

文章编号: 0258-7025(2009)04-0934-06

光学稀疏孔径系统复合阵列构造对系统成像的影响

赵娟¹ 王大勇¹ 张亚新² 耿则勋² 陶世荃¹

(¹北京工业大学应用数理学院, 北京 100022; ²信息工程大学测绘学院, 河南 郑州 450002)

摘要 复合孔径阵列结构是通过复制子孔径来扩展阵列大小以得到甚高分辨率的一种有效手段。针对光学稀疏孔径系统的成像特征给出一种改进的信噪比(SNR)评价方法。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。分析了 6 种复合阵列结构的调制传递函数,并以遥感影像为扩展物体进行光学成像实验,最后运用相关系数和改良后的信噪比对成像结果进行评价。结果表明,主阵列的结构决定了系统成像质量的好坏,子阵列构造方式只能在有限程度上改善图像质量。对不同类型的复合孔径主阵列,子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 光学成像; 稀疏孔径; 阵列结构设计; 信噪比; 相关系数

中图分类号 TH751; O43 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0934

Effect of Different Designs of the Multiple-Array Configuration on Imaging of Optical Sparse Aperture Systems

Zhao Juan¹ Wang Dayong¹ Zhang Yaxin² Geng Zexun² Tao Shiquan¹

(¹ College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

² Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract Multiple-array configuration can achieve higher resolution by copying sub-aperture configuration to expand the size of the whole array. A modified signal noise ratio (SNR) is proposed to evaluate the imaging performance of optical sparse aperture systems. Based on the traditional array configuration, including the annulus, Golay-6 and the Tri-arm, two different ways for designing the multiple-array configuration are investigated. The imaging performances of six multiple-array configurations are analyzed according to their modulation transfer functions the evaluation criteria of the correlation coefficient and the modified SNR. The optical imaging experiments with the image of remotesensing as propagating object have been fulfilled. The results show that the main-array configuration plays the key role on the quality of the imaging, and the sub-array configuration can only improve the imaging performance to a certain degree. This means that the different design of the multiple-array configurations may lead to the different quality of the imaging. In order to optimize the array, the characteristics of the main-array should be considered to choose the way arranging its sub-array configuration.

Key words optical imaging; sparse aperture; array configuration design; signal noise ratio; correlation coefficient

1 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。对于单口径(指主镜)望远镜,越高的空间分辨率需要越大

收稿日期: 2008-05-06; 收到修改稿日期: 2008-09-16

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

作者简介: 赵娟(1985—),女,硕士研究生,主要研究方向为光学信息处理、数字图像处理等。

E-mail: zhaajuan01@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王大勇(1968—),男,教授,博士,主要研究方向为光学全息、光学信息处理、数字全息测量、光通信无源器件和数字图像处理等。E-mail: wdyong@bjut.edu.cn (通信作者)

的口径。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。因此,在不增加单个望远镜直径的前提下,可实现更高分辨率的光学稀疏孔径成像系统被广泛研究^[1~6]。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于子孔径口径 10 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^[7,8]。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能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^[9]。另外,复合孔径阵列结构可通过复制的方式将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。在典型阵列结构的基础上,研究了两种不同复合孔径阵列构造方式,完成了光学成像实验及图像重构,利用相关系数和改良后的信噪比(SNR)分析了不同构造方式对成像质量的影响。

2 光学稀疏孔径系统的基本理论

2.1 成像系统的简化模型

光学稀疏孔径成像系统是由多个小成像系统组成的阵列。为了实现光学稀疏孔径系统成像,不仅要求经不同子望远镜系统所成的像完全重叠,而且要求达到共相位,系统的共相误差会导致成像质量下降。本文主要研究光学稀疏孔径阵列结构,为了研究简单,假设系统满足共相叠加条件。此时,光学稀疏孔径系统对遥远物平面成像过程可以等效为衍射受限的非相干成像系统。在空间域,像平面光强分布可以用物平面光强分布的几何理想像与系统点扩散函数的卷积积分描述。对应于频率域,像平面光强分布的归一化频谱是物平面几何理想像的归一化频谱与系统光学传递函数的乘积。系统的光学传递函数只在有限范围内不为零,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。

