

文章编号 1004-924X(2010)07-1453-07

## 类 Golay6 稀疏孔径结构

吴泉英<sup>1</sup>, 钱霖<sup>2,3</sup>

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

**摘要:**分析了 Golay 稀疏孔径结构阵列, 在正三角形网格分布的基础上, 找出 Golay 结构子孔径非冗余分布的规律, 提出了一种类 Golay6 新型稀疏孔径结构。按照一维阵列排列及其非冗余分布的规律, 类 Golay6 结构的子孔径在光瞳面上按三角形网格分布在正三角形的边长上, 推导出类 Golay6 调制传递函数(MTF)公式, 给出 MTF 分布, 并且与 Golay6 结构进行了比较。结果显示, 类 Golay6 结构的 MTF 分布均匀, 最大截止空间频率与 Golay6 结构的相等, 实际等效口径比大于 Golay6 结构 9.1%。另外, 类 Golay6 子孔径排列比 Golay6 结构的简单, 是一种非冗余的新型稀疏孔径结构。

**关键词:** 光学望远镜; 稀疏孔径; 光瞳结构; 调制传递函数

**中图分类号:** TH743; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1453

## Pupil configuration of quasi-Golay6 sparse-aperture

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

- (1. *School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;*  
2. *School of Physics Science & Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;*  
3. *Jiangsu' Key Laboratory of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

**Abstract:** The sparse aperture array of Golay is analyzed. Then, the rule of Golay nonredundant configuration arrangement is derived based on the equilateral triangular set and a novel sparse aperture configuration named quasi-Golay6 is proposed. According to the rules of one dimensional array arrangement and nonredundant configuration arrangement, the sub-apertures of quasi-Golay6 on the entrance pupil are arranged on sides of an equilateral triangle. The Modulation Transfer Function (MTF) formula of quasi-Golay6 is deduced, and its distribution is also given out. The MTFs of quasi-Golay6 are compared with those of Golay 6 to investigate the characteristics of quasi-Golay6. The results demonstrate that the MTF distribution of quasi-Golay6 is uniform at the spatial frequency space, its highest cutoff spatial frequency is the same as that of Golay6 with the same fill factor, and the ratio of practical effective diameters is 9.1% larger than that of Golay6. It is concluded that the sub-aperture arrangement of quasi-Golay6 is simpler than that of Golay6, and is a nonredundant configuration with sparse apertures.

**收稿日期:** 2010-03-22; **修订日期:** 2010-05-20.

**基金项目:** 江苏省高校自然科学基金资助项目 (No. 07KJD140190); 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK2009129); 江苏政府留学奖学金和江苏省“333”人才工程资助项目

**Key words:** optical telescope; sparse-aperture; pupil configuration; Modulation Transfer Function (MTF)

## 1 引言

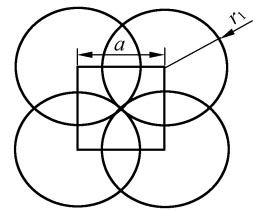
在衍射极限条件下, 遥感器光学系统的分辨率为工作波长与入瞳口径之比, 表明口径大的光学系统才会有高的空间分辨率。也就是说, 为了保持足够的地面空间分辨率, 需要增大光学系统的焦距和口径。近年来, 美国和欧盟正在致力于更大口径的天基和地基空间探测光学系统的研究, 大口径光学望远镜已成为望远镜的发展趋势。不过, 受光学材料、加工、制造成本和运载能力的制约, 用现有的技术还很难甚至不可能研制出满足要求的大口径光学系统, 因此, 探索光学遥感器的新原理、新途径, 采用新材料和新技术, 研制重量超轻、结构可折叠展开、造价低、便于运载的大口径空间光学遥感器十分必要。其中, 稀疏孔径光学成像系统的研制尤其令人关注, 该项研究将为高分辨率光学遥感系统的实现开辟新的技术途径。稀疏孔径是将数个较小光学孔径以一定规则排列, 构成一个大的光学孔径, 整个系统的通光面积比单个大孔径小, 但所能捕获的目标信息与单个大孔径系统相当<sup>[1-6]</sup>。稀疏孔径光学系统的子孔径结构与排列直接影响稀疏孔径光学系统在工程中实施的可能性, 因此, 进行稀疏孔径结构研究十分必要。Golay 稀疏孔径结构是一种非冗余结构<sup>[7]</sup>。本文在研究 Golay 结构的基础上, 提出了类 Golay6 新型稀疏孔径结构, 详细分析了类 Golay6 结构的孔径分布和调制传递函数(MTF), 并与 Golay6 结构进行了比较。

