

# 四子孔径光学合成孔径成像系统 空间排布性能分析

王胜千<sup>1,2</sup> 饶长辉<sup>1</sup> 姜文汉<sup>1</sup> 朱能鸿<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039; )

<sup>3</sup> 中国科学院上海天文台, 上海 200030

**摘要** 对三种空间排布结构的四子孔径光学合成孔径成像系统性能进行了分析。根据避免有效频率信息丢失的原则,分别计算了三种结构各自对应的空间排布限制条件,在此基础上得到了三种结构的有效频率覆盖范围和等效孔径。结果表明,当频率覆盖范围要求比较高时,只能选择三臂结构;当环形均匀结构和三臂结构具有相同的有效频率覆盖范围时,按照抑制次峰的选择标准,三臂结构要优于环形均匀结构;当环形优化结构和三臂结构具有相同的有效频率覆盖范围时,环形优化结构的点扩展函数次峰要明显大于三臂结构,而且环形优化结构的光学传递函数缺乏三臂结构的对称特性。

**关键词** 成像系统; 光学合成孔径; 三臂结构; 环形结构; 频率覆盖; 等效孔径; 次峰

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A

## Analysis of Spatial Arrangement for Optical Synthetic Aperture Imaging System with Four Sub-Apertures

Wang Shengqian<sup>1,2</sup> Rao Changhui<sup>1</sup> Jiang Wenhan<sup>1</sup> Zhu Nenghong<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China )  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China  
<sup>3</sup> Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

**Abstract** The performances of three kinds of spatial arrangement for the optical synthetic aperture imaging system with four sub-apertures are analyzed. Based on the criterion of avoiding the loss of the effective spatial-frequency information, the restrictive conditions of the spatial arrangement are calculated, and then the effective frequency coverage range and the equivalent aperture are obtained. The results shows that three-arm arrangement is adopted as long as the requirement of frequency coverage range is relatively high; when the frequency coverage range of the three-arm arrangement and the annular-uniform arrangement is equal, the former is better than the latter based on the criterion of the secondary peak depression. When the frequency coverage range of the three-arm arrangement and the annular-optimization arrangement is equal, the point spread function of the annular-optimization arrangement is larger than that of the three-arm arrangement, and the optical transfer function of the annular-optimization arrangement is lack of symmetry of three-arrangement.

**Key words** imaging system; optical synthetic aperture; three-arm arrangement; annular arrangement; frequency coverage; equivalent aperture; secondary peak

**收稿日期:** 2007-08-15; **收到修改稿日期:** 2007-10-24

**基金项目:** 国家 863 计划高技术领域资助课题。

**作者简介:** 王胜千(1982-)男,河北献县人,博士研究生,主要从事新型波前探测技术及其器件实现、光学合成孔径和光学信息处理技术等方面的研究。E-mail: wsq\_ioe@eyou.com

**导师简介:** 饶长辉(1971-)男,江西东乡人,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学技术研究及系统研制工作。

E-mail: chrao@ioe.ac.cn

## 1 引言

由于光学加工和制造的困难,单孔径光学成像系统的孔径增大受到限制,光学合成孔径成像系统通过对若干小的独立子孔径进行共相干涉来实现大孔径成像系统的分辨力,从而避免了大孔径单镜面制造的困难,<sup>[1~5]</sup>。光学合成孔径成像系统的子孔径尺寸、数量和空间排布决定了系统的衍射极限分辨力性能,当子孔径的尺寸和数量确定时,首要解决的问题就是实现子孔径阵列的优化排列。Golay<sup>[6]</sup>提出的结构是一种频率覆盖没有冗余的排列方式;Cornwell<sup>[7]</sup>根据最大频率覆盖范围研究了子孔径在圆周上的最优化排列形式;Mugnier 等<sup>[8]</sup>基于图像重建误差最小化准则提出了一种新的空间排列方式;Tcherniavski 等<sup>[9]</sup>根据系统光学传递函数与理想光学传递函数的均方误差最小化准则研究了子孔径的空间排列方式。江月松等<sup>[10,11]</sup>在光学合成孔径方面做了一定的研究,分析了子孔径尺寸效应以及二维圆周阵列的优化排列,提出了一种新的复合三子镜结构形式<sup>[12,13]</sup>,分析了像质评价标准和图像复原方法<sup>[14,15]</sup>。

