

文章编号 1004-924X(2006)01-0026-08

## 两种稀疏孔径系统的成像研究

吴泉英<sup>1,2</sup>, 钱霖<sup>2,3</sup>, 沈为民<sup>2</sup>

(1. 苏州科技学院 实验中心, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州大学 江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006; 3. 苏州大学 物理科学与技术学院光电系, 江苏 苏州 215006)

**摘要:**介绍一种由九个子镜构成的复合三子镜稀疏孔径系统及其结构形式。将复合三子镜和同样由九个子镜构成的典型 GOLAY 9 稀疏孔径系统进行比较来研究两种稀疏孔径系统的成像情况。通过比较它们的结构特点与调制传递函数,并计算两种稀疏孔径系统的等效直径和实际等效直径,对不同填充因子的两种稀疏孔径模拟成像和维纳滤波,用图像的标准差和对比度指标对两种系统的成像像质进行评价。结果表明:在调制传递函数(MTF)的最大值方向,除归一化频率在 0.55~0.65 以外的空间频率处复合三子镜 I 型的 MTF 明显高于 GOLAY 9 的 MTF。当填充因子 $\geq 20\%$ 时,复合三子镜 I 型和 GOLAY 9 的等效直径和实际等效直径基本接近。在空间频率 24~45 lp/mm 处,图像对比度复合三子镜 I 型优于 GOLAY 9,复合三子镜整体性能与 GOLAY 9 相近,且复合三子镜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;传递函数;成像;滤波

**中图分类号:** TP73; TH703 **文献标识码:** A

## Imaging research of two kinds of sparse-aperture systems

WU Quan-ying<sup>1,2</sup>, QIAN Lin<sup>2,3</sup>, SHEN Wei-min<sup>2</sup>

(1. *Laboratory Center, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215009, China;*  
2. *Jiangsu Province Key Laboratory of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;*  
3. *School of Physical Science & Technology, Soochow University, Suzhou, 215006, China*)

**Abstract:** A sparse aperture configuration named dual three sub-apertures composed of nine sub-apertures was introduced and the models of configuration were described. The dual three sub-apertures system was compared with the GOLAY 9, which composed of nine sub-apertures, to research the imaging of two kinds of sparse aperture systems. The comparison of their characteristics and modulation transfer functions (MTF) with the dual three sub-apertures and the GOLAY 9 were given. The equivalent diameters and the practical equivalent diameters of two kinds of sparse aperture systems were calculated, and the image simulations and Wiener filtered images of two kinds of sparse aperture systems with different fill factors were shown. Their image quality was evaluated with their standard deviation (std) and image contrast. Through the comparison, it is shown that the MTF of the dual three sub-apertures is obviously higher than that of the GOLAY 9 at the direction of maximal MTF except at the normalized spatial frequency between 0.55 to 0.65. When the fill factor is not smaller than

**收稿日期:** 2005-12-22; **修订日期:** 2005-12-25.

**基金项目:** 江苏省自然科学基金资助(No. BK2004202), 教育部博士学科点基金资助(No. 20040285001), 江苏省现代光学技术重点实验室开放课题资助(No. T8108030)。

20%, the equivalent diameters and the practical equivalent diameters of two kinds of sparse aperture systems are almost equal. The image quality of the dual three sub-apertures is better than that of the GOLAY 9 at the spatial frequency between 24~45 lp/mm. The performance of the dual three sub-apertures is almost same as the GOLAY 9. The dual three sub-apertures system has the advantages of symmetric configuration and easy fabrication.