## 2 Golay 结构阵列排列

稀疏孔径光学系统的光学孔径由一个个子孔径组成, 其 MTF 由子孔径对应的子 MTF 组成, 子 MTF 的大小及分布决定整个系统的 MTF。子 MTF 在频率域内分布的位置由子孔径中心点

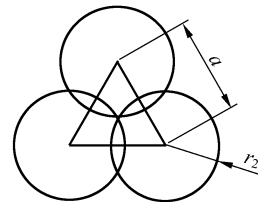
之间的相对位置决定<sup>[8]</sup>, 子 MTF 相对位置的分布不适当, 稀疏孔径结构的 MTF 在频谱内较低频率处会出现零点。

阵列分布为正方形及三角形的两种 MTF 频谱分布如图 1 所示。若阵列分布为正方形网格, 子 MTF 中心间距为  $a$ , 则子 MTF 的半径  $r_1$  必须大于  $\frac{\sqrt{2}}{2}a(0.707a)$ , 稀疏孔径的 MTF 才不会出现零点, 如图 1(a)。若阵列分布为三角形网格, 子 MTF 中心间距仍为  $a$ , 则子 MTF 的半径  $r_2 > \frac{\sqrt{3}}{3}a(0.577a)$  时, 如图 1(b), MTF 才不会出现零点。比较两种频谱的阵列分布, 三角形网格阵列是较优越的相关阵列。



(a) 正方形阵列 MTF 分布

(a) Square MTF arrangement



(b) 三角形阵列 MTF 分布

(b) Triangular MTF arrangement

图 1 正方形与三角形阵列 MTF 分布

Fig. 1 MTF distributions of square and triangular sets

Golay6 结构相关点阵, 即子 MTF 中心点在频域内的分布位置如图 2 所示, 相关点阵分布由一个个小正三角形组成六边形网格, 在中心处按 6 个正三角形向外延伸组成 1 个相关点阵的分

布。假设相关点阵中最小的正三角形边长为  $a$ , 相关点矢径  $q=a$  时, 互相关点个数为 6;  $q=\sqrt{3}a$  时, 对应互相关点数为 6;  $q=2a$  时, 对应互相关点数也是 6, 互相关点数之和分别为 6, 12, 18, 相关点阵中互相关点数之和为  $m(m-1)$ ,  $m$  对应子孔径个数。不同矢径对应互相关点数及子孔径数分布数据如表 1 所示。当子孔径数分别为 3, 4, 6, 7, 9……时, 对应的稀疏孔径为 Golay3, Golay4, Golay6, Golay7, Golay9……, 从表 1 中可以看出 Golay6 结构对应的矢径  $q=\sqrt{7}a$ 。

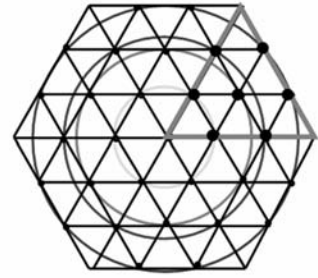


图 2 Golay6 三角形网格相关点阵分布

Fig. 2 Triangular set arrangement at spatial frequency space

表 1 互相关点分布表

Tab. 1 Arrangements of crosscorrelation points

Vector $q$	$a$	$\sqrt{3}a$	$2a$	$\sqrt{7}a$	$3a$	$\sqrt{12}a$	$\sqrt{13}a$	$4a$	$\sqrt{19}a$	……
Number of crosscorrelation points	6	6	6	12	6	6	12	6	12	……
Amounts of crosscorrelation points	6	12	18	30	36	42	54	60	72	……
Number of sub-apertures	3	4		6		7		9		……

