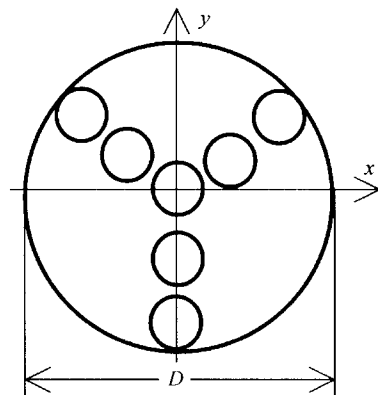


图 1 三臂结构图
Fig. 1 Configuration of three arms sparse aperture

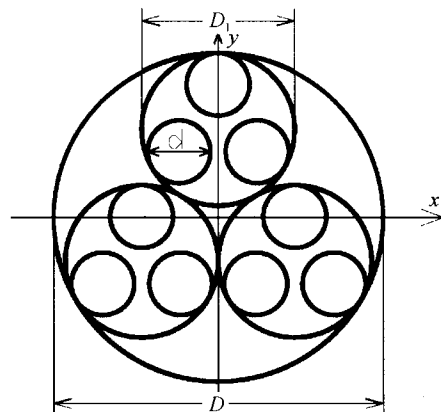


图 2 复合三子镜结构
Fig. 2 Configuration of dual three sub-apertures

令稀疏孔径系统中子镜直径为 d 、包围孔径直径为 D , 定义填充因子 $F = \frac{m \times d^2}{D^2}$, m 为子镜数目.

三臂结构的最大填充因子 $F = \frac{9m}{(2m+1)^2}$, 7 个子镜

* 江苏省自然科学基金(批准号: BK2004202)、高等学校博士学科点专项科研基金(课题号: 20040285001)和江苏省现代光学技术重点实验室开放课题资助(课题号: T8108030)
Tel: 0512-68096352 Email: wqycyh@tom.com
收稿日期: 2005-10-09

的三臂结构 $F_{\max}=28\%$ ，10个子镜的三臂结构 $F_{\max}=20.4\%$ ，而复合三子镜的最大填充因子可达到 41.75% 。所以，复合三子镜可选择的填充因子动态范围远大于三臂结构。

1.2 调制传递函数分析

设子镜直径为 d 的非相干衍射限的调制传递函数 F_{MTd} 为^[8]

$$F_{\text{MTd}} = \frac{2}{\pi} \left(\arccos \frac{\rho}{\rho_{dc}} - \frac{\rho}{\rho_{dc}} \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_{dc}} \right)^2 \right]^{1/2} \right) \quad (0 \leq \rho \leq \rho_{dc})$$

$$F_{\text{MTd}} = 0 \quad (\rho > \rho_{dc}) \quad (1)$$

$$\rho_{dc} = d/\lambda f$$

式中 ρ_{dc} 是直径为 d 的子镜的截止频率，则稀疏孔径系统的调制传递函数为

$$F_{\text{MT}} = F_{\text{MTd}} + \frac{1}{m} \times F_{\text{MTd}} * \sum_i \sum_j \delta \left(u - \frac{x_i - x_j}{\lambda f}, v - \frac{y_i - y_j}{\lambda f} \right) \quad (2)$$

式中 $(x_i - x_j, y_i - y_j)$ 表示子孔径相对位置。

由式(2)可见，稀疏孔径的调制传递函数由子镜的调制传递函数组合而成。子镜之间的相对距离决定子调制传递函数在频率域内放置的径向位置；子镜之间的相对方位决定子调制传递函数在频率域内放置的角度方向，这表明不同的子镜排列结构对应于不同的调制传递函数。

复合三子镜和三臂稀疏孔径 MTF 二维分布分别如图 3 和图 4，两种结构的调制传递函数在二维频谱域内呈对称分布。复合三子镜的 MTF 按六边形对称分布，在各个方向上差别远小于三臂结构，当填充因子为 28% 时，在 $\pi/6$ 的奇数倍方向上截止频率为 $0.76 \rho_{DC}$ ， ρ_{DC} 是直径为 D 的包围孔径的截止频率；在 $\pi/3$ 的整数倍方向上截止频率为 $0.87 \rho_{DC}$ 。复合三子镜的冗余度较高，其调制传递函数分布不均匀，MTF 值起伏明显是它的缺点。但随之而来也带来优点，它的 MTF 值较高。三臂结构的 MTF 按六角形对称分布，在各个方向上差别很大，当填充因子为 28% 时，在 $\pi/6$ 的奇数倍方向上截止频率为 $0.60 \rho_{DC}$ ，在 $\pi/3$ 的整数倍方向上截止频率为 $0.89 \rho_{DC}$ 。

