

文章编号:1004-4213(2010)01-0148-5

# 一种新型稀疏孔径结构的研究

梁士通<sup>1,2</sup>, 杨建峰<sup>1</sup>, 李湘眷<sup>1,2</sup>, 白瑜<sup>1,2</sup>, 王洪伟<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**提出了一种由九个孔径组成的稀疏孔径结构, 给出了该孔径结构的光瞳函数, 并分析了其孔径结构的特点. 具体对不同填充因子时的新结构进行了仿真, 得出了新型稀疏孔径结构的调制传递函数的分布特点, 以及系统的等效直径和调制传递函数的变化情况. 对新型稀疏孔径结构与三臂结构进行了比较和分析, 新结构的传递函数分布比较均匀, 对频域有较大的覆盖面积, 系统的等效直径较大. 新结构在等效直径和调制传递函数的均匀性方面优于所比较的三臂稀疏孔径结构, 新结构在成像性能方面具有一定的优势.

**关键词:**稀疏孔径; 调制传递函数; 成像

**中图分类号:** O436.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103901.0148

## 0 引言

在对地观测系统中, 光学成像系统是目标发现、识别的主要手段之一. 空间分辨率则是评价光学成像系统的主要技术指标. 为了提高空间分辨率, 势必要增大光学系统的口径. 而加工大口径的单镜片, 其重量大、成本高, 并且还受到光学材料、加工工艺、有效载荷体积等诸多因素的限制. 为了解决这一系列问题, 人们提出了稀疏孔径成像技术. 稀疏孔径系统是把一些孔径比较小的子孔径, 按照一定规律排列起来, 用来代替一个比较大的孔径, 获得与大孔径光学系统相当的空间分辨率. 子孔径的孔径比较小, 从而克服了大孔径所带来的加工、装配等问题. 在稀疏孔径成像技术中, 孔径的优化组合始终是重要的问题, 它直接影响系统的分辨率和光学传递函数等技术指标. 典型的稀疏孔径结构有环形, 三臂形和 GOLAY 结构等<sup>[1-3]</sup>. 本文分析了稀疏孔径结构对系统点扩散函数 (PSF) 和光学传递函数 (OTF) 的影

响, 提出了一种新的孔径排列型式, 并具体分析了其光学性能.

## 1 稀疏孔径成像的基本理论

### 1.1 点扩散函数和光学传递函数

根据信息光学的理论, 可以用点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 和光学传递函数 (OTF) 来评价成像系统在空域和频域中的成像性能<sup>[4]</sup>. PSF 是系统对理想物点的成像斑的能量分布的数学描述, 可用于评价系统的分辨率. OTF 是成像系统对目标所成的实际像的频谱与理想像频谱的比值, 其模为调制传递函数 (MTF). 对于一个直径为  $D$  的圆孔, 其点扩散函数和调制传递函数可以表示为

$$\text{PSF}(r) = \left(\frac{\pi D^2}{4\lambda f}\right)^2 \left[\frac{2J_1\left(\frac{\pi r D}{\lambda f}\right)}{\frac{\pi r D}{\lambda f}}\right]^2 \quad (1)$$

$$\text{MTF}(r) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[ \arccos\left(\frac{r}{r_c}\right) - \frac{r}{r_c} \left(1 - \left(\frac{r}{r_c}\right)^2\right)^{1/2} \right] & 0 \leq r \leq r_c \\ 0 & r > r_c \end{cases} \quad (2)$$

式中  $J_1(\cdot)$  为 1 阶贝塞尔函数,  $r_c = D/\lambda f$  为系统截止频率.

### 1.2 稀疏孔径系统的 PSF 和 MTF

稀疏孔径系统由多个子孔径的排列组成, 整个入瞳的透过率可以用单孔径的透过率和一个  $\delta$  函数的二维阵列的卷积得到. 通过推导可以得到系统的 PSF 和 MTF 为

$$\text{PSF}(x, y) = \text{PSF}_s \left| \sum_{i=1}^N \exp(-2\pi i/\lambda f) \cdot (xx_i + yy_i) \right|^2 \quad (3)$$

$$\text{MTF}(f_x, f_y) = \frac{\text{MTF}_s}{N} \sum_i \sum_j \delta(f_x - \frac{x_i - x_j}{\lambda f}, f_y - \frac{y_i - y_j}{\lambda f}) \quad (4)$$

式中  $\text{PSF}_s$  和  $\text{MTF}_s$  分别为单个子孔径的点扩散函数和传递函数,  $\lambda$  为系统采用的波长,  $f$  为系统焦距,  $N$  为子孔径的个数。