由稀疏孔径 MTF 分析可知, 二维频谱的中心频率处为子孔径的自相关点, 即  $m$  个(子孔径数)子 MTF 的叠加, 在其它位置共有  $P_m^2 = m \times (m-1)$  个子 MTF, 子孔径数为  $m$  的稀疏孔径系统在频谱域内的子 MTF 的个数为  $m+m \times (m-1) = m^2$ 。Golay6 结构的子 MTF 均匀分布于如图 2 所示的三角形网格的各相关点上, 在频谱面内子 MTF 相互不重叠, 其结构是非冗余的。在 Golay 结构对应光瞳面上(如图 3), 子孔径必定位于三角形网格点上, 网格的最小单元边长为  $b$ , 与频谱面上网格的最小单元  $a$  之间关系为  $a = \frac{b}{\lambda f}$ 。从图 3 可见, Golay6 子孔径对之间的最大间距为  $\sqrt{7}b$ , 与图 2 中频谱面矢径  $q=\sqrt{7}a$  对应。若  $D$  为

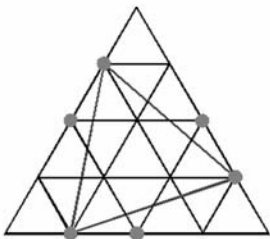


图 3 Golay6 光瞳结构

Fig. 3 Pupil configuration of Golay6

Golay6 结构包围孔径直径,  $d$  为子孔径直径, 则  $b = \frac{3}{\sqrt{21}} \cdot \frac{D-d}{2}$ , 并且不存在 2 个分布位置和方向完全相同的子孔径对。

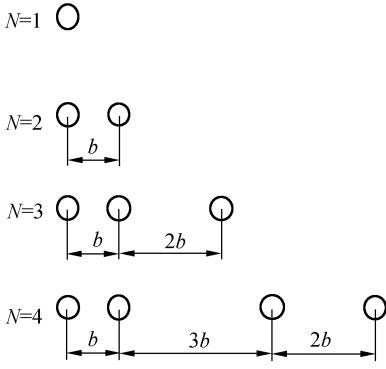
### 3 类 Golay6 结构阵列

在对光瞳面上子孔径呈三角形网格分布的 Golay 结构分析的基础上, 本文根据一维阵列排列及其非冗余分布规律, 提出类 Golay6 结构。

图 4 所示是一维子孔径排列及其相关, 图 4 (a) 为子孔径排列, (b) 为子孔径间的相关(频谱)。若  $N$  为子孔径个数, 相邻子孔径之间相隔的最小单元为  $b$ , 则子孔径间的最大间距为  $b_{\max} = \frac{N(N-1)}{2}b$ , 子孔径的最大间距是指相距最远的 2

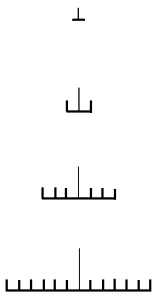
个子孔径中心之间的距离, 其中  $\frac{N(N-1)}{2}$  是可能的子孔径对数, 这样的线性阵列是非冗余的, Bracewell 给出了充分的证明<sup>[9]</sup>。从图 4 可见, 非冗余阵列的空间频率响应分布均匀, 在零频处, 空间频率响应值是子孔径自相关的重叠。除零频以外, 子孔径对的互相关等间隔分布。

类 Golay6 结构在光瞳面上子孔径位于三角形网格上, 三角形每一边采用图 4 所示的三孔径



(a)子孔径排列(N=1~4)

(a)Linear arrays(N=1~4)