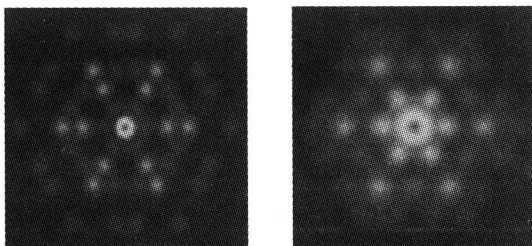


图3 复合三子镜二维 MTF 图 ($F=10\%, 28\%$)
Fig. 3 Two dimensional MTF of dual three sub-apertures ($F=10\%, 28\%$)

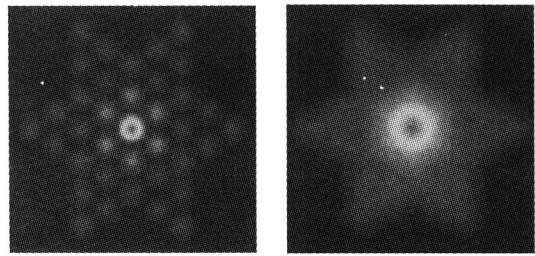


图4 三臂结构二维 MTF 显示 ($F=10\%, 28\%$)
Fig. 4 Two dimensional MTF of three arms ($F=10\%, 28\%$)
复合三子镜与三臂结构在 $\pi/6$ 和 $\pi/3$ 方向上 MTF 值比较曲线见图 5。

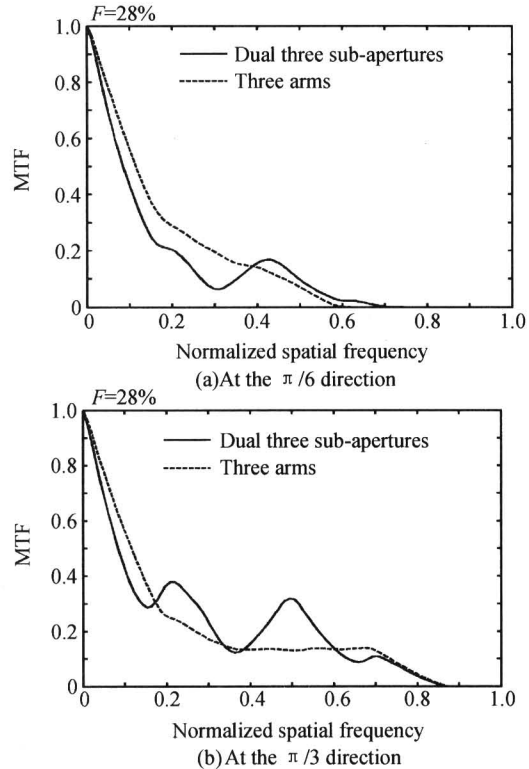


图5 复合三子镜和三臂结构在 $\pi/6$ 奇数倍和 $\pi/3$ 整数倍方向上 MTF 曲线图
Fig. 5 MTF curves of dual three sub-apertures and three arms at the $\pi/6$ direction and at $\pi/3$ direction

2 成像研究

2.1 模拟成像

将一幅鉴别率板(如图 6 和图 7)作为目标物在 ZEMAX 光学软件下进行仿真模拟成像。成像光学系统采用上述两种对称型稀疏孔径系统，不考虑像差，波长 550 nm 。对应包围孔径的相对孔径为 $1:20$ ，理论截止频率 91 lp/mm 。图中 F 为稀疏孔径系统的填充因子。

模拟成像结果如图 6，图 7。就总体而言，复合三子镜模拟像的对比度高于三臂结构模拟像的对比度。按各不同空间频率对照分析，在空间频率 $10 \sim 28 \text{ lp/mm}$ 处，三臂结构模拟像的对比度高于复合三子镜模拟像；当空间频率高于 32 lp/mm 时，三臂结