**Key words:** space remote sensing; sparse aperture; MTF; imaging; filtering

## 1 引言

随着空间遥感技术的不断发展,人们对遥感用光学系统的分辨率要求越来越高。分辨率的提高意味着光学系统口径的增大,但口径增大受光学材料、制造工艺等的限制,同时增大口径必将导致系统的体积和质量相应增大,会对整个系统的发射带来困难。因此,传统的光学系统主镜为一整块镜子的方案已不适应现代航天技术的要求,人们开始寻求新的技术方案和途径来提高空间遥感器的分辨率<sup>[1-2]</sup>。稀疏孔径系统是用一个个子孔径按一定规律排列组合在一起,用来代替整个一个大孔径区域,各个子孔径的口径比整个大口径变小了,克服了由于光学系统口径太大所带来的困难,却能获得和大口径光学系统相当的空间分辨率。典型的稀疏孔径结构有环型、三臂和 GOLAY 结构等<sup>[3-4]</sup>。本文介绍一种新颖的稀疏孔径结构—复合三子镜<sup>[5]</sup>,描述了其结构形式,并进行模拟成像和 Wiener 滤波,通过与 GOLAY 9 稀疏孔径相比较,进一步分析了其结构特点、成像质量和图像恢复情况。

## 2 复合三子镜结构形式和 GOLAY 9 稀疏孔径结构

复合三子镜由九个子镜组成(如图 1a),每三个子镜组成一个次级光瞳,直径为  $D_1$ ,子镜直径为  $d$ ,三个次级光瞳组成一个主光瞳,直径为  $D$ ,因此称之为复合三子镜结构。

根据复合三子镜中九个子镜的排列方式不同,复合三子镜有三种结构形式,分别称为复合三子镜 I 型、复合三子镜 II 型、复合三子镜 III 型(如图 2)。复合三子镜 I 型其三个次级光瞳两两相切,复合三子镜 II 型每个次级光瞳中的三个子

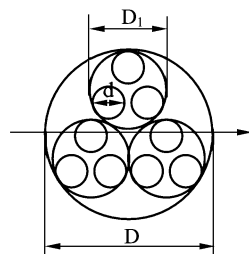


图 1(a) 复合三子镜结构

Fig. 1(a) Configuration of the dual three sub-apertures

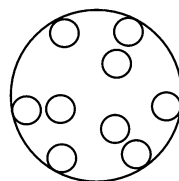


图 1(b) GOLAY 9 结构

Fig. 1(b) Configuration of the GOLAY 9

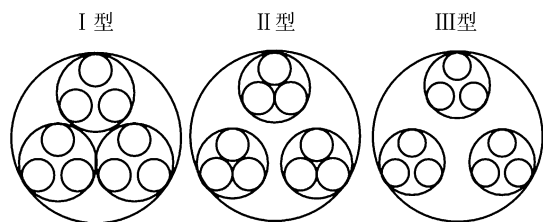


图 2 三种复合三子镜结构

Fig. 2 Three kinds of models of dual three sub-apertures

镜两两相切,复合三子镜 III 型中三个次级光瞳及次级光瞳中的子镜均不相切。

GOLAY 9 稀疏孔径结构也由九个子镜组成(如图 1b),九个子镜按一定的规律分布在一个大圆内,形成特定的稀疏孔径结构。

## 3 复合三子镜和 GOLAY 9 的 MTF

### 3.1 稀疏孔径的填充因子

稀疏孔径系统用一个个子孔径排列在一起代

替整个大孔径,其重要的一个参数指标为填充因子。填充因子通常用  $F$  表示

$$F = \frac{\text{稀疏孔径的通光面积}}{\text{全孔径的通光面积}}$$

复合三子镜和 GOLAY9 都属于九镜稀疏孔径系统,其填充因子  $F = \frac{9d^2}{D^2}$ ,其中  $d$  为子镜的直径, $D$  为主光瞳的直径。

填充因子的大小说明了稀疏孔径系统的稀疏程度,人们都渴望在填充因子尽可能小的情况下,稀疏孔径光学系统能满足实际使用要求。

### 3.2 不同填充因子的复合三子镜和 GOLAY 9 稀疏孔径的 MTF

复合三子镜 I 型、II 型和 III 型由于其子孔径排列不同,对应的 MTF 分布也不同。不同型复合三子镜的 MTF 都具有相同的对称性,呈正六边形分布。比较而言,II 型子镜间相对距离远近差别大,导致其 MTF 向高低频两端集中,中频处易出现零点,冗余度高。III 型的 MTF 无论是强度,还是在二维频谱面上的分布都比较均匀,而且结构灵活。I 型的 MTF 特性介于 II 型和 III 型之间<sup>[5]</sup>。下面将复合三子镜 I 型和 GOLAY9 稀疏孔径的 MTF 进行比较。