(b)频谱响应(N=1~4)

(b)Spatial sensitivities of linear arrays

图 4 线性阵列与频谱响应

Fig. 4 Linear arrays and their spatial sensitivities

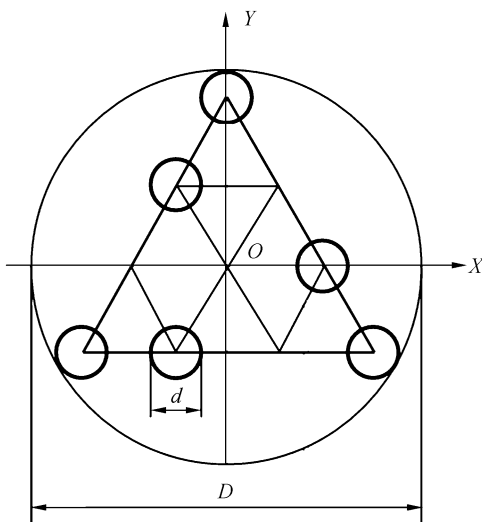


图 5 类 Golay6 光瞳面子孔径位置

Fig. 5 Arrangement of quasi-Golay6 on pupil

的 6 个子孔径分布在等边三角形网格上,其中 3 个子孔径分布在三角形的 3 个顶点,其余 3 个子孔径分别与顶点上的 3 个子孔径相邻,相距最远的子孔径间距离为  $3b$ ,子孔径排列比 Golay6 简单。图 5 中  $D$  为类 Golay6 结构包围孔径直径, $d$  为子孔径直径, $b = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{D-d}{2}$ ,填充因子  $F$  为子孔径面积之和与包围孔径面积之比。

$$F_{\text{quasi-Golay6}} = \frac{6d^2}{D^2} \quad (1)$$

### 4 类 Golay6 结构的 MTF

由图 5 类 Golay6 结构子孔径分布得出其光瞳函数为:

$$P(x, y) = \text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + (y - \frac{D-d}{2})^2}}{d/2}\right) + \text{circ}\left(\frac{\sqrt{[(x + \frac{\sqrt{3}}{12}(D-d)]^2 + (y \pm \frac{D-d}{4})^2]}}{d/2}\right) \cdot \text{circ}\left(\frac{\sqrt{[(x \pm \frac{\sqrt{3}}{4}(D-d)]^2 + (y + \frac{D-d}{4})^2]}}{d/2}\right) + \text{circ}\left(\frac{\sqrt{[(x - \frac{\sqrt{3}}{6}(D-d)]^2 + y^2]}}{d/2}\right), \quad (2)$$

由光瞳函数经变换推导出相应的 MTF 为:

$$\begin{aligned} \text{MTF} = & \text{MTF}_d + \frac{1}{6} \left[ \sum_{m=1}^3 \text{MTF}_d(\xi \pm \frac{m \times \sqrt{3}}{6} \rho_{D-d}, \eta + \frac{\rho_{D-d}}{4}) + \sum_{m=1,3,5} \text{MTF}_d(\xi \pm \frac{m \times \sqrt{3}}{12} \rho_{D-d}, \eta + \frac{\rho_{D-d}}{4}) + \sum_{m=-5,-3,-1} \text{MTF}_d(\xi \pm \frac{m \times \sqrt{3}}{12} \rho_{D-d}, \eta - \frac{\rho_{D-d}}{4}) + \sum_{m=-2}^0 \text{MTF}_d(\xi \pm \frac{m \times \sqrt{3}}{6} \rho_{D-d}, \eta + \frac{\rho_{D-d}}{2}) + \sum_{m=0}^2 \text{MTF}_d(\xi \pm \frac{m \times \sqrt{3}}{6} \rho_{D-d}, \eta - \frac{\rho_{D-d}}{2}) + \sum_{m=-3,1,3} \text{MTF}_d(\xi \pm \frac{m \times \sqrt{3}}{12} \rho_{D-d}, \eta + \frac{3\rho_{D-d}}{4}) + \sum_{m=-3,-1,3} \text{MTF}_d(\xi + \frac{m \times \sqrt{3}}{12} \rho_{D-d}, \eta - \frac{3\rho_{D-d}}{4}) \right], \quad (3) \end{aligned}$$