从式(4)可以看出,系统总的 MTF 式是多个  $\text{MTF}_s$  在频率域上的组合,子孔径在入瞳平面上不同方向的排列,对应着  $\text{MTF}_s$  在频率域上不同方向的排列,因此,子孔径在入瞳平面上排列型式对系统 MTF 有着重要的影响.通过调整子孔径的排列方式就可以改变系统 MTF 的分布。

## 2 新型 9 孔径结构

新型稀疏孔径结构由 9 个直径为  $d$  的子镜组成(图 1),可以把其看作是由两个环形的稀疏孔径结构组成,最外边有 6 个子镜排列成一个环形,里面的 3 个子镜排列成一个环形。

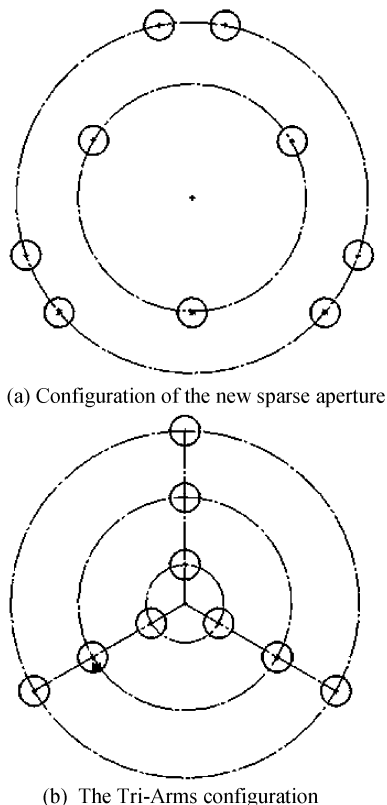


图 1 新型结构和三臂结构

Fig. 1 Configurations of the new sparse aperture and the Tri-Arm sparse aperture

内环上的子镜位于与之相邻的在同一直线上的另两子镜所组成的线段的中点.三臂结构(如图 1(b))也由 9 个子镜组成,其结构可以看成是由三个

相互成  $120^\circ$  的直线组成,也可以看成是由三个环形结构组成的。

两种结构的子镜在空间的不同排列型式,决定了其传递函数在频域的分布状态。

## 3 新型结构与三臂结构的 MTF

在稀疏孔径成像系统中,子镜直径为  $d$ ,包围所有子镜的外切圆直径为  $D$ ,填充因子定义为  $F = \frac{nd^2}{D^2}$ ,  $n$  为子镜个数.通过对新型稀疏孔径结构的分析,三臂结构最大填充因子可以达到 21%,新结构的最大填充因子可达到 23%。

图 2,图 3 和图 4 分别显示了新孔径结构和三臂结构在不同填充因子时的二维 MTF 分布:

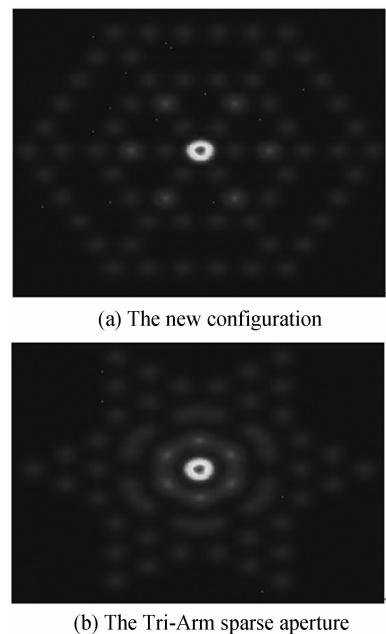
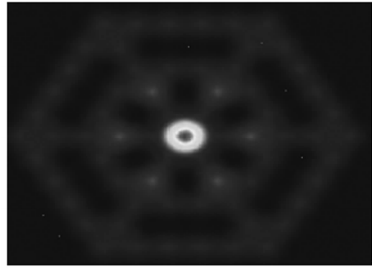


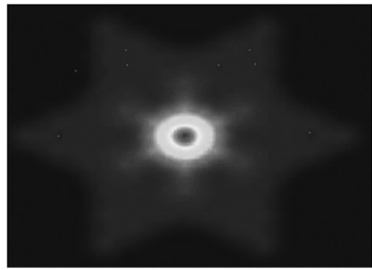
图 2  $F=10\%$  时新型结构和三臂结构的 MTF

Fig. 2 Two dimensional MTFs ( $F=10\%$ ) of the new configuration and the Tri-Arm sparse aperture