本文针对四子孔径光学合成孔径成像系统,对三臂结构和两种环形结构进行了对比,结果表明,当系统有效频率覆盖范围要求比较高时,只能选择三臂结构;当三臂结构与环形均匀结构具有相同有效频率覆盖范围时,三臂结构对应点扩展函数的次峰增长速度要明显小于环形均匀结构;当三臂结构与环形优化结构具有相同的有效频率覆盖范围时,三臂结构的次峰要小于环形优化结构,而且环形优化结构的光学传递函数比较复杂,不具备对称性,不利

于图像恢复算法的建立。

## 2 四子孔径光学合成孔径成像系统点扩展函数和光学传递函数

研究了由四个尺寸相同的子孔径构成的光学合成孔径成像系统,子孔径的直径为  $d$ ,四个子孔径的中心点坐标分别为  $(\epsilon_1, \eta_1)$ ,  $(\epsilon_2, \eta_2)$ ,  $(\epsilon_3, \eta_3)$  和  $(\epsilon_4, \eta_4)$ ,对应系统的光瞳函数  $p(\epsilon, \eta)$  为

$$p(\epsilon, \eta) = \sum_{i=1}^4 p_i(\epsilon - \epsilon_i, \eta - \eta_i), \quad (1)$$

衍射极限情况下满足

$$p_i(\epsilon, \eta) = \begin{cases} 1, & \sqrt{\epsilon^2 + \eta^2} \leq d/2 \\ 0, & \sqrt{\epsilon^2 + \eta^2} > d/2 \end{cases} \quad (2)$$

非相干成像系统的点扩展函数表现为系统光瞳函数傅里叶变换的模平方,所以得到像面  $(x, y)$  上对应的衍射极限情况下系统的归一化点扩展函数  $I(x, y)$  为

$$I(x, y) = \left[ \frac{2J_1(\pi d \sqrt{x^2 + y^2}/\lambda f)}{\pi d \sqrt{x^2 + y^2}/\lambda f} \right]^2 \times \left\{ \frac{1}{16} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \cos \left[ 2\pi \frac{x(\epsilon_i - \epsilon_j) + y(\eta_i - \eta_j)}{\lambda f} \right] \right\}, \quad (3)$$

式中  $J_1(Z)$  为一阶贝塞尔函数,  $f$  为焦距,  $\lambda$  为成像波长。同样,利用光瞳函数的自相关可以得到衍射极限情况下系统的归一化光学传递函数为

$$H(u, v) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 H_0 \left[ u - \frac{\epsilon_i - \epsilon_j}{\lambda f}, v - \frac{\eta_i - \eta_j}{\lambda f} \right], \quad (4)$$

式中  $(u, v)$  为频谱面坐标,  $H_0(u, v)$  为每个子孔径独立成像时的衍射极限归一化光学传递函数,满足

$$H_0(u, v) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{d/\lambda f} \right) - \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{d/\lambda f} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{d/\lambda f} \right)^2} \right], & \sqrt{u^2 + v^2} \leq d/\lambda f \\ 0, & \sqrt{u^2 + v^2} > d/\lambda f \end{cases} \quad (5)$$

## 3 空间排布性能分析

### 3.1 三臂结构

三臂结构如图 1 所示。此时四个子孔径的中心点坐标分别为

$$\begin{aligned} (\epsilon_1, \eta_1) &= (0, 0), \\ (\epsilon_2, \eta_2) &= (\sqrt{3}R/2, R/2), \\ (\epsilon_3, \eta_3) &= (-\sqrt{3}R/2, R/2), \\ (\epsilon_4, \eta_4) &= (0, -R), \end{aligned} \quad (6)$$

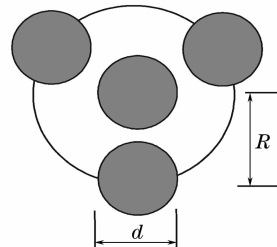
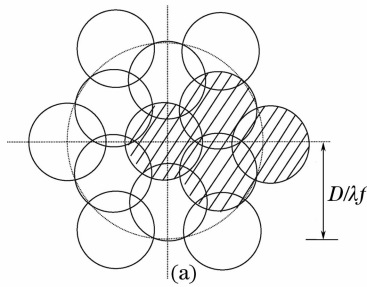