从图 3~图 5 MTF 三维和二维显示图可知:

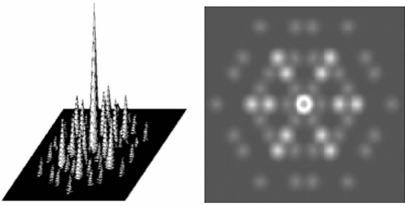


图 3(a) 复合三子镜 I 型 MTF 三维和二维显示图  $F=10\%$

Fig. 3(a) Three dimensional and two dimensional MTFs( $F=10\%$ ) of dual three sub-aper-

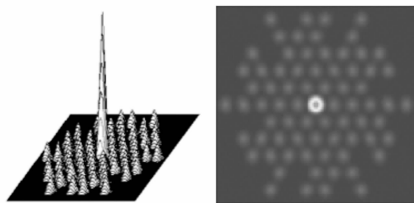


图 3(b) GOLAY 9 MTF 三维和二维显示图  $F=10\%$

Fig. 3(b) Three dimensional and two dimensional MTFs( $F=10\%$ ) of the GOLAY 9

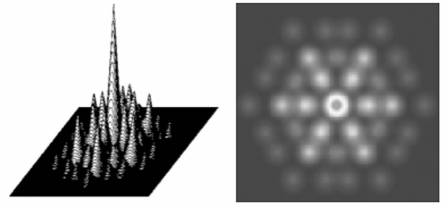


图 4(a) 复合三子镜 I 型 MTF 三维和二维显示图  $F=20\%$

Fig. 4(a) Three dimensional and two dimensional MTFs( $F=20\%$ ) of dual three sub-apertures I

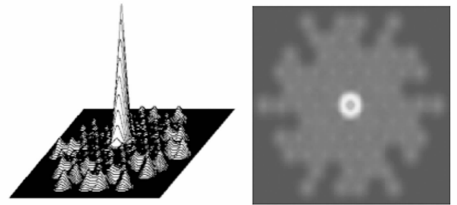


图 4(b) GOLAY 9 MTF 三维和二维显示图  $F=20\%$

Fig. 4(b) Three dimensional and two dimensional MTFs( $F=20\%$ ) of the GOLAY 9

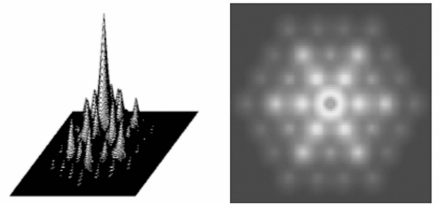


图 5(a) 复合三子镜 I 型 MTF 三维和二维显示图  $F=30\%$

Fig. 5(a) Three dimensional and two dimensional MTFs( $F=30\%$ ) of dual three sub-apertures I