由图 2 可以看出,在填充因子为 10% 时,新型孔径结构的 MTF 呈等边六边形分布,且分布比较广,但在低频和高频有 0 值出现.而三臂结构在低频分布则比较均匀,高频部分有大面积的 0 值区.随着填充因子的提高,新型结构和三臂结构的 MTF 均逐渐增大.在图 3 中,当填充因子达到 20% 时,三臂结构的填充因子接近最大填充因子,此时其 MTF 在低频部分高于新的孔径结构,新型结构在高频的 MTF 却高于三臂结构,且各个频率方向分布比较均匀.图 4 为填充因子达到 23% 时新结构的 MTF 分布图.此时新型结构的 MTF 达到最大,将其与图 3(b)相比较,可以看出,新结构的 MTF 分布比三臂结构的 MTF 分布均匀。



(a) The new configuration



(b) The Tri-Arm sparse aperture

图 3  $F=20\%$  时新型结构和三臂结构的 MTF

Fig. 3 Two dimensional MTFs( $F=20\%$ ) of the new configuration and the Tri-Arm sparse aperture

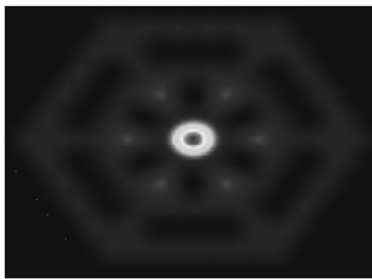


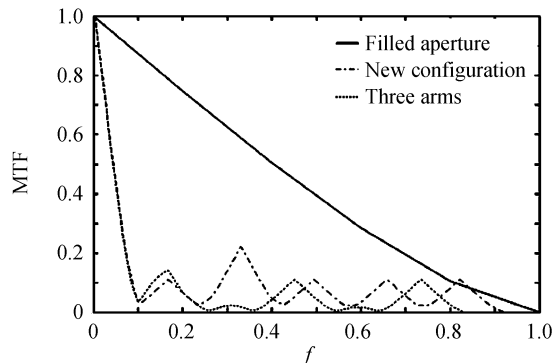
图 4 最大填充因子  $F=23\%$  时新型结构的 MTF

Fig. 4 Two dimensional MTFs( $F=23\%$ ) of the new configuration

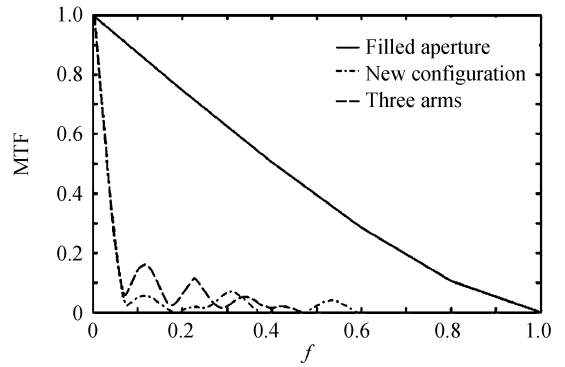
从 MTF 的二维分布图中可以看出,两种结构均在  $\pi/6$  的偶数倍方向取得最大值,在  $\pi/6$  的奇数倍方向取得最小值。

图 5 和图 6 分别是新型结构和三臂结构在不同填充因子时 MTF 在最大截止频率方向和最小截止频率方向的归一化曲线。

图 5 是在填充因子  $F=10\%$  时新型孔径结构和三臂结构的 MTF 在最大截止频率和最小截止频率方向的曲线。由于稀疏孔径结构的填充因子比较小,



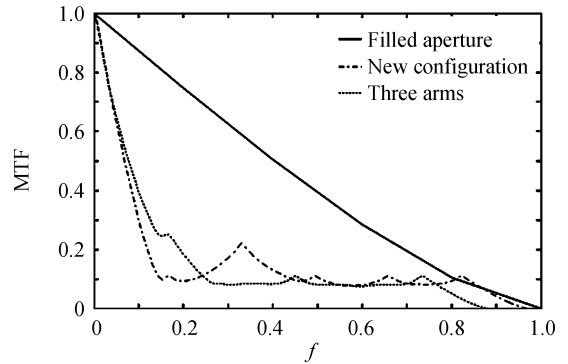
(a) The direction of maximal MTF( $F=10\%$ )



