

文章编号: 0253-2239(2005)12-1616-7

二维圆周光综合孔径阵的优化排列 及其成像特性研究*

陈海亭 江月松 钟 宇

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 光综合孔径成像的原理是应用干涉原理在空间频率域中进行采样, 并通过傅里叶反变换或其他数值变换方法得到空间分辨力远高于单个孔径成像系统的目标图像。由若干个相同的小孔径在二维圆周上优化排列组成的综合孔径成像系统可以在二维空间频率域中实现较为均匀分布的、具有无冗余度的采样点覆盖, 为高质量实时成像提供了一个有效的途径。运用模拟退火算法对由 7~16 个子孔径组成的二维圆周综合孔径阵列进行优化排列。并依据光学衍射成像原理, 从空域和频域两个方面详细分析了二维圆周上优化排列与均匀排列光综合孔径阵的成像特性。对 7~16 个子孔径组成的光综合孔径的仿真结果表明: 无论是在空域还是频域上, 子孔径直径增大、孔径数目增多以及综合孔径阵的优化排列都是有利于提高成像质量的。但综合后的子孔径的直径的增大, 虽然能获得极高的角分辨力, 却并不利于成像质量的提高。

关键词: 成像系统; 综合孔径; 优化阵列; u, v 平面覆盖; 成像特性

中图分类号: TH742.1 文献标识码: A

Study of Optimization and Imaging Characteristics of Two-Dimensional Circle Array for Optical Synthetic Aperture System

Chen Haiting Jiang Yuesong Zhong Yu

(School of Electron Engineering, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract: Optical synthetic aperture imaging system applies the interferometric method to sample object in the spatial frequency domain and retrieve the image whose spatial resolution is much higher than that of monolithic aperture by inverse Fourier or other numerical transformation. An optimized synthetic aperture array which is composed of a number of identical sub-aperture located at a circle can provide a roughly uniform distributed and no-redundant sampling coverage in two-dimensional spatial frequency domain, which can form a high quality and snapshot imaging system. An optimization method called simulated annealing is adopted for the optimization of a two-dimensional circle aperture array composed of 7~16 sub-apertures. Based on principle of optical diffraction imaging, imaging characteristics of the optimized arrays as well as arrays distributed evenly composed of N sub-apertures at a two-dimensional circle are analyzed in detail by using computer simulation in both spatial domain and frequency domain. The simulated computation results of the arrays composed of 7~16 sub-apertures show that the optimized array has better quality of image than the arrays of distributed sub-aperture in both point spread function and optical transfer function. Besides, the bigger the size and the more the number of sub-aperture, the better the imaging is. But, on the other hand, although higher resolution can be obtained with bigger size of the circle synthesized by a number of sub-aperture, improved imaging quality is refused.

Key words: imaging systems; synthetic aperture; optimization array; u, v plane coverage; imaging characteristics

* 国防预研基金项目(6140434)资助课题。

作者简介: 陈海亭(1981~), 男, 北京航空航天大学电子信息工程学院光学工程专业硕士研究生, 主要从事光学综合孔径成像技术和毫米波合成孔径成像技术研究。E-mail: if_else@sina.com

收稿日期: 2005-01-07; 收到修改稿日期: 2005-04-25

1 引 言

综合孔径成像系统是用若干个小的子孔径优化排列成一个阵列以综合成一个大的孔径以实现高分辨力成像的系统^[1,2]。为了获得良好的实时成像质量,除了后期重构目标像的处理外^[3],一个重要的方法就是不但要优化排列子孔径的位置以获得充分而均匀的 $u-v$ 覆盖以及最小的空间频率冗余度^[4],而且要求子孔径的尺寸有适当的大小^[5~7]。二维圆周阵列可以实现零冗余度的实时成像优化排列^[8],本文应用模拟退火算法对由 7~16 个子孔径组成的二维圆周光综合孔径阵进行了优化排列,获得了无冗余度的空间频率覆盖排列。并应用点扩展函数和成像传递函数的分析方法^[9],较详细地分析了二维圆周光综合孔径阵列的成像特性,其结果对光学综合