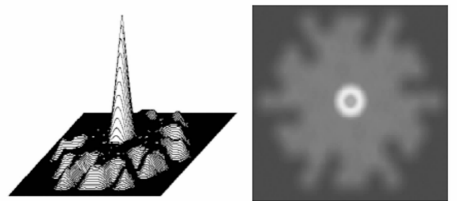


图 5(b) GOLAY 9 MTF 三维和二维显示图  $F=30\%$

Fig. 5(b) Three dimensional and two dimensional MTFs( $F=30\%$ ) of the GOLAY 9

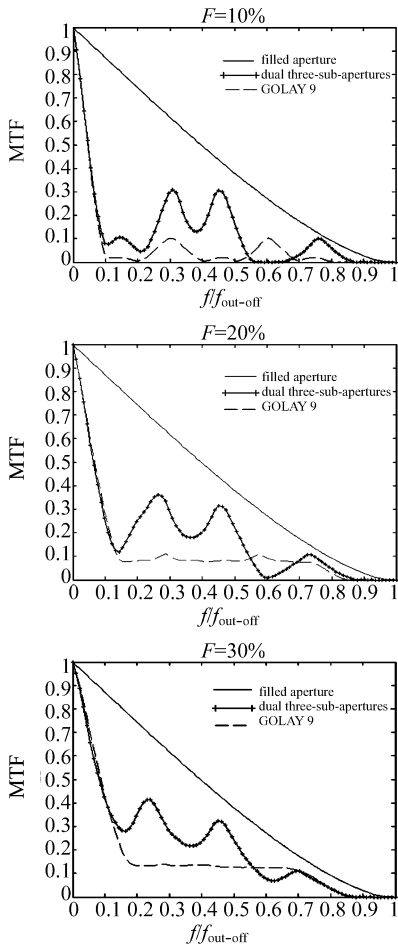


图 6 不同填充因子复合三子镜 I 型和 GOLAY 9 的 MTF 曲线(MTF 最大值方向)  
 Fig. 6 MTF curves of the dual three sub-apertures I and GOLAY 9 with different fill factors at the direction of maximal MTF

随着填充因子  $F$  的增大,复合三子镜 I 型和 GOLAY 9 的调制传递函数 MTF 也随着增大,比较复合三子镜 I 型和 GOLAY 9 的 MTF,复合三子镜 I 型 MTF 呈六边形对称分布,GOLAY 9 的 MTF 分布均匀。

由于稀疏孔径系统的通光面积比全孔径系统的通光面积大大减小,因此,稀疏孔径系统的 MTF 比全孔径系统的 MTF 大大下降。图 6 和图 7 分别是全孔径、复合三子镜 I 型和 GOLAY 9 不同填充因子的 MTF 最大值方向归一化曲线和 MTF 最小值方向归一化曲线。在  $\pi/3$  的整数倍方向复合三子镜 I 型的 MTF 值最大,归一化频率在 0.25 和 0.45 附近,其 MTF 值为极大值, $F=10\%$  时,极大值约为 0.3, $F=20\%$  时,极大值约

为 0.35, $F=30\%$  时,极大值约为 0.40。在  $\pi/6$  的奇数倍方向 MTF 值最小,MTF 为极小值处的值  $< 0.20$ 。GOLAY 9 的 MTF 分布均匀,当  $F > 10\%$ ,归一化频率  $> 0.15$  时,MTF 的起伏变化  $< 0.05$ 。

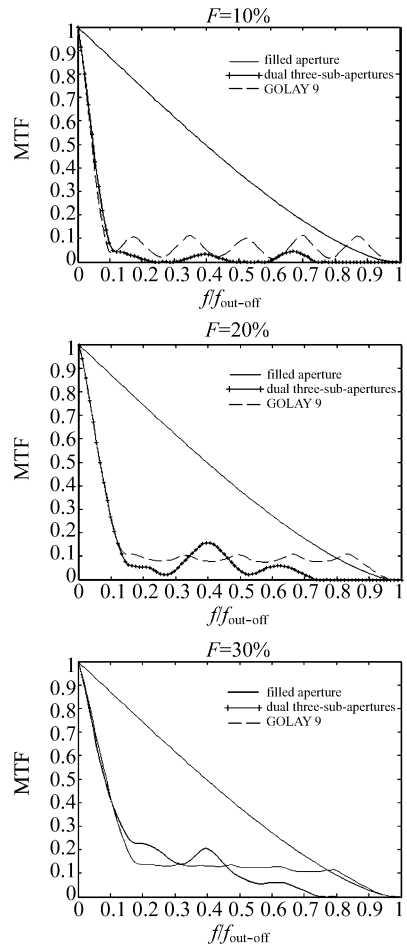


图 7 不同填充因子复合三子镜 I 型和 GOLAY 9 的 MTF 曲线(MTF 最小值方向)  
 Fig. 7 MTF curves of the dual three sub-apertures I and GOLAY 9 with different fill factors at the direction of minimal MTF

