

文章编号: 0253-2239(2006)02-0187-6

复合三子镜稀疏孔径光瞳结构的研究*

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: 由于在截止频率区域内稀疏孔径系统的调制传递函数(MTF)比全孔径系统的调制传递函数下降,甚至调制传递函数可能出现零点而影响成像质量,通过稀疏孔径系统的结构优化可以获得调制传递函数分布比较理想的孔径结构。给出了基于实际空间截止频率 ρ_R 和子孔径直径的稀疏孔径结构优化准则,对复合三子镜稀疏孔径结构进行优化,分析了优化前后的调制传递函数变化,并对优化结构的复合三子镜稀疏孔径系统模拟成像和维纳滤波,比较优化前和优化后稀疏孔径结构的成像情况。结果表明结构优化是稀疏孔径光学系统设计的一个关键部分,应用的优化准则对稀疏孔径结构优化是合理的,通过结构优化可以使复合三子镜稀疏孔径系统的成像质量得到改善。

关键词: 应用光学; 稀疏孔径; 调制传递函数; 光瞳结构; 成像质量

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Research on Pupil Configuration of Dual Three Sub-Apertures Sparse-Aperture System

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 Physics Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006 }

Abstract: The modulation transfer function (MTF) of a sparse-aperture system is lower than that of a filled-aperture system within the cut-off frequency. The zero values of MTFs may be produced at some mid-spatial frequencies, which affects the image quality. Configuration optimization of sparse-aperture systems can achieve a sparse-aperture configuration with more uniform MTF. A criterion is given to optimize the sparse-aperture system, which is directly linked with the maximum spatial frequency ρ_R (or practical resolution) and the diameters of the sub-apertures. Optimal configuration of dual three sub-apertures and the image simulations are obtained. Wiener filter technique is applied. The image simulations and the MTFs comparison of optimized configuration and un-optimized configuration of dual three sub-apertures show that configuration optimization is a key aspect of the design for sparse-aperture systems. The optimization criterion of sparse-aperture systems is reasonable and the image quality can be improved by optimizing configuration.

Key words: applied optics; sparse aperture; modulation transfer function; pupil configuration; image quality

1 引言

空间遥感对于高分辨率的要求直接导致需要大孔径的空间光学系统,但是,大孔径的光学系统体积

大、重量重,受地面推进器发射重量和容量的制约,限制了空间光学系统口径的增大。同时,光学系统的制造成本,随着单块主镜直径的三次方增长。因

* 江苏省自然科学基金(BK2004202)、教育部博士学科点基金(20040285001)和江苏省现代光学技术重点开放实验室课题(T8108030)资助课题。

作者简介: 吴泉英(1965~),女,江苏吴江市人,高级工程师,苏州大学现代光学技术研究所博士研究生,主要从事图像信息处理和光学设计工作。E-mail: wqcyh@tom.com

收稿日期: 2005-04-11;收到修改稿日期: 2005-06-13

此,稀疏孔径系统的研究随之发展^[1~7]。

将数个子孔径按一定规则排列,则构成一个大孔径的稀疏孔径系统。如常规的光学系统一样,角分辨率和灵敏度是稀疏孔径系统的两个主要指标,它们都受到稀疏孔径系统的稀疏度及其子孔径的排列(光瞳结构)的影响。在达到使用要求的条件下,合理的光瞳结构,能使系统具有最轻的重量和最小的体积。所以光瞳结构优化成为稀疏孔径设计的一个关键部分^[8,9]。

复合三子镜是一种有九个子镜组成的稀疏孔径结构。作者曾对其进行成像研究,并指出它的结构具有灵活性^[10]。本文将讨论复合三子镜的结构优化。

2 优化准则

稀疏孔径系统以损失通光面积(灵敏度)和成像清晰度为代价,来达到减小光学系统重量,并符合分辨率要求的目的。在实际需求的分辨率给定的条件下,设定系统的截止频率为 ρ_c ,则稀疏孔径的包围孔径由 $D = \lambda f \rho_{Dc}$ 确定,式中 ρ_{Dc} 为包围孔径的截止频率。稀疏孔径相对于 D 的通光面积用填充因子 $F = \sum_{i=1}^n \pi d_i^2 / (\pi D^2)$ 来表示,其中 n 为子孔径的数目, d_i 为子孔径的直径, D 为包围孔径的直径。