图 1 三臂结构空间排列

Fig. 1 Three-arm arrangement

光学合成孔径成像系统具有瞬时频率覆盖,直接成像的特点,因此要避免有用频率信息的丢失。实际应用中,一般以光学传递函数非零区域的最大包围圆半径作为该系统的有效频率覆盖半径<sup>[16]</sup>,图 2(a)给出了一种没有频率信息丢失情况的频率覆盖二维图,系统有效频率覆盖半径是  $D/\lambda f$ ,此时系统的等效单孔径直径为  $D$ 。该图表示了系统光学传递函数在二维平面上的投影范围,即表示系统能够获得的频率覆盖范围,可以通过(4)式和(5)式得到。为了分析方便,将图中阴影标示的四个子覆盖圆单独表示出来,如图 2(b)所示,其中  $O, A, B$  和  $C$  表示圆心。根据图 1 三臂结构的空排列,可以得到对应关系为



$$OA = AC = R/\lambda f, \quad (7a)$$

$$\angle AOE = 30^\circ, \quad (7b)$$

$$AE = d/\lambda f, \quad (7c)$$

按照三角函数关系可以得到

$$AE^2 = OA^2 + OE^2 - 2OA \cdot OE \cdot \cos \angle AOE, \quad (8)$$

即 
$$OE = \frac{\sqrt{3}R - \sqrt{4d^2 - R^2}}{2\lambda f}. \quad (9)$$

为了避免频率信息丢失,要满足

$$OE \leq d/\lambda f, \quad (10)$$

化简得到

$$R \leq \sqrt{3}d. \quad (11)$$

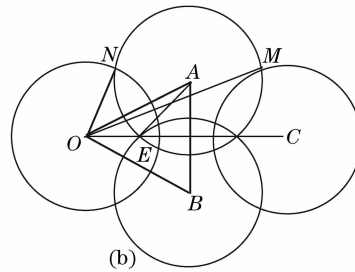


图 2 三臂结构的二维频率覆盖范围(a)和频率覆盖范围计算(b)

Fig. 2 Two-dimensional frequency coverage (a), and calculation of frequency coverage range (b) for the three-arm arrangement

同时为了避免子孔径空间排布上相互覆盖,要满足  $R \geq d$ 。因此当采用三臂结构时,子孔径空间排布的限制条件为

$$d \leq R \leq \sqrt{3}d. \quad (12)$$

图 3 为  $R = 2d$  时的频率信息丢失现象。下面再来计算系统有效频率覆盖半径。图 2(b)显示,系统的有效频率覆盖半径为  $OM$ 。由对称性可知  $OM = NC$ 。在  $\triangle NOA$  中,因为  $NO = NA = d/\lambda f$ ,  $OA = R/\lambda f$ ,由三角函数可以得到

$$\cos \angle NOA = R/2d, \quad (13a)$$

$$\sin \angle NOA = \sqrt{4d^2 - R^2}/2d. \quad (13b)$$

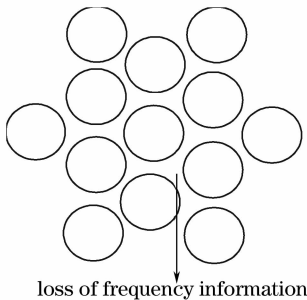


图 3 三臂结构的频率信息丢失现象

Fig. 3 Loss of frequency information for the three-arm arrangement

根据前面分析已经得知  $\angle AOE = 30^\circ$ ,因此

$$\cos \angle NOC = \cos(\angle NOA + \angle AOE) = \frac{\sqrt{3}R}{4d} - \frac{\sqrt{4d^2 - R^2}}{4d}, \quad (14)$$

在等边  $\triangle AOC$  中,  $AO = AC = R$ ,  $\angle AOE = 30^\circ$ ,因此  $OC = \sqrt{3}R/\lambda f$ 。从而在  $\triangle NOC$  中,有

$$NC = \sqrt{ON^2 + OC^2 - 2ON \cdot OC \cdot \cos \angle NOC}. \quad (15)$$

将上述结果代入其中,化简得到

$$NC = \sqrt{\frac{3}{2}R^2 + d^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}R \cdot \sqrt{4d^2 - R^2}}/\lambda f. \quad (16)$$