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^[10]。实际中,通常在频率域使用维纳滤

波器进行图像复原,如

$$W(f_x, f_y) = \frac{\text{OTF}^*(f_x, f_y)}{|\text{OTF}(f_x, f_y)|^2 + \left| \frac{N(f_x, f_y)}{\tilde{I}_i(f_x, f_y)} \right|^2}, \quad (1)$$

其中,OTF(f_x, f_x)为系统的光学传递函数,描述非相干成像系统在频率域的响应,可以由点扩散函数(PSF)的归一化频谱计算得到。而它的模就是调制传递函数(MTF),描述系统对各频率分量对比度的传递特性;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; $\tilde{I}_i(f_x, f_y)$ 为物体的几何光学理想像的归一化频谱。在实际应用中,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 近似地表示噪声对理想图像频谱密度之比,可根据信噪比的某种先验知识或复原结果适当确定。

2.2 成像质量评价方法

对于实际的空间成像,最终的成像结果包含了成像过程中的各种因素。有些因素是不确定性的,对于图像的质量好坏不能完全依赖于主观观察,还需要客观的评价方法。由于光学稀疏孔径成像系统光瞳面的不连续性导致了系统点扩散函数失去了传统单孔径成像系统所具有的圆周对称性,对稀疏孔径成像系统采用传统的瑞利分辨准则存在一定的局限性。另外,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曲线无法给出完整的客观评价^[11]。因此,对于稀疏孔径成像系统需要找到一种适用于其成像特点的评价标准。

使用相关系数来评价成像复原结果的质量。考虑到光学稀疏孔径成像系统的最终目的是提高对细节的分辨能力以接近等效单孔径系统的成像性能。除了相关系数全局评价方法外,还针对目标中的敏感区域,提出局部的信噪比分析。但是,由于光学稀疏孔径系统直接成像结果是模糊的,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。图像经维纳滤波处理后会造造成总光强的损失,此时,用传统的信噪比分析,会造成结果失真。为了使信噪比分析仍然适用于稀疏孔径系统,就要在分析图像信噪比之前,先对图像进行归一化处理。设 s_0 为等效单孔径成像结果中敏感区域的归一化光强分布函数, s 为同一场景的稀疏孔径成像结果的归一化光强分布函数,用改良后的信噪比(M_{SNR})作为评价指标,其表达式为

$$M_{\text{SNR}} = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n s_0(i, j)^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [s_0(i, j) - s(i, j)]^2} \right\}_{m, n}, \quad (2)$$

其中 m, n 分别为图像敏感区域的长和宽。 M_{SNR} 的值越大, 表明光学稀疏孔径成像结果与等效单孔径系统成像结果越接近。

3 复合孔径阵列结构

3.1 复合孔径阵列的构造

复合孔径阵列是一种建立在典型光学稀疏孔径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, 就构成了复合孔径阵列结构, 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。复合阵列的构造一般有两种方式: 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 Golay-6 型和典型 Y 型, 子阵列均为 Golay-3 型且子阵列对称轴方向一致的复合阵列 I 型结构。图 1(b) 中对应地给出了主阵列为典型环形、典型 Golay-6 型和典型 Y 型, 子阵列均为 Golay-3 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, 图示中 $N=18$ 。