最合适的评价稀疏孔径成像质量的光学特征函数是调制传递函数(MTF),它反映了光学系统传递信息的能力,也反映了像面上各不同空间频率的衬比度。即使在 D 和 F 均相同的情况下,子孔径的结构形状、排列规则不同,其对应的调制传递函数也不同。以两种都由四个子孔径构成的稀疏孔径结构为例,填充因子为 20%。如图 1 所示,结构 1 四个子孔径按正方形排列,其调制传递函数在中频部分易出现零点。结构 2 四个子孔径以中心对称排列,其调制传递函数易出现零值的地方在高频部分。由于

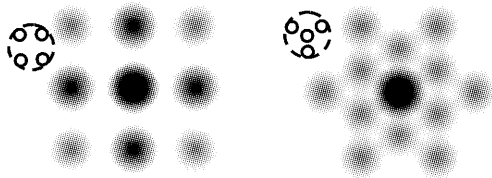


图 1 结构 1 和结构 2 的二维调制传递函数
Fig. 1 Two-dimensional MTFs of configuration 1 and configuration 2

调制传递函数值为零时,相应空间频率的图像信息丢失,并且是无法恢复的。当频率 $\rho \geq \rho_R$ 时,相应频率的信息没有意义。因此,定义调制传递函数第一次出现零时所对应的空间频率为实际空间截止频率 ρ_R ^[3](图 2)。所以,稀疏孔径优化的准则是 ρ_R 尽量大,同时对应的填充因子尽可能小。

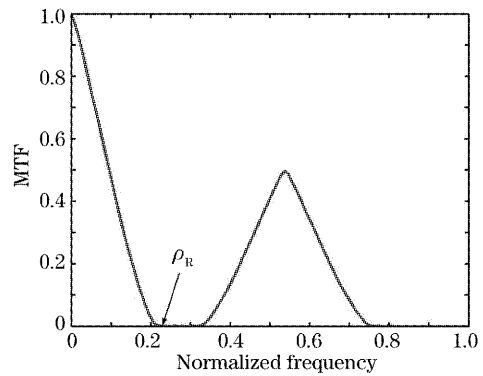


图 2 四孔结构截止频率区域内调制传递函数有零点的传递函数曲线

Fig. 2 MTF curve of four-aperture configuration exhibiting a zero value within the cut-off spatial frequency

3 复合三子镜的结构优化

3.1 复合三子镜结构形式

复合三子镜结构由九个子镜构成(如图 3), D 、 D_1 和 d 分别为主光瞳、次级光瞳和子镜的直径,填充因子 $F = 9d^2 / D^2$ ^[10,11]。可以通过调节次级光瞳 D_1 的大小,改变九个子镜的相对位置,以满足使用要求。

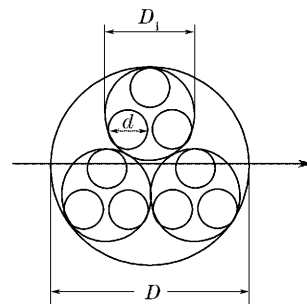


图 3 复合三子镜结构

Fig. 3 Configuration of dual three sub-apertures

3.2 复合三子镜 III 型^[10]的结构优化

3.2.1 复合三子镜调制传递函数分析

设稀疏孔径系统中每一个子镜为直径为 d 的无遮拦圆形光瞳,非相干衍射限的调制传递函数为^[12]

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

其中 $\rho_{\text{dc}} = d/(\lambda f)$ 。则稀疏孔径系统的调制传递函数为

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

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

由(2)式可见,稀疏孔径的调制传递函数由子孔径的调制传递函数组合而成。子孔径之间的相对距离决定子传递函数在频率域内放置的径向位置;子孔径之间的相对方位决定子传递函数在频率域内放置的角度方向。这就给稀疏孔径设计得出一个启示:调节子孔径的相对位置,使之达到实际使用对传递函数的要求^[10]。复合三子镜子孔径排列如图 4(a)所示,子孔径的相对距离为 l_1, l_2, l_3, l_4 。二维调制传递函数分布构成六边形图样[图 4(b)],子传递函数分别放置在六边形频谱面的不同位置,对应的频率分别为 $\rho_i = l_i/(\lambda f)$ ($i=1, 2, 3, 4$),相距 l_1 的两个子孔径在频谱面上构成的子传递函数离频谱面中心最远。图 4(b)箭头指示处调制传递函数易出现零点。