因此系统等效孔径  $D$  与参量  $R$  和  $d$  之间的关系为

$$D = \sqrt{\frac{3}{2}R^2 + d^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}R \sqrt{4d^2 - R^2}}. \quad (17)$$

将(12)式代入(17)式,得到系统等效孔径的范围

$$2d \leq D \leq \sqrt{7}d. \quad (18)$$

### 3.2 环形结构

#### 3.2.1 环形均匀结构

图 4 给出了一种频率覆盖具有冗余性质的环形均匀结构,对应的四个子孔径均匀分布在半径为  $R$

的圆周上,此时四个子孔径的中心点坐标分别为

$$\begin{aligned} (\epsilon_1, \eta_1) &= (\sqrt{2}R/2, \sqrt{2}R/2), \\ (\epsilon_2, \eta_2) &= (-\sqrt{2}R/2, \sqrt{2}R/2), \\ (\epsilon_3, \eta_3) &= (-\sqrt{2}R/2, -\sqrt{2}R/2), \\ (\epsilon_4, \eta_4) &= (\sqrt{2}R/2, -\sqrt{2}R/2). \end{aligned} \quad (19)$$

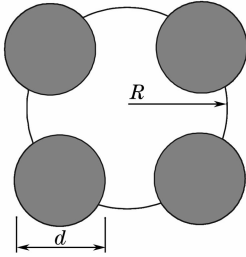


图 4 环形均匀结构空间排列

Fig. 4 Annular-uniform arrangement

系统的有效频率覆盖范围如图 5 所示。计算表明当  $R > d$  时,会导致频率覆盖范围内有用频率信息的丢失。

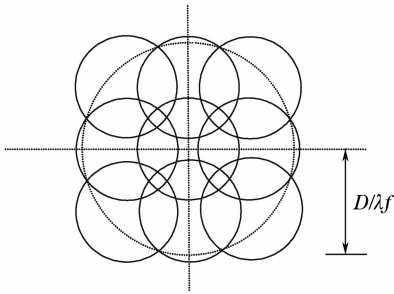


图 5 环形均匀结构的二维频率覆盖范围

Fig. 5 Two-dimensional frequency coverage for the annular-uniform arrangement

图 6 为  $R = 1.5d$  时的频率信息丢失现象。同时为了避免子孔径空间排布上相互覆盖,必须满足  $R \geq \sqrt{2}d/2$  (计算方法类似于三臂结构)。综上所述,当采用环形均匀结构时,子孔径空间排布的限制条件为

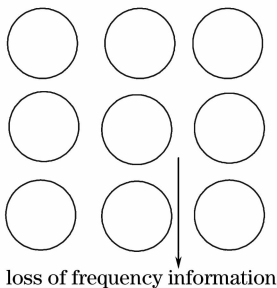


图 6 环形均匀结构的频率信息丢失现象

Fig. 6 Loss of frequency information for the annular-uniform arrangement

$$d/\sqrt{2} \leq R \leq d, \quad (20)$$

在满足(20)式的前提下,可以得到等效孔径  $D$  与参量  $R$  和  $d$  之间的关系为

$$D = \sqrt{2R^2 + d^2 + 2R\sqrt{2d^2 - R^2}}, \quad (21)$$

将(20)式代入(21)式中,得到系统等效孔径的范围

$$\sqrt{2 + \sqrt{3}} \cdot d \leq D \leq \sqrt{5} \cdot d. \quad (22)$$

### 3.2.2 环形优化结构

图 7 表示环形结构中系统有效频率覆盖范围达到最大的一种优化结构,对应四个子孔径的中心点坐标分别为

$$\begin{aligned} (\epsilon_1, \eta_1) &= (0.469R, 0.883R), \\ (\epsilon_2, \eta_2) &= (-0.469R, 0.883R), \\ (\epsilon_3, \eta_3) &= (-0.834R, -0.552R), \\ (\epsilon_4, \eta_4) &= (0.834R, -0.552R). \end{aligned} \quad (23)$$