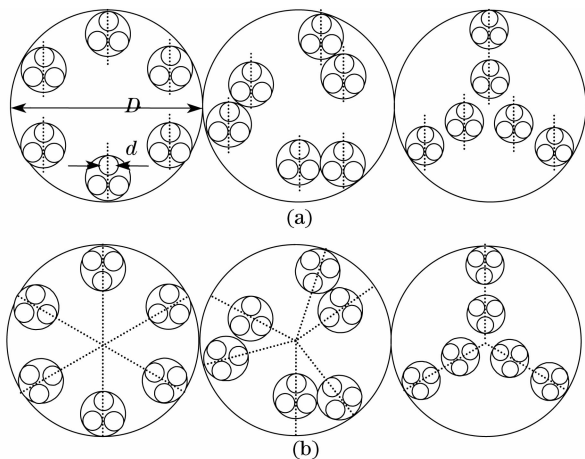


图 1 6 种光学稀疏孔径复合阵列结构

Fig. 1 Six multiple-array configuration

3.2 复合孔径阵列结构的调制传递函数

光学稀疏孔径阵列结构形式决定了系统的调制传递函数分布。6 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如图 2 所示。系统参数为: $D=10 \text{ m}$, $F^\# = 20$, $F = 20\%$, $N = 18$, $d = 1.0541 \text{ m}$ 。为了对比, 同时也给出了等效单孔径系统的 MTF 曲线。

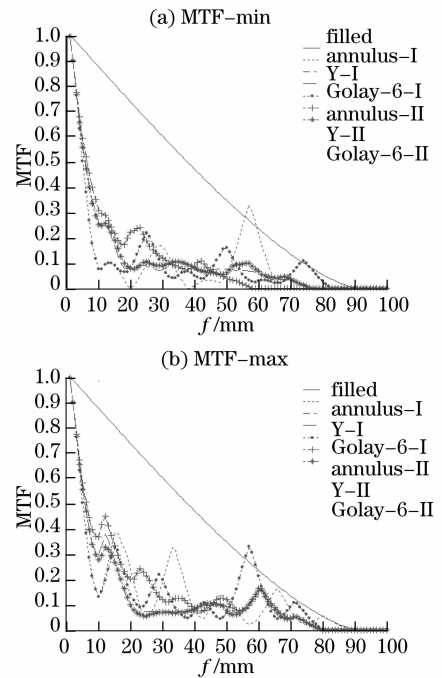


图 2 复合孔径阵列和等效单孔径系统的 MTF 截面图

(a) 沿最小截止频率方向 MTF 曲线

(b) 沿最大截止频率方向 MTF 曲线

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。由系统的 MTF 可以看出, 稀疏孔径系统直接成像结果与等效单孔径的成像结果相比, 对比度低, 是相对模糊的图像, 因此需要图像的复原后处理。因为 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 6 种复合孔径阵列结构按照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。

4 复合孔径阵列结构的光学成像实验

4.1 实验装置

光学稀疏孔径成像系统的实验装置如图 3 所示。 L_1, L_2 为双胶合透镜, 焦距 84.1 cm; 实验用 CCD 的像元大小为 $6.8 \mu\text{m} \times 6.8 \mu\text{m}$, 像元个数为 1317×1035 。用于成像的扩展物体(遥感影像)放在透镜 L_1 的前焦面处, 在 L_1 后形成平行光, 用于模拟遥远物体发出的物光波。我们按照稀疏孔径阵列结构及其填充因子要求加工了不同的掩模板, 将其置于透镜 L_2 前, 和透镜 L_2 一起模拟光学稀疏孔径成像系统, 不同子孔径在像面上的共相叠加条件是自动满足的。实验中采用的模板等效单孔径的直径为 35 mm, 子孔径直径为 3.69 mm。