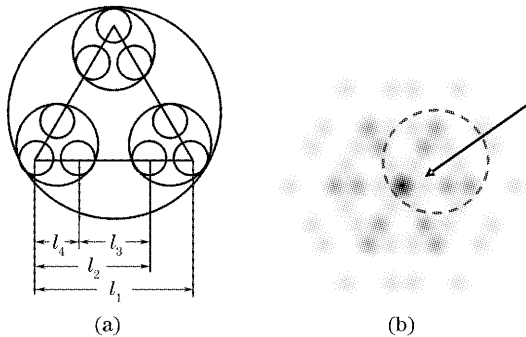


图 4 (a)复合三子镜示意图,(b)复合三子镜二维 MTF($F=10\%$)

Fig. 4 (a) Configuration of dual three sub-apertures, (b) two dimensional MTF of dual three sub-apertures ($F=10\%$)

3.2.2 结构优化

对于复合三子镜,可以调节次级光瞳直径 D_1 ,即调节九个子孔径的相对位置,使 ρ_{R} 尽可能大。二维调制传递函数分布图 4(b)虚线部分的放大示意图如图 5 所示,图中各小圆代表子传递函数 F_{MTd} ,其半径即子传递函数截止频率 $\rho_{\text{dc}} = d/(\lambda f)$ 。欲使频谱面内调制传递函数出现零点的频率 ρ_{R} 尽量大,首先各子传递函数必须相交。并且,图 5 中以 A 和 B 点为中心的子传递函数的交点离中心尽可能远。设交点离中心 O 点的距离为 x ,有方程式

$$\rho_{\text{dc}}^2 = \rho_i^2 + x^2 - 2\rho_i \cdot x \cdot \cos 30^\circ, \quad (3)$$

求极值,得 $(x_2)_{\text{max}} = 2d/(\lambda f)$,此时,另一交点 $x_1 = d/(\lambda f)$,次级光瞳直径 $D_1 = 3d$ 。但由于以 O 点为中心的子传递函数半径同样为 $d/(\lambda f)$,在距离 x_1 处刚好出现一个零点。因此,必须取 $D_1 = 3d - \epsilon$, ϵ 是一个很小的值,就可以在 x_1 处避免零点出现。此时, $\rho_{\text{R}} = \frac{2d - 6\epsilon^2/16}{\lambda f} \approx \frac{2d}{\lambda f}$ 。

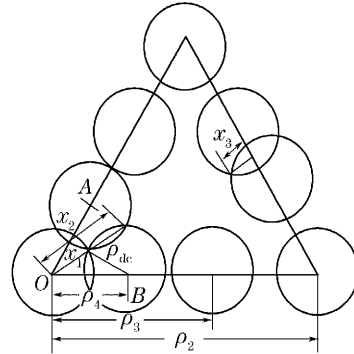


图 5 复合三子镜调制传递函数示意图

Fig. 5 MTF profile of dual three sub-apertures

进一步可以看出,只要使

$$x_2 + x_3 \geq \sqrt{3} \cdot \rho_2/2, \quad (4)$$

图 5 所示频谱面内就不出现零点。求解(4)式,填充因子必须满足: $F \geq F_{\text{min}} = 0.1837 + 0.0523(\epsilon/d)$ 。

复合三子镜的二维调制传递函数是非圆对称的,不同方向的调制传递函数不同。在 $F > F_{\text{min}}$ 的条件下,当取 $\epsilon = 0.1d$ 时,临界填充因子 $F = 0.1889$,优化结构的最大截止频率 $(\rho_{\text{c}})_{\text{max}} = 0.8854\rho_{\text{dc}}$,最小截止频率 $(\rho_{\text{c}})_{\text{min}} = 0.6623\rho_{\text{dc}}$,在整个截止频率范围内调制传递函数无零点出现。

3.3 调制传递函数比较

比较优化前后的调制传递函数分布[图 6(a)]可见,当填充因子为 20% 时,在截止频率区域内,优化结构调制传递函数没有零点,未优化结构调制传递函数在归一化频率为 0.3 附近即出现零点。图 6(b)为调制传递函数二维图,分别对应复合三子镜的优化(取 $\epsilon = 0.1d$)和未优化结构,以及 Golay6 结构,填充因子均为 20%。图示可见,优化结构比未优化结构的调制传递函数分布均匀,接近无冗余