比较复合三子镜 I 型和 GOLAY 9 的 MTF 曲线。和全孔径系统相比,复合三子镜 I 型和 GOLAY 9 在低频部分的 MTF 损失较大,在高频部分的 MTF 损失相对小。在 MTF 的最大值方向,复合三子镜 I 型的 MTF 明显高于 GOLAY 9 的 MTF,在归一化频率 0.60 附近区域,复合三子镜 I 型的 MTF 比 GOLAY 9 的 MTF 低。在 MTF 的最小值方向(图 7),在大部分空间频率处,复合三子镜 I 型的 MTF 比 GOLAY 9 的

MTF 低, GOLAY9 的 MTF 曲线起伏较小。

图 6 和图 7 中实线代表全孔径系统 MTF 曲线, 加十字线代表复合三子镜 I 型 MTF 曲线, 虚线代表 GOLAY9 的 MTF 曲线。图中横坐标为归一化空间频率。

### 3.3 两种稀疏孔径的等效直径和实际等效直径

稀疏孔径的等效直径定义为: MTF 与稀疏孔径 MTF 为非零值的面积相当的圆孔所对应的直径。

全孔径光学系统的空间分辨率随光学系统的口径增大而提高, 其 MTF 值随空间频率的增加而下降, 在截止频率区域内, MTF 值大于零。而稀疏孔径光学系统, 由于系统的通光面积减少, 在小于截止频率的区域内, MTF 可能有零点出现, 则对应空间频率的信息就丢失, 这部分不可恢复的中间空间频率的信息, 对整个系统的影响较大。定义 MTF 第一次出现零时所对应的空间频率为实际空间截止频率  $f_R$ <sup>[6]</sup>, 截止频率与  $f_R$  相当的光学系统的光瞳直径定义为稀疏孔径系统的实际等效直径。

分别计算复合三子镜 I 型和 GOLAY 9 不同填充因子的等效直径和实际等效直径, 结果列于表 1。

表 1 两种稀疏孔径的等效直径和实际等效直径

Tab.1 Equivalent diameters and the practical equivalent diameters of two kinds of sparse aperture systems

填充因子	稀疏孔径	$F=10\%$	$F=20\%$	$F=30\%$
等效直径	复合三子镜 I 型	0.6798	0.7989	0.8139
	GOLAY 9	0.8231	0.8798	0.8996
实际等效直径	复合三子镜 I 型	0.2109	0.5969	0.7578
	GOLAY 9	0.5500	0.5859	0.8236

从表 1 可见, 等效直径 GOLAY 9 大于复合

三子镜 I 型, 在相同情况下, MTF 出现零点的几率 GOLAY 9 系统小于复合三子镜 I 型, 也即 GOLAY 9 的冗余度小于复合三子镜 I 型。实际等效直径随填充因子的变化而变化,  $F=10\%$  和  $F=30\%$  时, GOLAY9 的实际等效直径大于复合三子镜, 只有在  $F=20\%$  时 GOLAY9 的实际等效直径小于复合三子镜。

## 4 两种结构模拟成像和滤波后的图像比较

### 4.1 模拟成像

稀疏孔径系统的调制传递函数 MTF 较全孔径系统明显下降, MTF 的下降引起成像质量的下降, 下面分别对不同填充因子复合三子镜 I 型和 GOLAY 9 模拟成像, 比较它们模拟成像的情况。

用一块标准的分辨率板作为物体, 光学系统为上述两种稀疏孔径结构, 不考虑像差, 相对孔径  $1/20$ , 波长  $0.55 \mu\text{m}$ 。应用 ZEMAX 光学软件将物体经上述系统模拟成像。

从图 8 和图 9 可见, 随着填充因子  $F$  增大, 像的对比度增强。比较复合三子镜 I 型和 GOLAY 9 的成像, 在相同填充因子的情况下, 在线对数  $<45$  时, 图像分辨率复合三子镜 I 型高于 GOLAY 9, 线对数  $>45$  时, 图像分辨率 GOLAY 9 比复合三子镜高。