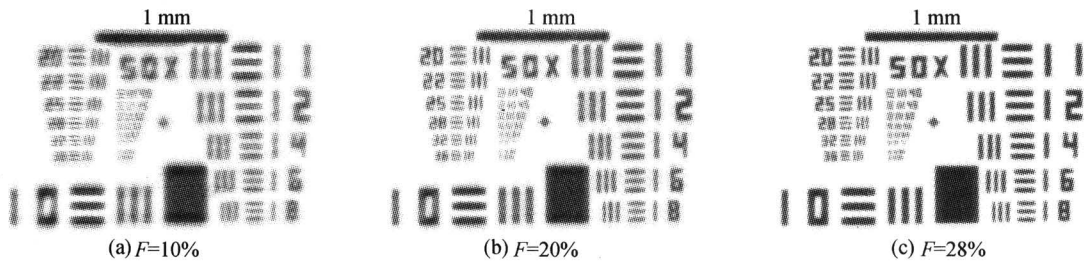


图 6 复合三子镜结构模拟成像
Fig. 6 Image simulation of dual three sub-apertures

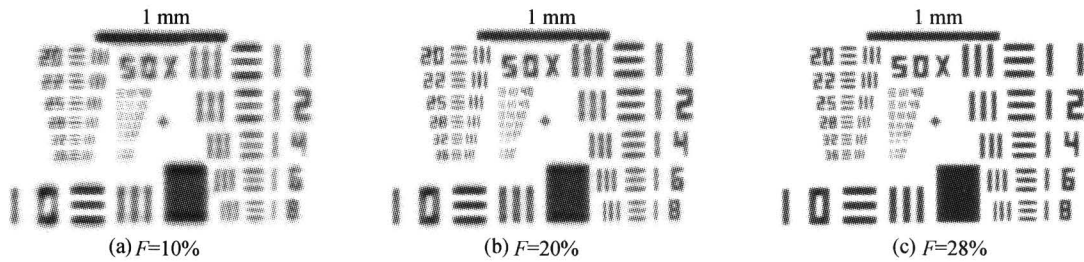


图 7 三臂结构模拟成像
Fig. 7 Image simulation of three arms

构模拟像的对比度低于复合三子镜模拟像. 三臂结构分辨横向线对的能力达到 40 lp/mm, 分辨竖线对的能力达到 50 lp/mm. 而复合三子镜分辨则分别可达到 50 lp/mm 和 50 lp/mm. 模拟成像表明复合三子镜模拟像在空间频率较高的情况下, 图像清晰度优于三臂结构所成像. 模拟像的这些特征与前述 MTF 分析一致.

2.2 维纳滤波

将三臂和复合三子镜稀疏孔径系统加噪模拟成像结果进行维纳滤波恢复图像^[9]. 维纳滤波结果(如图8, 图9)表明, 通过维纳滤波技术可以将稀疏

孔径系统所成图像清晰度提高. 三臂和复合三子镜均可分辨到 50 横向 lp/mm 和 56 竖 lp/mm. 可见虽然采用稀疏孔径后, MTF 值降低, 所成图像的对比度下降, 但经过维纳滤波图像处理技术, 可抑制噪声, 改善图像质量.

2.3 与 Golay6 结构比较

Golay 结构是非冗余稀疏孔径结构, 各个子调制传递函数分布在二维频谱面不同的方位和不同径向位置, 子调制传递函数无重叠, MTF 分布均匀. 以 Golay6 为例, 6 个子镜如图 10 排列在一个大圆内, 构成一个稀疏孔径结构, 其 MTF 分布均匀(如

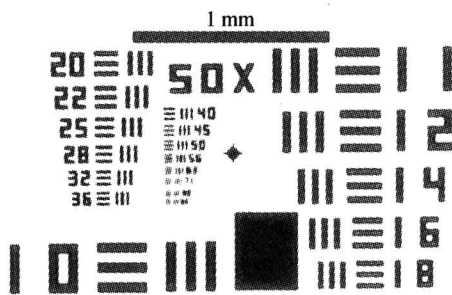


图 8 三臂结构维纳滤波成像
Fig. 8 Wiener filtered images of three arms

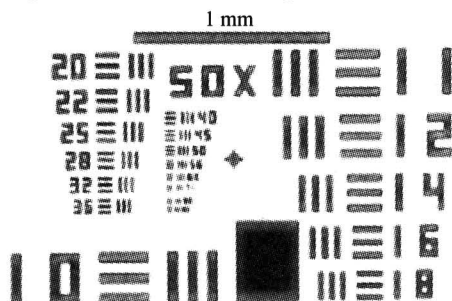


图 9 复合三子镜维纳滤波成像
Fig. 9 Wiener filtered images of dual three sub-apertures

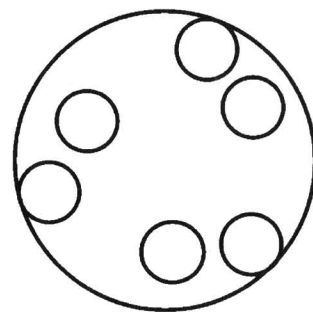


图 10 Golay6 结构
Fig. 10 Configuration of Golay6

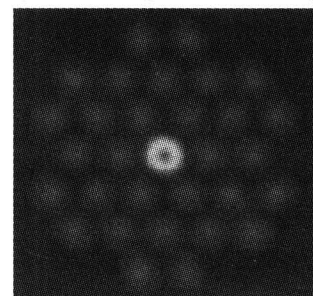


图 11 Golay6 结构二维 MTF 图
Fig. 11 Two dimensional MTF of Golay6

图 11)。而前面所述两种稀疏孔径结构都是以 Y 轴对称型的, 由于其子镜排列的对称性, 在二维频谱面内, 部分子调制传递函数相互重叠, 因此 MTF 分布不均匀。