的 Golay6^[1] 结构。未优化结构的调制传递函数明显在中频部分出现零点, 优化结构的调制传递函数在中频部分无零点, 属于紧凑型结构。与 Golay6 比较, 由于复合三子镜子孔径排列的对称性, 即使是优

化结构也是冗余的, 在某些频率处, 调制传递函数值高于 Golay6 结构。表 1 给出图 6(b) 所示三种结构调制传递函数的几个特征指标。

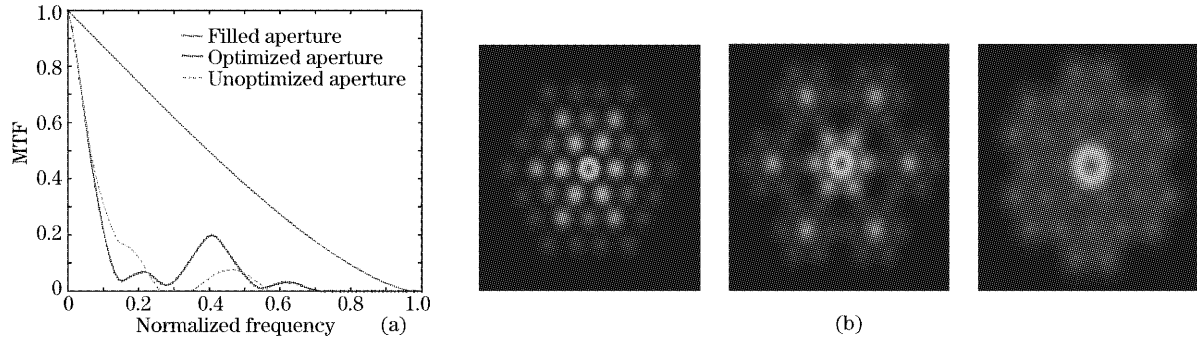


图 6 (a) 复合三子镜 90° 方向调制传递函数曲线, (b) 复合三子镜优化结构、未优化结构和 Golay6 二维调制传递函数
Fig. 6 (a) MTF curves of dual three sub-apertures at the 90° direction, (b) two-dimensional MTFs of optimized configuration, un-optimized configuration of dual three sub-apertures and Golay6

表 1 三种结构的特征指标

Table 1 The features of three kinds of configurations

The features	Golay6			Optimized dual three sub-apertures			Un-optimized dual three sub-apertures		
	F=15	F=20	F=25	F=15	F=20	F=25	F=15	F=20	F=25
Fill factor / %									
Ratio of practical effective diameters D_R/D	0.1627	0.2145	0.2680	0.1621	0.2140	0.2686	0.1288	0.2096	0.2675
Ratio of average \bar{F}_{MTF}	0.5104	0.5539	0.5918	0.6419	0.6631	0.7012	0.3493	0.5429	0.6721
$(\rho_c)_{max}/\rho_{Dc}$	0.8872	0.8905	0.8933	0.8833	0.8860	0.8883	0.2582	0.2981	0.3333
$(\rho_c)_{min}/\rho_{Dc}$	0.7093	0.7177	0.7251	0.6187	0.6728	0.7111	0.2236	0.2582	0.2887

实际等效直径 D_R 定义为: 具有与稀疏孔径系统在实际空间截止频率之内相等调制传递函数面积的圆孔直径。计算公式如下:

令

$$f(\rho, \theta) = \begin{cases} 1, & \text{if } \rho < (\rho_R)_\theta \\ 0, & \text{if } \rho \geq (\rho_R)_\theta \end{cases}$$

则

$$D_R = \left[\frac{4}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{(\rho_R)_\theta} f(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \right]^{1/2},$$

$(\rho_R)_\theta$ 指 θ 方向上的实际空间截止频率。

平均调制传递函数定义为: 在包围孔径截止频率内调制传递函数的平均值。通过下式计算:

令

$$g(\rho, \theta) = \begin{cases} F_{MTF}(\rho, \theta), & \text{if } \rho < (\rho_R)_\theta \\ 0, & \text{if } \rho \geq (\rho_R)_\theta \end{cases}$$

则

$$A_{MTF} = \int_0^{2\pi} \int_0^{(\rho_R)_\theta} g(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta / (\pi \rho_{Dc}^2).$$