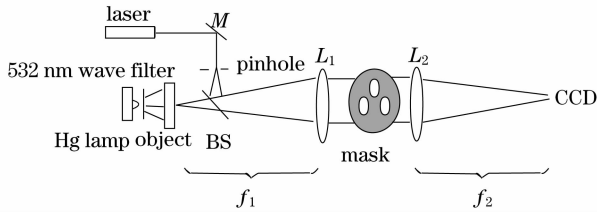


图 3 光学稀疏孔径系统实验光路图

Fig. 3 Experimental setup of the optical sparse aperture imaging system

首先实验测量系统的点扩散函数。将 $10 \mu\text{m}$ 的针孔放在透镜 L_1 的前焦面处, 模拟点光源(表示点物)。考虑到汞灯的功率不足以满足 CCD 探测灵敏度的要求, 此时用激光器来代替汞灯作为照明光源。通过分束镜 BS 使光路具有切换的功能, 如图 3 所示。当只打开激光器, 通过更换不同的模板可以得到不同复合孔径阵列成像系统的 PSF, 进而得到相应系统的 OTF 及 MTF 数据, 用于对比分析。然后, 测量系统对扩展目标直接成像的结果。此时, 关闭激光器打开汞灯光源。在汞灯和物体之间放置滤光片(中心波长 532 nm , 半带宽 $10 \pm 2 \text{ nm}$) 以得到准单色照明。在透镜 L_1 的前焦面处, 放置遥感影像作为成像物体。此时, CCD 采集到的图像即为光学稀疏孔径成像系统直接输出的结果, 是模糊的。通过更换不同的模板即可得到不同阵列成像系统的直接成像结果。最后, 根据(1)式, 就可以利用 OTF 分布对直接成像结果进行维纳复原, 得到最终输出图像。

4.2 实验结果分析

在填充因子为 20% 时, 分别对 6 种复合阵列结构进行了光学成像和图像复原处理。这里给出了等效单孔径成像的结果和复合阵列结构成像的结果及其复原结果, 如图 4~7 所示。



图 4 等效单孔径直接成像结果

Fig. 4 Imaging results of equivalent filled system

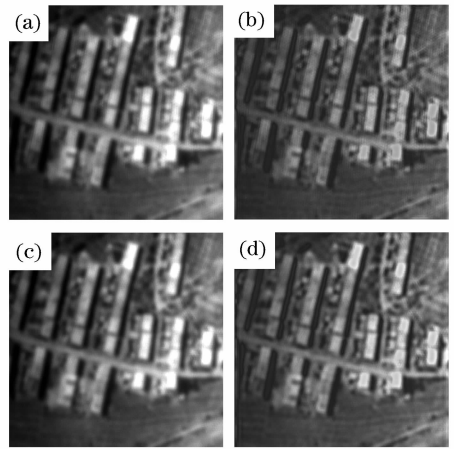


图 5 复合环形结构直接成像结果(a), (c)和复原结果(b), (d) ((a), (b) I 型; (c), (d) II 型)

Fig. 5 Imaging results of multiple-annulus configuration of the sparse aperture system (a), (c) and the corresponding outputs with the Wiener filter (b), (d) ((a), (b) type- I; (c), (d) type- II)

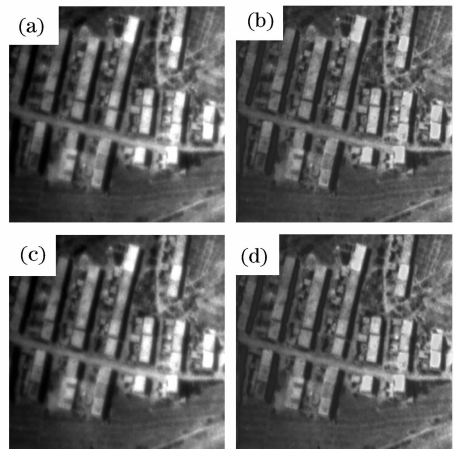


图 6 复合 Golay-6 结构直接成像结果(a), (c)和复原结果(b), (d) ((a), (b) I 型; (c), (d) II 型)

Fig. 6 Imaging results of multiple-Golay-6 configuration of the sparse aperture system (a), (c) and the corresponding outputs with the Wiener filter (b), (d) ((a), (b) type- I; (c), (d) type- II)

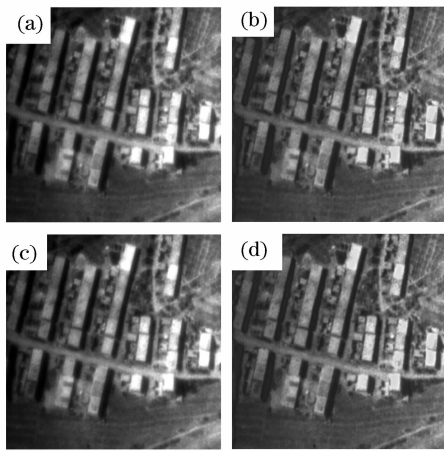


图7 复合 Y 型结构直接成像结果(a),(c)和复原结果(b),(d) ((a),(b) I 型; (c),(d) II 型)