式(3)中  $\text{MTF}_d$  为子孔径在频谱面上的子

一维阵列分布,如图 5 所示,这样提出的类 Golay6 结构是非冗余的稀疏孔径结构,其光瞳面上

MTF,其中  $\rho_{D-d} = (1 - \sqrt{\frac{F}{6}})\rho_{DC}$ ,  $F$  为稀疏孔径的填充因子,  $\rho_{DC} = \frac{D}{\lambda f}$  为包围孔径的截止空间频率,  $\lambda, f$  分别为光波波长和光学系统焦距。

由 MTF 表达式分析可知:类 Golay6 结构的 MTF 由 36 个子 MTF 分布在频谱内组合而成。在零频谱处有 6 个子 MTF 重叠在一起,除零谱外,在其它空间频率处子 MTF 相互不重叠,30 个子 MTF 分布在频谱面内不同的空间频率处。

由类 Golay6 子孔径中心点结构经数值计算得到相关点阵分布如图 6 所示,除中心点以外,30 个相关点以三角形网格分布在相关点阵面上(即频谱面上),最远相关点矢径  $q = 3a$ ,与子孔径间最大距离  $3b$  相对应,同时  $a = \frac{1}{2\sqrt{3}}\rho_{D-d}$ ,图 6 中各互相关点与公式(3)表示的子 MTF 位置完全相符。

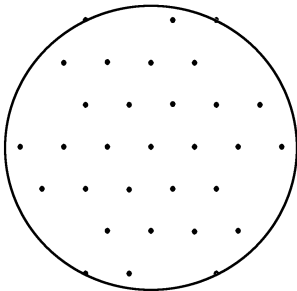
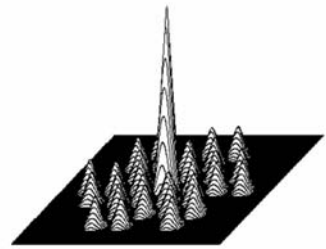


图 6 类 Golay6 互相关点阵

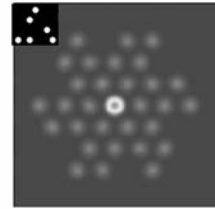
Fig. 6 Crosscorrelation point arrangement of quasi-Golay6

扩展 ZEMAX 光学设计软件处理模块,将类 Golay6 稀疏孔径结构的光瞳函数链接至 ZEMAX 光学设计软件中,即将 6 个子孔径按类 Golay6 结构形式排列替代单个孔径的光瞳面,运用 ZEMAX 光学设计软件分析光学系统 MTF 的功能,获得类 Golay6 稀疏孔径光学系统的 MTF 分布如图 7 所示,从 MTF 分布可见,除零频外,在其它空间频率处,子 MTF 不重叠,在  $\frac{\pi}{3}$  整数倍方向上,截止空间频率最大,在  $\frac{\pi}{6}$  奇数倍方向上,截止空间频率最小。从光学设计软件中获得的 MTF 分布与推导出的类 Golay6 MTF 表达式以及相关点阵结果一致。