平均调制传递函数值比定义为: 稀疏孔径系统

平均调制传递函数值与全孔径系统平均调制传递函数值之比。

由表 1 可见, 优化结构、Golay6 的实际等效直径和最大截止频率基本相当, 未优化结构的实际等效直径和最大截止频率较低。优化结构的平均调制传递函数值大于 Golay6, 最小截止频率略低于 Golay6, 未优化结构的最小截止频率明显低, 可见优化结构的特征指标优于未优化结构。结构优化对提高稀疏孔径系统的性能是有意义的。

4 成像研究

4.1 模拟成像

将一幅分辨率变化图[如图 7(a)]作为目标在 ZEMAX 下进行模拟成像, 成像光学系统是理想的无遮拦圆形光瞳, 相对孔径为 1:20, 波长 550 nm, 理论截止频率为 91 lp/mm, 模拟衍射限像如图 7(b)所示。将优化结构与未优化结构进行模拟成像比较, $F=20\%$ 。图 7(c)和图 7(d)所示模拟结果表明: 优化结构模拟像高频部分线对能分辨, 而未优化结构模拟像高频部分线对分辨不清或完全不能分辨。

优化结构、未优化结构模拟像和原始目标物的衬比度曲线如图 8 所示,分别为曲线(I)、(II)和(III)。从曲线图中可见,原始目标物的衬比度为 1 和 0,复合三

子镜结构模拟像的衬比度下降了,在高频部分,模拟像的衬比度优化结构高于未优化结构。在低频部分,未优化结构模拟像的衬比度高于优化结构。

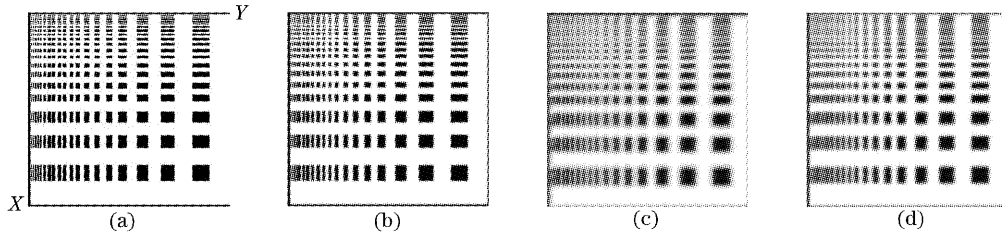


图 7 (a)原始目标物,(b)衍射极限理想像,(c)复合三子镜优化结构模拟像,(d)复合三子镜未优化结构模拟像
Fig. 7 (a) Object, (b) Diffraction limited image, (c) image simulation of optimized configuration of dual three sub-apertures, (d) image simulation of un-optimized configuration of dual three sub-apertures

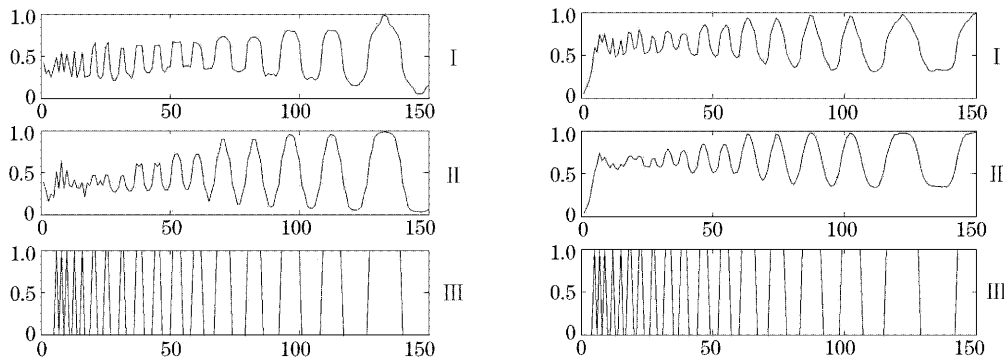


图 8 (a)水平方向(X 位置)线对的衬比度曲线,(b)垂直方向(Y 位置)线对的衬比度曲线

Fig. 8 (a) The contrast curves of line pairs at horizontal direction, (b) the contrast curves of line pairs at vertical direction

4.2 维纳滤波

将优化和未优化结构进行模拟加噪成像后,用维纳滤波技术恢复图像。如图 9 所示,维纳滤波后,优化结构模拟像的水平线对和竖线对都变清晰了,

未优化结构模拟像高频部分的清晰度没有能够得到提高,未优化结构水平线对和竖线对相比较,竖线对的分辨率高于水平线对分辨率,这与图 6(b)二维调制传递函数所示是吻合的。