Fig. 7 Imaging results of multiple-Y configuration of the sparse aperture system (a),(c) and the corresponding outputs with the Wiener filter (b),(d) ((a),(b) type-I; (c),(d) type-II)

对 6 种复合孔径阵列结构按照其主阵列的类型分类,利用光学成像实验结果比较同种主阵列结构中子阵列构造的不同对成像质量的影响。

通过观察图像可以看出,所有 6 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的,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,对于不同的子阵列构造方式,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的。为进一步定量评价系统的成像质量,依据实验结果,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 所示。

表 1 实验结果的相关系数分析

Table 1 Correlation coefficient between the images of the sparse aperture system and the direct image of the equivalent filled system

Array configurature		Correlation coefficient	
Main array	Sub-array	Derect image	Wiener filter
Annulus	I	0.9510	0.9678
	II	0.9512	0.9707
Golay-6	I	0.9686	0.9866
	II	0.9644	0.9812
Y	I	0.9737	0.9887
	II	0.9737	0.9887

复原图像的相关系数比直接成像的相关系数有所提高,但是提高幅度不大。这是由于实验中采用的是遥感影像,噪声大和对比度低造成的。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 Golay-6 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。结果表明,相同类型的主孔径阵列结构,不同的子阵列构造方式有可能得到不同的成像结果,但不能笼统地认为某一构造方式比另一构造方式好,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。

光学稀疏孔径成像系统的最终目的是为了对提高对细节的分辨能力,假定图像中央的楼房为我们探测的敏感区域,并对其进行信噪比分析。对比结果如表 2 所示,复原后图像质量改善。对不同复合孔径阵列结构成像的 M_{SNR} 变化规律与相关系数评价结果是一致的,表明通过敏感区域定义信噪比能够用于评价光学稀疏孔径系统。

表 2 复合孔径阵列结构成像结果的信噪比分析

Table 2 M_{SNR} with the images of the sparse aperture system

Array configurature		Correlation coefficient	
Main array	Sub-array	Derect image	Wiener filter
Annulus	I	32.9186	42.0686
	II	33.1333	44.2199
Golay-6	I	37.3101	51.5815
	II	36.5454	50.1345
Y	I	39.0963	56.6148
	II	39.0963	56.6148

5 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。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,利用计算机仿真对 6 种复合阵列结构的 MTF 曲线进行分析,并以遥感影像为扩展物体进行光学成像实验,其成像过程更加贴近实际情况。最后运用相关系数和改良后的信噪比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 Golay-6 型阵列中 I 型较 II 型获得更好的

成像质量;复合 Y 型结构结果相同。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构造方式比另一构造方式好,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

- 1 Robert D. Fiete, Theodore A. Tantaló, Jason R. Calus *et al.*. Image quality of sparse-aperture designs for remote sensing[J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(8): 1957~1969
- 2 Soon-Jo Chung, David W. Miller, Olivier L. de Weck. ARGOS testbed: study of multidisciplinary challenges of future spaceborne interferometric arrays[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(9): 2156~2167
- 3 R. L. Kendrick, Jean-Noel Aubrun, Ray Bell *et al.*. Wide-field Fizeau imaging telescope; experimental results[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(18): 4235~4240
- 4 Wu Quanying, Qian Lin, Shen Weimin. 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
- 5 Jiang Yuesong. 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 Haitao, Zhou Bifang. 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 Han Ji, Wang Dayong, Liu Hancheng *et al.*. Multiple-array configuration design of optical sparse-aperture imaging system [J]. *J. 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
- 8 Qian Lin, Wu Quanying, Wu Feng *et al.*. Study on imaging of dual three sub-apertures design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1030~1035
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
- 9 Zhao Juan, Wang Dayong, Han Ji *et al.*. Imaging analysis of optical sparse aperture systems with multiple-array configuration designs[C]. *SPIE*, 2007, **6834**, 68340D
- 10 Wang Dayong, Han Ji, Liu Hancheng *et al.*. Experimental study on imaging and image restoration of optical sparse aperture systems[J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(10), 103201
- 11 Wang Zhile, Zhang Wei, Long Funian. 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