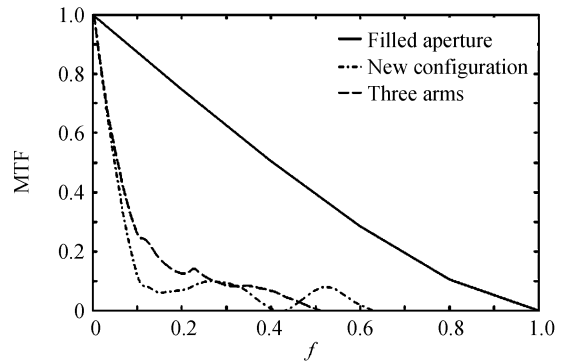
(b) The direction of minimal MTF( $F=10\%$ )

图 5  $F=10\%$  时 MTF 的最大和最小截止频率方向

Fig. 5 MTF curves of the new configuration and the Tri-Arm sparse aperture at the direction of maximal and minimal MTF( $F=10\%$ )



(a) The direction of maximal MTF( $F=20\%$ )



(b) The direction of minimal MTF( $F=20\%$ )

图 6  $F=20\%$  时 MTF 的最大和最小截止频率方向

Fig. 6 MTF curves of the new configuration and Tri-Arm sparse aperture at the direction of maximal and minimal MTF( $F=20\%$ )

所以两种结构的 MTF 均小于全填充孔径的 MTF。

此时三臂结构的 MTF 极大值为 0.14, 新结构的极大值可以达到 0.22. 当填充因子达到 20% 时(如图 6), 由于填充因子增大, 两种结构的 MTF 曲线均趋于平坦, 在最大截止频率方向, 两种结构高频部分的 MTF 接近重合, 新型结构的截止频率大于三臂结构的截止频率. 在最小截止频率方向, 三臂结构的 MTF 在低频部分高于新结构, 新结构在中频部分出现了小部分响应为 0 的区域, 导致其在该方向上的截止频率变小, 但是新结构在这一部分 0 区

域后还有一部分非 0 区,能继续对高频部分响应,且 MTF 值明显高于三臂结构,所以新结构能最大限度的响应高频信息.

图 7 是新型孔径结构和三臂结构的相关点阵分布图.图 7(a)是新型结构的相关点阵图,新型结构的相关点阵主要分布在中频和低频部分,呈等间距分布,这说明新型结构可以对所覆盖的 MTF 产生均匀的响应.而三臂结构的相关点阵(图 7(b))主要分布在低频部分,在高频部分相关点分布很少,这会使系统对高频信息的响应变差.从相关点阵分析可以看出,新型结构对中高频信息的响应优于三臂结构.

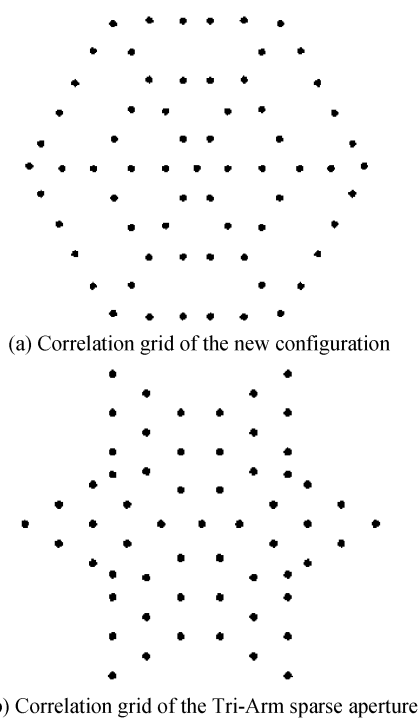


图 7 新型结构和三臂结构的相关点阵图  
Fig. 7 Correlation grid of the new configuration and the Tri-Arm sparse aperture

对新型结构的 MTF 和相关点阵的分析表明:新型结构的 MTF 分布比较均匀,对中频和高频有良好的响应,新型结构整体优于三臂结构.

#### 4 新型孔径结构的等效直径

等效直径是评价稀疏孔径结构的重要指标之一<sup>[5-6]</sup>.但是对等效直径的定义和计算方法却有多种,这些方法也各有自身的优缺点<sup>[7-8]</sup>,评价方法选取的不合适,会过高或者过低的稀疏孔径结构的性能,因此选取一种合适的评价方法来确定稀疏孔径的等效直径是很重要的.这里定义 MTF 覆盖平面内的最大和最小截止频率的平均值作为该稀疏孔径结构等效直径(见表 1).