### 4.2 Wiener 滤波<sup>[7-8]</sup>后的图像比较

取不同填充因子的复合三子镜 I 型和 GOLAY9 稀疏孔径分别成像, 并加随机噪声, 信噪比 (SNR) 为 20, 然后用 Wiener 滤波恢复图像, 比较两种稀疏孔径结构的情况, Wiener 滤波后, 图像质量较原来模拟成像及加噪声时的图像明显改善,

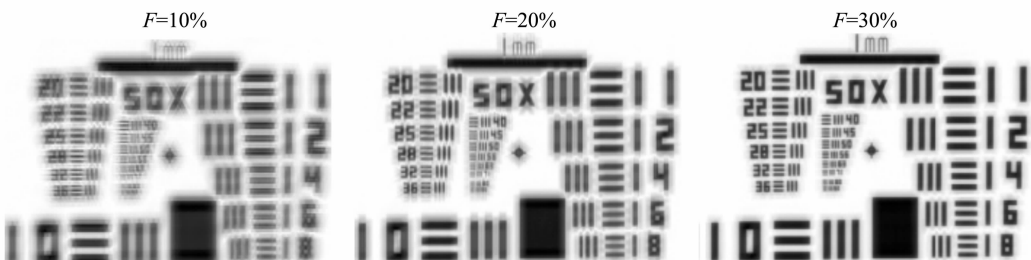


图 8 不同填充因子复合三子镜 I 型模拟成像

Fig. 8 Image simulation of the dual three sub-apertures I with different fill factors

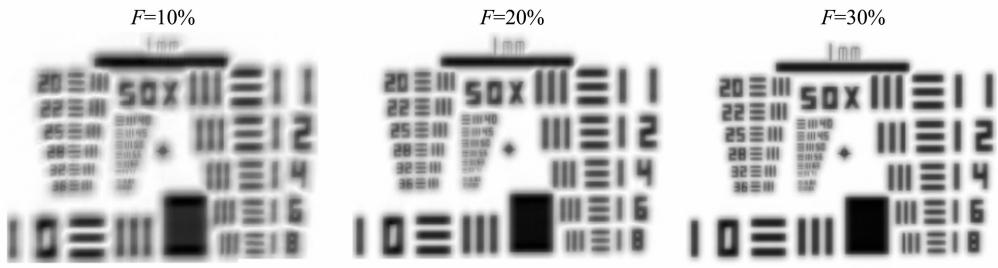


图 9 不同填充因子 GOLAY 9 模拟成像

Fig. 9 Image simulation of the GOLAY 9 with different fill factors

滤波后,在线对数 < 45 时,图像分辨率复合三子镜 I 型比 GOLAY9 高。

### 4.3 像质评价和比较

#### 4.3.1 稀疏孔径系统图像的标准差<sup>[9]</sup>

用稀疏孔径系统所成像的灰度值与全孔径系统所成像的灰度值进行比较,求两者的标准差,来评价稀疏孔径系统成像的像质情况,也即稀疏孔径系统成像和全孔径系统成像的差异比较。

$$\text{std} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (E_s(i, j) - E_o(i, j))^2}{m \times n - 1}}, \quad (1)$$

式(1)中  $E_s(i, j)$  为稀疏孔径系统图像某像素的灰度值,  $E_o(i, j)$  为全孔径系统图像某像素的灰度值,  $m \times n$  是图像的矩阵大小。

#### 4.3.2 标准差值的比较

从表 2 数值可知:随着填充因子的增大,两种稀疏孔径的标准差值减小,即随着填充因子的增大,两种稀疏孔径系统所成像与全孔径系统所成像越相近,随填充因子的增大,稀疏孔径的成像质量越好。比较复合三子镜 I 与 GOLAY 9,在填充