(a)类 Golay6 三维 MTF

(a) Three dimensional MTF of quasi-Golay6



(b)类 Golay6 结构与二维 MTF

(b) Configuration and two dimensional MTF of quasi-Golay6

图 7 类 Golay6 结构与 MTF

Fig. 7 Configuration and MTF of quasi-Golay6

## 5 类 Golay6 与 Golay6 特征指标比较

类 Golay6 与 Golay6 光瞳面上的子孔径分布均为非冗余结构,本文比较了两种结构的特征指标。

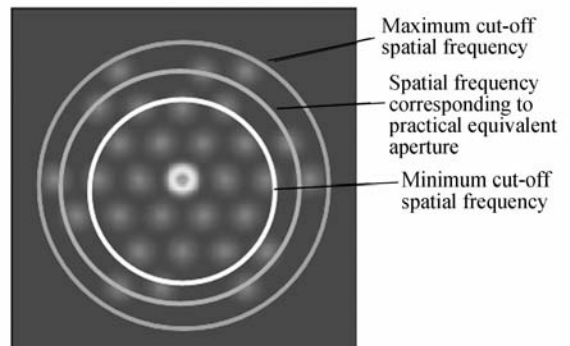


图 8 基于类 Golay6 最大、最小截止空间频率和实际等效口径对应的空间频率

Fig. 8 Maximum and minimum cut-off spatial frequencies, and spatial frequency corresponding to practical equivalent aperture based on quasi-Golay6

实际等效口径  $D_R$  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 MTF 面积的圆孔直径,如图 8 所示。计算公式如下:

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

方向上的实际空间截止频率。

定义 MTF 第一次出现 0 时所对应的空间频率为实际空间截止频率  $\rho_R$ <sup>[10]</sup>

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

式中  $\rho_{DC}$  为包围孔径截止空间频率。

定义实际等效口径比为实际等效口径与包围孔径口径之比。

定义平均 MTF 为在包围孔径截止频率内 MTF 的平均值,通过下式计算:

令

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

$$\text{MTF}_{\text{aver}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\rho_{DC}} g(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta}{\pi \rho_{DC}^2}. \quad (5)$$

定义平均 MTF 值比为稀疏孔径系统平均 MTF 值与全孔径系统平均 MTF 值之比<sup>[11]</sup>。

类 Golay6 最大与最小截止空间频率为:

$$\rho_{\max} = \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} + \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \lambda \sqrt{\frac{F}{6}} \right] \rho_{DC}, \quad (6)$$

$$\rho_{\min} = \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \lambda \sqrt{\frac{F}{6}} \right) \rho_{DC}, \quad (7)$$

Golay6 最大与最小截止空间频率为:

$$\rho_{\max} = \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} + \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \lambda \sqrt{\frac{F}{6}} \right] \rho_{DC}, \quad (8)$$

$$\rho_{\min} = \left[ \frac{\sqrt{21}}{7} + \left(1 - \frac{\sqrt{21}}{7}\right) \lambda \sqrt{\frac{F}{6}} \right] \rho_{DC}, \quad (9)$$

2 种结构的特征指标数据计算结果见表 2,类 Golay6 的实际等效口径比在填充因子为 0.1, 0.2, 0.3 时分别大于 Golay6 的实际等效口径比 0.089 1, 0.101 1 和 0.081 5, 平均大 9.1%, 即类 Golay6 的实际等效口径大于 Golay6 的相应值; 两种结构的最大截止空间频率在 3 个填充因子时都完全相等; 平均 MTF 值相接近, 平均 MTF 值比在填充因子为 0.1, 0.2 时几乎相等, 在填充因子为 0.3 时, 类 Golay6 略小于 Golay6。而类 Golay6 的子孔径在光瞳面上的分布比 Golay6 结构简单, 因此, 类 Golay6 是一种非冗余的简单稀疏孔径结构。

表 2 两种结构的特征指标

Tab. 2 Results of quasi-Golay6 and Golay6

features	quasi-Golay6			Golay6		
	$F=10\%$	$F=20\%$	$F=30\%$	$F=10\%$	$F=20\%$	$F=30\%$
Ratio of practical effective diameters $D_R/D$	0.546 2	0.655 0	0.705 6	0.457 1	0.553 9	0.624 1
Ratio of $\text{MTF}_{\text{aver}}$	0.106 4	0.214 5	0.256 6	0.108 6	0.214 5	0.316 6
$(\rho_c)_{\max}/\rho_{DC}$	0.883 3	0.890 5	0.896 0	0.883 3	0.890 5	0.896 0
$(\rho_c)_{\min}/\rho_{DC}$	0.564 5	0.591 3	0.611 8	0.699 3	0.717 7	0.731 9