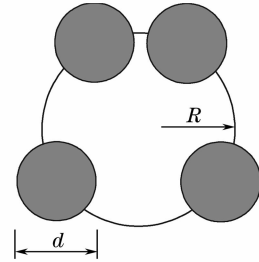


图 7 环形优化结构空间排列

Fig. 7 Annular-optimization arrangement

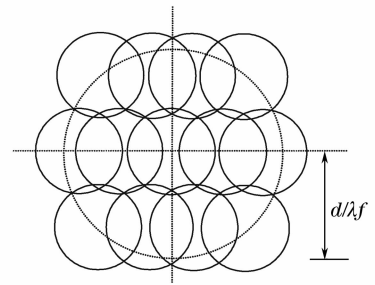


图 8 环形优化结构的二维频率覆盖范围

Fig. 8 Two-dimensional frequency coverage for the

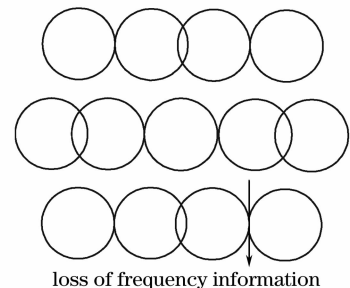


图 9 环形优化结构的频率信息丢失现象

Fig. 9 Loss of frequency information for the annular-optimization arrangement

系统有效频率覆盖范围如图 8 所示。图 9 表示子孔间距过大而出现的频率信息丢失现象。为了保证覆盖范围内传递函数没有零值出现以及避免子孔径空间排布相互覆盖,参量  $R$  和  $d$  的限制条件为

$$1.065d \leq R \leq 1.259d. \quad (24)$$

在满足(24)式的前提下,等效孔径  $D$  与参量  $R$  和  $d$  之间的关系为

$$D = \sqrt{2.174R^2 + d^2 + 3.233R \sqrt{d^2 - 0.548R^2}}, \quad (25)$$

将(24)式代入(25)式中,得到系统等效孔径的范围是

$$2.363d \leq D \leq 2.433d. \quad (26)$$

### 3.3 空间排布对比分析

环形均匀结构对应的等效孔径范围是  $\sqrt{2 + \sqrt{3}}d \leq D \leq \sqrt{5}d$  (近似为  $1.93d \leq D \leq 2.24d$ ), 环形优化结构对应的等效孔径范围是  $2.363d \leq D \leq 2.433d$ , 而三臂结构对应的等效孔径范围是  $2d \leq D \leq \sqrt{7}d$  (近似为  $2d \leq D \leq 2.65d$ )。可见, 环形结构的最大等效孔径要小于三臂结构的最大等效孔径, 即最高有效频率覆盖范围要小于三臂结构的最高有效频率覆盖范围。如果需要系统等效孔径大于  $2.433d$ , 环形结构是无法满足的。产生这种现象的原因主要在于三臂结构具有很好的对称性, 既避免了频率覆盖的冗余性, 又可以保证频率覆盖能够形成二次覆盖 [参见图 2(a), 内圈六个覆盖圆形成一次覆盖, 而外圈六个覆盖圆恰好都位于内圈覆盖圆的凹陷位置, 所以可以形成二次覆盖]。