表 1 两种稀疏孔径结构的等效直径

	Fill factor	10%	20%	$F_{\max}$
Aperture configurations	New-Arm	0.564 5	0.688 5	0.692 3
	Tri-Arm	0.632 0	0.686 0	0.688 5

$F_{\max}$ 是系统的最大填充因子.随着填充因子的增大,两种结构的等效直径都在缓慢增大.在填充因子为 10%时,三臂结构的等效直径大于新结构的等效直径.当填充因子达到 20%时,新结构的填充因子已经超过三臂结构,并且从两者的二维 MTF(图 3)可以看出,新结构较三臂结构在中频和高频部分的 MTF 分布均匀.当两种结构各自达到自己的最大填充因子时,新结构的等效直径仍然大于三臂结构的等效直径,且新结构在二维 MTF 面内分布也更加均匀,新结构表现出了对所包围频率域的良好 MTF 响应.

#### 5 结论

本文介绍了一种新的稀疏孔径结构,并对其基本结构,光瞳函数和调制函数进行了分析.将其 MTF 分布与由 9 孔径组成的三臂结构的 MTF 分布进行了对比.结果表明,组成稀疏孔径系统的子镜在入瞳面上的空间分布能直接影响系统的成像性能,新结构采用了冗余阵列,MTF 随填充因子的变化较小.新结构的 MTF 分布比较均匀,能覆盖比较大的频率平面,对中高频信息的响应比较均匀,在等效直径和频谱分布的均匀性上优于三臂结构.该结构是一种比较优化的稀疏孔径结构,在成像性能方面有一定的优势.

#### 参考文献

- [1] YI Hong-wei, LI Ying-cai, FAN Chao. Research on pupil configuration of equilateral six sub-apertures sparse-aperture system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11):2062-2065.  
易红伟,李英才,樊超.稀疏孔径等边六孔径结构研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11):2062-2065.
- [2] WU Quan-ying. Study on the sparse aperture optical systems [D]. Suzhou: Soochow University, 2006.  
吴泉英.稀疏孔径光学系统成像研究[D].苏州:苏州大学, 2006.
- [3] YI Hong-wei. Study on the key issues of the optical sparse-aperture imaging systems[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 2007.  
易红伟.光学稀疏孔径成像系统关键问题的研究[D].西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2007.
- [4] FLORES J L, PAEZ G, STROJNIK M. Design of a diluted aperture by use of the practical cutoff frequency[J]. *Appl Opt*, 1999, **38**(28):6010-6018.
- [5] ADEN B M, MARJORIE P M. Large sparse aperture space optical systems[J]. *Opt Eng*, 2002, **41**(8):1983-1994.

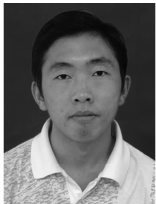
- [6] WANG Da-yong, HAN Ji, LIU Han-cheng, *et al.* Imaging of optical sparse aperture systems and evaluate method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6):1208-1212.  
王大勇, 韩骥, 刘汉承, 等. 光学稀疏孔径系统的成像及其评价方法[J]. 光子学报, 2008, **37**(6):1208-1212.
- [7] ZHU Xi-fang, WU Feng, TAO Chun-kan. Research on image restoration for sparse aperture systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12):2319-2324.  
朱锡芳, 吴峰, 陶纯堪. 稀疏孔径光学系统成像恢复算法研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(12):2319-2324.
- [8] 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.

## Study of a New Sparse-aperture System

LIANG Shi-tong<sup>1,2</sup>, YANG Jian-feng<sup>1</sup>, LI Xiang-juan<sup>1,2</sup>, BAI Yu<sup>1,2</sup>, WANG Hong-wei<sup>1,2</sup>  
(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)  
(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** A new sparse aperture configuration composed by nine sub-apertures is proposed. The pupil function of the new configuration is given and the characteristic of its pupil function is analyzed. The simulation of the new configuration with different fill factors is done by computer. The characteristics of the modulation transfer function (MTF) and the changes of the equivalent diameter are analyzed. The new configuration has a large and uniform coverage in the frequency field. By comparing the new configuration with the Tri-Arms configuration, the result shows that: the new configuration is better than the Tri-Arms configuration in the equivalent diameter and the uniformity of the MTF. The new configuration has advantages in remote imaging.

**Key words:** Sparse aperture; Modulation transfer function; Imaging



**LIANG Shi-tong** was born in 1984. He is studying for his M. S. degree at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS. His major research interests focus on optical design and astronomy.



**YANG Jian-feng** was born in 1969. He received his Ph. D. degree in 1997. Now he is a research fellow and doctor tutor at XIOPM. His research interests focus on optical design and Imaging spectroscopy.