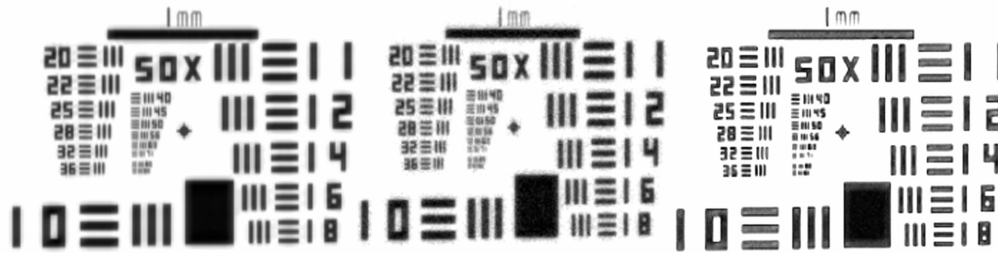


图 10 复合三子镜 I 型模拟成像、加噪声和 Wiener 滤波图  $F=30\%$

Fig. 10 Image simulation, added-noise and Wiener filtered images for the dual three sub-apertures I with 30%-fill-factor

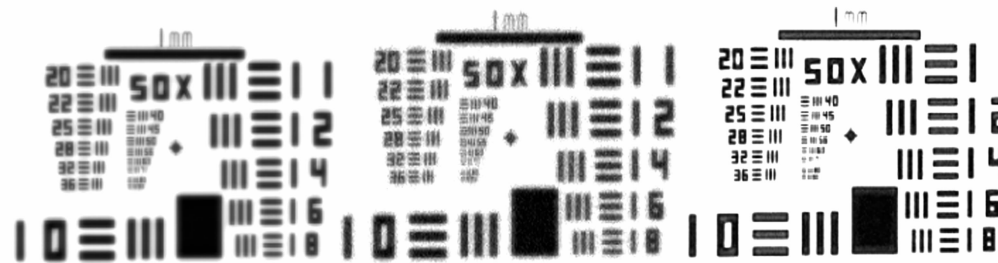


图 11 GOLAY 9 模拟成像、加噪声和 Wiener 滤波图  $F=30\%$

Fig. 11 Image simulation, added-noise and Wiener filtered images for the GOLAY 9 with 30%-fill-factor

因子相同的情况下,复合三子镜 I 的标准差值略小于 GOLAY 9 相应的值。

表 2 两种稀疏孔径系统标准差

Tab.2 Standard deviation (std) of two kinds of sparse aperture systems

图像		填充因子	填充因子	填充因子
		10%	20%	30%
复合三子镜 I	加噪声后	90.27	86.42	81.60
	滤波后	86.24	75.56	75.45
GOLAY 9	加噪声后	92.00	86.55	82.37
	滤波后	91.49	80.55	78.06

#### 4.3.3 模拟成像的对比度比较

逐一计算模拟像及 Wiener 滤波后图像中各线对的对比度值,并画出对比度曲线,图 12 是 Wiener 滤波前图像对比度曲线,图 13 是 Wiener 滤波后对应的图像对比度曲线,图中稀疏孔径的填充因子为 30%。从图中可见,Wiener 滤波后,两种稀疏孔径的对比度较滤波前明显增大。Wiener 滤波前后,在 45 线对处,复合三子镜 I 和 GOLAY 9 的图像对比度基本相当,在大于 45 线对处,GOLAY 9 的图像对比度大于复合三子镜 I,对照图 10 和图 11,GOLAY 9 在大于 45 线对的空间频率处,图像分辨率高于复合三子镜 I 的图像分辨率。