如果需要系统的等效孔径在  $[2d, 2.24d]$  之间, 环形均匀结构和三臂结构都可以采用。为了比较直观地对比两种排列结构的性能, 分别给出了等效孔

径  $D=2d$  和  $D=2.24d$  时, 环形均匀结构与三臂结构对应的归一化点扩展函数和光学传递函数, 如图 10~图 13 所示。可以看出, 虽然两种排列结构可以获得相同的等效孔径, 即相同的有效频率覆盖范围, 但是传递函数的特性却存在很大的差异, 从而导致点扩展函数的特性也存在很大的区别。环形均匀结构的点扩展函数主峰周围分布着四个次峰, 而三臂结构的主峰周围则主要分布着六个次峰。由于两种排列结构具有相同的频率覆盖范围, 所以对点扩展函数主瓣的宽度差别不大, 环能量近似相等。另外由于点扩展函数与方向性有关, 不具备传统单孔径系统点扩展函数的单调下降特性, 所以点扩展函数次峰更适合做为像质评价的标准。次峰的幅度越小, 则可以认为成像的像质越好。根据这一原则, 分别计算环形均匀结构和三臂结构具有相同等效孔径时对应次峰的强度。图 14 给出了两种排列结构对应的次峰强度与等效孔径的关系曲线。可以看出, 首先随着等效孔径的增大, 两种排列形式的点扩展函数次峰都随之增高, 这是因为无论采用哪种排列结构, 当等效孔径增高时, 虽然频率覆盖范围也增大, 但由于光瞳面的整体覆盖面积保持不变, 所以传递函数的整体特性呈现下降趋势, 从而导致点扩展函数主峰能量产生泄漏, 这必然会引起次峰强度的增加。其次表明三臂结构的次峰增长速度要明显低于环形均匀结构, 这是因为三臂结构的光学传递函数冗余度比较小, 使得点扩展函数周围分布着六个次峰, 这样次峰强度的增长速度必然要低于环形均匀结构。

综上所述, 当环形均匀结构和三臂结构具有相同的等效孔径, 即相同的有效频率覆盖范围时, 三臂结构的次峰幅度要明显低于环形均匀结构, 按照抑制次峰的像质评价标准, 三臂结构的性能要优于环

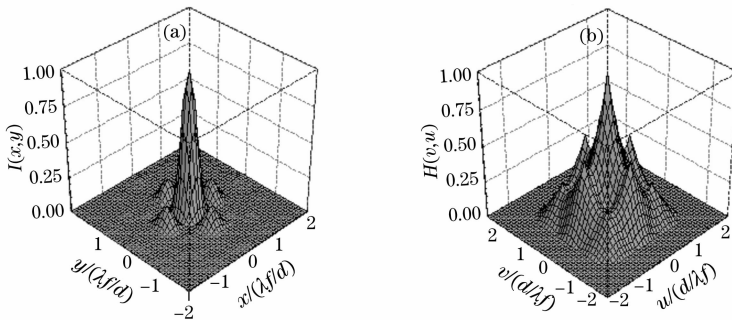


图 10 等效孔径  $D=2d$  时, 环形均匀结构的归一化点扩展函数(a)和光学传递函数(b)

Fig. 10 Normalized point spread function (a) and optical transfer function (b) for annular-uniform arrangement with equivalent aperture  $D=2d$

形均匀结构。如果需要系统有效频率覆盖范围比较大时,则只能选择三臂结构。

如果需要系统的等效孔径在 $[2.363d, 2.433d]$ 之间,环形优化结构和三臂结构都可以采用。为了比较直观地对比这两种排列结构的性能,给出了等效孔径 $D=2.4d$ 时,这两种结构所对应的归一化点扩展函数和光学传递函数,如图 15 和图 16 所示。图示表明,环形优化结构的点扩展函数在 $y$ 方向上

明显存在两个幅度非常大的次峰,而且环形优化结构的光学传递函数不具备三臂结构的对称特性,表现在某些方向上频率覆盖冗余度很大。对于光学合成孔径系统,建立有效的图像恢复算法是非常重要的,由于环形优化结构光学传递函数的复杂性,导致其图像恢复算法的建立要比三臂结构困难,因此,认为三臂结构更具有优越性。

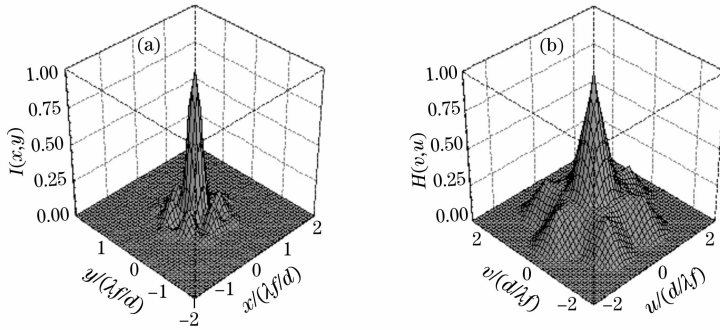


图 11 等效孔径  $D=2d$  时,三臂结构的归一化点扩展函数(a)和光学传递函数(b)

Fig. 11 Normalized point spread function (a) and optical transfer function (b) for three-arm arrangement with equivalent aperture  $D=2d$