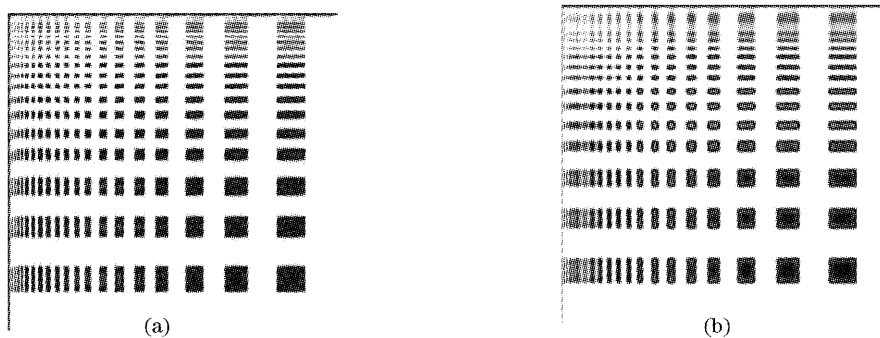


图 9 (a)复合三子镜优化结构维纳滤波像,(b)复合三子镜未优化结构维纳滤波像

Fig. 9 (a) Wiener filtered image of optimized configuration of dual three sub-apertures, (b) Wiener filtered image of un-optimized configuration of dual three sub-apertures

5 结 论

稀疏孔径光学系统可以通过结构优化获得调制传递函数比较理想的孔径结构,选用实际空间截止

频率尽可能大和填充因子尽量小为优化的准则,对复合三子镜结构进行优化。比较了优化结构和未优化结构模拟成像和调制传递函数分布,优化准则对稀疏孔径结构优化是合理的,阐述了结构优化是稀

疏孔径系统光学设计的重要环节。结构优化的复合三子镜稀疏孔径结构比未优化结构更适合应用于航天遥感器。

致谢 感谢薛鸣球院士的悉心指导。

参 考 文 献

- 1 Robert D. Fiete, Theodore A. Tantaló, Jason R. Calus *et al.*. Image quality of sparse-aperture designs for remote sensing[J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(8): 1957~1968
- 2 Aden Baker Meinel, Marjorie Pettit Meinel. Large sparse-aperture space optical systems[J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(8): 1983~1994
- 3 James E. Harvey, Richard A. Rockwell. Performance characteristics of phased array and thinned aperture optical telescopes[J]. *Opt. Engng.*, 1988, **27**(9): 762~768
- 4 Long Weijun, Wang Zhile, Zhou Yanping. Imaging analysis and computer simulation of optical synthetic aperture telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1009~1014 (in Chinese)
龙伟军,王治乐,周彦平. 光学综合孔径望远镜成像分析及计算机仿真[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1009~1014
- 5 Wang Haitao, Zhou Bifang. Beam combiner in optical aperture synthesis telescope array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1109~1115 (in Chinese)
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
- 6 Zhao Peiqian, Zhou Bifang, J. M. Mariotti *et al.*. Method study of optical path modulation in coherent optical telescope array[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(7): 748~751 (in Chinese)
赵培谦,周必方, J. M. Mariotti 等. 望远镜干涉阵中光程调制研究[J]. *光学学报*, 1994, **14**(7): 748~751
- 7 Wang Haitao, Zhou Bifang. Astronomical optical interference technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(4): 320~325 (in Chinese)
王海涛,周必方. 天文光干涉技术[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(4): 320~325
- 8 Laurent M. Mugnier, Gérard Rousset, Frédéric Cassaing. Aperture configuration optimality criterion for phased arrays of optical telescopes[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1996, **13**(12): 2367~2374
- 9 Jorge L. Flores, Marija Strojnik, Gonzalo Paez. Optimal diluted aperture configuration for large and extremely large telescope[J]. *Proc. SPIE*, 2002, **4486**: 533~542
- 10 Qian Lin, Wu Quanying, Wu Feng *et al.*. Study on sparse-aperture imaging of dual three sub-apertures design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1030~1035 (in Chinese)
钱霖,吴泉英,吴锋等. 复合三子镜的成像研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1030~1035
- 11 Quanying Wu, Lin Qian, Weimin Shen. Image recovering for sparse-aperture systems[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5642**: 478~486
- 12 K. R. Castleman. *Digital Image Processing* [M]. Beijing: Prentice-Hall International Inc, 1998. 351~385