3 结论

对称型稀疏孔径系统的子镜排列结构都具有对称的特点, 与非冗余的 Golay 结构相比, 上述两种对称结构的调制传递函数不均匀, 有冗余。

比较分析了三臂和复合三子镜两种对称型稀疏孔径结构、MTF 分布, 以及模拟成像, 表明复合三子镜可选择的填充因子动态范围大, 在各个方向上的分辨能力差别小, MTF 值较高。缺点是冗余度高, MTF 分布不均匀。但同时由于它的对称性, 便于安装和调试。因此, 复合三子镜是一种值得采纳的对称结构稀疏孔径系统。维纳滤波结果表明, 经过图像处理技术, 可以提高稀疏孔径系统所成像的清晰度。

致谢 本论文是在导师薛鸣球院士的悉心指导下完成的, 在此对薛院士的指导表示衷心感谢!

参考文献

- 1 Robert D F, Theodore A T. Image quality of sparse-aperture designs for remote sensing. *Opt Eng*, 2002, **41**(8):1957~1968
- 2 Aden B M, Marjorie P M. Large sparse-aperture space

optical systems. *Opt Eng*, 2002, **41**(8):1983~1994

- 3 王海涛, 周必方. 天文光干涉技术. *光学精密工程*, 2003, **11**(4):320~325
Wang H T, Zhou B F. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(4):320~325
- 4 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. *光子学报*, 2004, **33**(4):472~475
Fan W J, Zhou B F, Xia L Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):472~475
- 5 钟丽云, 张以谟, 吕晓旭. 合成孔径数字全息的分析模拟及多参考光合成孔径数字全息. *光子学报*, 2004, **33**(11):1343~1347
Zhong L Y, Zhang Y M, Lu X X. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11):1343~1347
- 6 钱霖, 吴泉英, 吴锋, 等. 复合三子镜的成像研究. *光学学报*, 2005, **25**(8):1030~1035
Qian L, Wu Q Y, Wu F, et al. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):1030~1035
- 7 吴泉英, 钱霖, 沈为民. 两种稀疏孔径系统的成像研究. *光学精密工程*, 2006, **14**(1):26~33
Wu Q Y, Qian L, Shen W M. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(1):26~33
- 8 Castleman K R. *Digital Image Processing*. Beijing: Prentice-Hall International Inc, 1998. 351~385
- 9 Quanying Wu, Lin Qian, Weimin Shen. Image recovering for sparse-aperture systems. *Proc of SPIE*, 2005, **5642**:478~486

Imaging Research On Sparse-aperture Systems of Symmetrical Configuration

Wu Quanying^{1,2}, Qian Lin^{1,3}, Shen Weimin¹

¹ Jiangsu Key Lab of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou 215006

² Laboratory Center, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215009

³ School of Phys Sci&Tech, Soochow University, Suzhou 215006

Received date:2005-10-09

Abstract A sparse-aperture design named dual three sub-apertures, which is composed of nine sub-apertures, is proposed. Each three sub-apertures make up of a sub-pupil, three sub-pupils make up of a main pupil. The configuration of dual three sub-apertures is symmetrical and redundant. The symmetrical sparse-aperture systems of three arms and dual three sub-apertures are researched. The feature and Modulation Transfer function (MTF) are compared between dual three sub-apertures' and three arms'. Image simulation and Wiener filter of the two kinds of symmetrical sparse apertures are illuminated with different fill factors, and image quality is evaluated. The nonredundant sparse aperture of Golay6 is also compared. The results show that the configuration and image quality of dual three sub-apertures are better than three arms'. The symmetrical configuration of sparse aperture systems has the advantages of flexible configuration and easy fabrication.

Keywords Space remote sensing; Sparse aperture; Symmetrical configuration; MTF

Wu Quanying was born in 1965. She received a B. S. Degree from Nanjing University of Science and Technology in 1987, and a Ph. D. Degree in optical engineering from Institute of Modern Optical Technology of Soochow University in 2006. Now she is working on optical design and image processing.