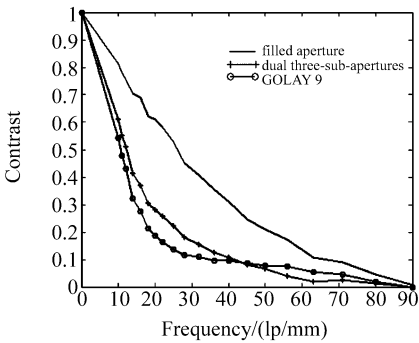


图 12 Wiener 滤波前图像对比度曲线

Fig.12 Contrast curves before Wiener filtering

图 12 和图 13 中,实线代表全孔径系统对应

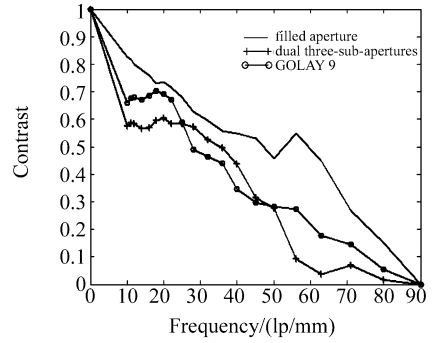


图 13 Wiener 滤波后图像对比度曲线

Fig.13 Contrast curve after Wiener filtering

曲线,加十字线代表复合三子镜 I 对应曲线,加圆圈线代表 GOLAY 9 对应曲线。

从标准差值和对比度曲线图中可以分析两种稀疏孔径系统的成像情况,从表 2 看出标准差值复合三子镜 I 略小于 GOLAY 9,尽管两种稀疏孔径标准差值相差很小,而实际图像的对比度相差已很明显。

## 5 结 论

复合三子镜结构不同于已有的稀疏孔径结构,是一种新颖的稀疏孔径系统。比较了复合三子镜和 GOLAY 9 的结构、MTF 分布、模拟成像和 Wiener 滤波情况。复合三子镜和 GOLAY 9 都由九个子镜组成,MTF 分布各有特点,模拟成像和 Wiener 滤波后的图像,通过标准差值计算和对比度曲线比较,在空间频率为 24~45 lp/mm 时,图像对比度复合三子镜 I 优于 GOLAY 9。在结构上,复合三子镜由三个相同的次级光瞳复合而成,在成像效果相近的情况下,复合三子镜更易于装配和调试,因此其实用性较好。

致谢:本论文是在导师薛鸣球院士的悉心指导下完成的,在此表示衷心的感谢。

## 参考文献:

- [1] 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.  
WANG H T,ZHOU B F. Astronomical optical interference technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003,11(4): 320-325. (in Chinese)
- [2] 王海涛,周必方. 光学综合孔径干涉成像技术[J]. 光学 精密工程,2002, 10(5): 434-442.  
WANG H T,ZHOU B F. Optical synthesis aperture interference image technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(5): 434-442. (in Chinese)

- [3] FIETE R D, TANTALO T A. Image quality of sparse-aperture designs for remote sensing [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41 (8): 1957-1968.
- [4] MEINEL A B, MEINEL M P. Large sparse-aperture space optical systems [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41 (8): 1983-1994.
- [5] 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.  
QIAN L, WU Q Y, WU F, *et al.* Study on sparse-aperture imaging of dual three sub-apertures design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(8): 1030-1035. (in Chinese)
- [6] HARVEY J E, ROCKWELL R A. Performance characteristics of phased array and thinned aperture optical telescopes [J]. *Optical Engineering*, 1998, 27 (9): 762-768.
- [7] ZHENG Y F, CUI X H. CT scout Z-resolution improvement with image restoration methods [J]. *SPIE*, 2003, 5032: 1851-1857.
- [8] WU Q Y, QIAN L, SHEN W M. Image recovering for sparse-aperture systems [J]. *SPIE*, 2005, 5642: 478-486.
- [9] 吴泉英, 钱霖, 沈为民. 稀疏孔径系统的成像和图像复原研究 [J]. *激光杂志*, 2005, 26(6): 40-42.  
WU Q Y, QIAN L, SHEN W M. Imaging and image recovering of sparse-aperture systems [J]. *Laser Journal*, 2005, 26(6): 40-42. (in Chinese)
- [10] GUAN L, WARD R K. Restoration of stochastically blurred images by the geometrical mean filter [J]. *Optical Engineering*, 1990, 29 (4): 289-295.

作者简介: 吴泉英(1965—), 女, 江苏吴江人, 高级工程师, 苏州大学现代光学技术研究所博士研究生, 主要研究方向为光学设计和图像信息处理。E-mail: wqycyh@tom.com