## 6 结 论

稀疏孔径光学系统的 MTF 由子孔径在频谱面上的子 MTF 组合而成。本文分析 Golay 结构稀疏孔径频谱面上 MTF 的分布, 得出三角形网格结构是非冗余的阵列结构。进一步分析 Golay6 结构光瞳面上子孔径的排列规律, 并依据一维非冗余阵列与三角形网格分布提出类 Golay6

新型稀疏孔径结构。根据类 Golay6 光瞳结构, 推导出类 Golay6 的 MTF, 并通过扩展光学设计软件获得类 Golay6 的 MTF 分布, 其 MTF 分布与推导出的 MTF 表达式相一致。比较类 Golay6 与 Golay6 两种结构的特征指标, 结果表明: 类 Golay6 子孔径在光瞳面上的排列比 Golay6 简单, 相应 MTF 分布均匀, 实际等效口径大于 Golay6 的相应值, 比 Golay6 的约高出 9%, 两种结构的最大截止空间频率相等。

## 参考文献:

- [1] ROBERT D F, THEODORE A T. Image quality of sparse-aperture designs for remote sensing [J]. *Optical Engineering*, 2002,41(8):1957-1968.
- [2] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(4):320-325. (in Chinese)
- [3] 吴泉英,钱霖,沈为民.两种稀疏孔径系统的成像研究[J]. *光学精密工程*, 2006,14(1):26-33.  
WU Q Y, QIAN L, SHEN W M. Imaging research of two kinds of sparse-aperture systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(1):26-33. (in Chinese)
- [4] 王胜千,饶长辉,姜文汉,等.四子孔径光学合成孔径成像系统空间排布性能分析[J]. *光学学报*,2008,28(4):692-699.  
WANG S Q, RAO C H, JIANG W H, *et al.*. Analysis of spatial arrangement for optical synthetic aperture imaging system with four sub-apertures [J]. *Acta Optica Sinica*,2008,28(4):692-699. (in Chinese)
- [5] 邓健,张伟,龙夫年.大口径拼接式合成孔径光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2008,16(1):29-34.  
DENG J, ZHANG W, LONG F N. Optical design of large aperture segmented mirror system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):29-34. (in Chinese)
- [6] 邓健,张伟,龙夫年,等.拼接镜面合成孔径光学系统的像质评价[J]. *光学精密工程*, 2008,16(2):208-214.  
DENG J, ZHANG W, LONG F N, *et al.*. Imaging quality of segmented mirror synthetic aperture optics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(2):208-214. (in Chinese)
- [7] GOLAY M J E. Point arrays having compact, non-redundant autocorrelations [J]. *J. Opt. Soc. Am.* 1971,61:272-273.
- [8] 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)
- [9] BRACEWELL R N. *Radio astronomy techniques, in Handbuch der Physik* [M]. Berlin: Springer, 1962.
- [10] JAMES E H, RICHARD A R. Performance characteristics of phased array and thinned aperture optical telescopes [J]. *Optical Engineering*, 1988,27(9):762-768.
- [11] 吴泉英,钱霖,沈为民.复合三子镜稀疏孔径光瞳结构的研究[J]. *光学学报*, 2006,26(2):187-192.  
WU Q Y, QIAN L, SHEN W M. Research on pupil configuration of dual three sub-apertures sparse-aperture system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006,26(2):187-192. (in Chinese)

## 作者简介:



吴泉英(1965—),女,博士,教授,硕士生导师,主要从事图像信息处理与光学仪器等方面的研究。E-mail: wqycyh@tom.com



钱霖(1946—),女,教授,硕士生导师,主要从事图像信息处理与光学测量等方面的研究。E-mail: linq@suda.edu.cn