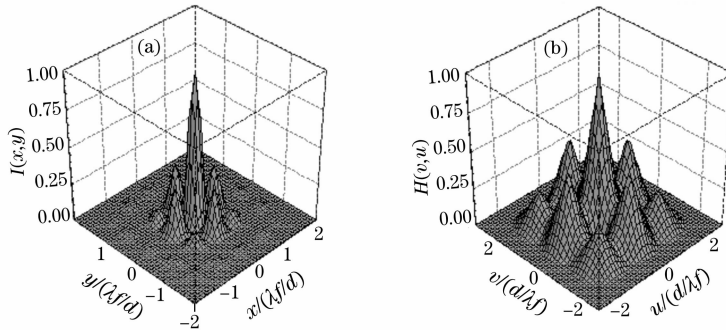


图 12 等效孔径  $D=2.24d$  时,环形均匀结构的归一化点扩展函数(a)和光学传递函数(b)

Fig. 12 Normalized point spread function (a) and optical transfer function (b) for annular-uniform arrangement with equivalent aperture  $D=2.24d$

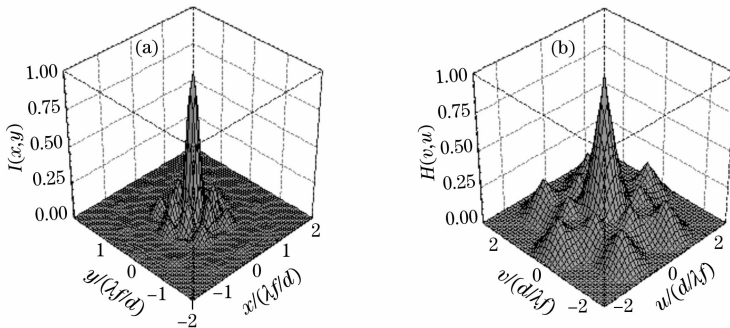


图 13 等效孔径  $D=2.24d$  时,三臂结构的归一化点扩展函数(a)和光学传递函数(b)

Fig. 13 Normalized point spread function (a) and optical transfer function (b) for three-arm arrangement with equivalent aperture  $D=2.24d$

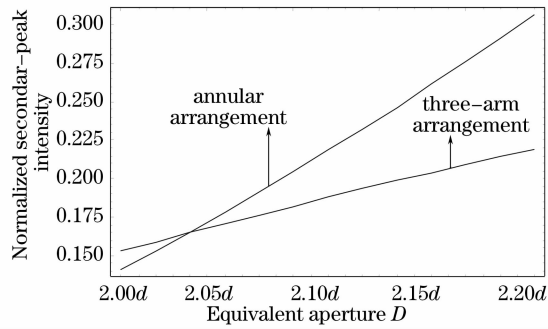


图 14 相同等效孔径时,两种排列结构的次峰强度与等效孔径的关系曲线

Fig. 14 Secondary-peak intensity versus equivalent aperture for annular and three-arm arrangement

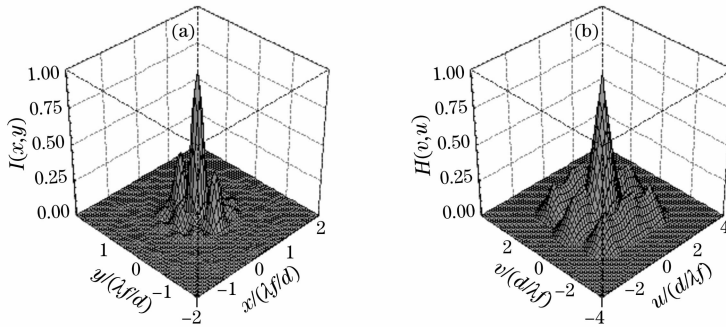


图 15 等效孔径  $D=2.4d$  时,环形优化结构的归一化点扩展函数(a)和光学传递函数(b)

Fig. 15 Normalized point spread function (a) and optical transfer function (b) for annular-optimized arrangement with equivalent aperture  $D=2.4d$

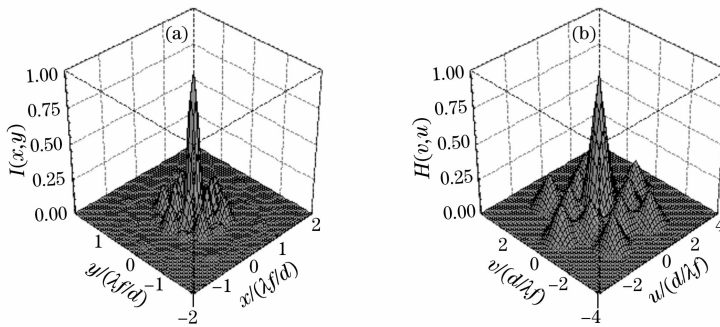


图 16 等效孔径  $D=2.4d$  时,三臂结构的归一化点扩展函数(a)和光学传递函数(b)

Fig. 16 Normalized point spread function (a) and optical transfer function (b) for three-arm arrangement with equivalent aperture  $D=2.4d$

## 4 结 论

本文对三臂结构和环形均匀与环形优化结构对应的四子孔径光学合成孔径成像系统的性能进行了对比分析。从有效频率覆盖范围的角度而言,三臂结构的覆盖范围要明显大于这两种环形结构;当三臂结构与环形均匀结构具有相同的有效频率覆盖范围时,从抑制点扩展函数次峰的角度,三臂结构的次峰幅度要明显低于环形均匀结构;当三臂结构与环形优化结构具有相同的有效频率覆盖范围时,三臂

结构的光学传输函数对称性要明显优于环形优化结构,从而有利于图像重建算法的确立。

## 参 考 文 献

- 1 Christopher R. De Hainaut, Dennis C. Duneman, Raymond C. Dymale *et al.*. Wide field performance of a phased array telescope [J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(3): 876~880
- 2 Soon-Jo Chung, David W. Miller, Olivier L. de Weck. ARGOS testbed: study of multidisciplinary challenges of future spaceborne interferometric arrays [J]. *Opt. Engng.*, 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 Jie Li, Haiqing Chen, Hongbin Yu. A novel hybrid surface micromachined segmented mirror for large aperture laser applications[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(7): 422~424
- 5 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu. Recording and reconstruction of synthetic aperture digital holography[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1207~1211  
钟丽云, 张以谟, 吕晓旭. 合成孔径数字全息图的记录、再现及实现[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1207~1211
- 6 Marcel J. E. Golay. Point arrays having compact, nonredundant autocorrelations[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**(2): 272~273
- 7 T. J. Cornwell. A novel principle for optimization of the instantaneous Fourier plane coverage of correlation arrays[J]. *IEEE. Transactions on Antennas and Propagation*, 1988, **36**(8): 1165~1167
- 8 Laurent M. Mugnier, Gérard Rousset, Frédéric Cassaing. Aperture configuration optimality criterion for phased arrays of optical telescopes[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1996, **13**(12): 2367~2374
- 9 Iouri Tcherviavski, Mojtaba Kahrizi. Optimization of the optical sparse array configuration[J]. *Opt. Engng*, 2005, **44**(10): 103201-1~103201-10
- 10 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
- 11 Chen Haiting, Jiang Yuesong, Zhong Yu. Study of optimization and imaging characteristics of two-dimensional circle array for optical synthetic aperture system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1616~1622  
陈海亭, 江月松, 钟宇. 二维圆周光综合孔径阵的优化排列及其成像特性研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1616~1622
- 12 Wu Quanying, Qian Lin, Shen Weimin. Research on pupil configuration of dual three sub-apertures sparse-aperture system[J]. *Acta Optics Sinica*, 2006, **26**(2): 187~192  
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
- 13 Wu Quanying, Qian Lin, Shen Weimin. Imaging research of two kinds of sparse-aperture systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(1): 26~33  
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
- 14 Wang Zhile, Zhang Wei, Long Funian. Image quality evaluation for diffraction-limited optical synthetic aperture system[J]. *Acta Optics 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
- 15 Wang Dayong, Fu Xiyang, Guo Hongfeng *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
- 16 James E. Harvey, Richard A. Rockwell. Performance characteristics of phased array and thinned aperture optical telescopes[J]. *Opt. Engng.*, 1988, **27**(9): 762~768