孔径以及其它波段的综合孔径成像阵列的设计具有一定的参考价值。

2 模拟退火算法与综合孔径阵优化

模拟退火算法 (Simulated annealing algorithm, SAA)最早是由 Metropolis 在 1953 年提出的,1983 年 Kirkpatrick 等成功地将退火思想引入组合优化领域^[10]。本文参照 Cornwell 等^[8]对二维微波综合孔径阵列优化的方法,应用 Matlab 软件对 7~16 个子孔径组成的二维圆周阵列进行优化排列,其无冗余度优化排列结果如表 1 所示,表 1 中给出每个子孔径在圆周上的角度位置。由于篇幅关系,这里只给出了由 8 个子孔径和 16 个子孔径在二维圆周上的均匀分布和优化排列时的 u, v 覆盖情况,如图 1 所示。

表 1 7~16 个子孔径二维圆周阵优化排列后的位置

Table 1 Optimized positions of 7~16 sub-aperture for two-dimensional circle array

N	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Positions of sub-aperture (angle) / (°)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	107.55	91.41	87.39	78.03	66.90	59.70	64.57	59.11	48.71	58.55
	158.84	143.20	124.46	108.58	96.12	94.29	88.51	81.75	76.25	83.00
	-149.85	175.59	161.60	139.36	132.04	115.23	114.27	114.19	97.16	97.61
	-98.41	-126.02	-152.33	-173.70	168.26	153.97	146.95	141.88	120.01	123.65
	-47.06	-87.64	-115.33	-136.87	162.65	175.64	169.73	159.35	142.44	149.92
	4.68	-50.12	-78.17	-112.60	-132.91	-145.53	-157.45	-167.25	168.87	165.85
		8.46	-32.39	-71.23	-93.95	-120.08	-132.56	-149.40	-164.93	-172.81
			4.10	-29.14	-64.19	-94.64	-107.41	-118.73	-142.29	-142.84
				-4.99	-31.56	-56.00	-74.05	-89.68	-119.53	-125.69
					-2.26	-34.35	-50.16	-71.20	-98.71	-105.12
						4.23	-21.63	-47.31	-71.16	-75.22
							6.75	-13.71	-43.42	-55.98
								5.41	-24.48	-37.06
									2.62	-8.52

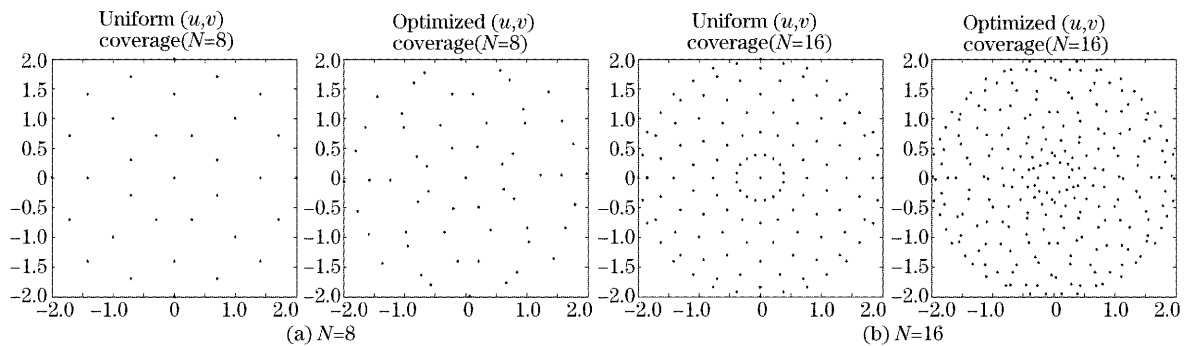


图 1 (a) $N=8$, (b) $N=16$ 个子孔径二维圆周阵列均匀分布和优化排列情况下的 (u, v) 覆盖图

Fig. 1 The Optimized (u, v) coverage and uniform (u, v) coverage of two-dimensional circle arrays consist of (a) $N=8$ and (b) $N=16$ sub-apertures

优化过程中的关键是目标函数的设计,本文将目标函数设计为

$$E(r_1, r_2, \dots, r_N) = \sum_{i,j,k,l=1}^N \log \left[\sqrt{(u_{ij} - u_{kl})^2 + (v_{ij} - v_{kl})^2} \right], \quad (1)$$

目标函数的设计是基于下述思想:位于 $x-y$ 平面上综合孔径阵排列的冗余度越小, $u-v$ 平面上 (u, v) 覆盖点就越多, 即 $u-v$ 平面被填充得就越好, 所成图像的旁瓣也越小^[11], 自然图像的质量也就越好。为了尽可能实现最低冗余度或无冗余度排列, 并尽可能均匀填充整个 u, v 平面, 对于瞬时 (u, v) 覆盖而言, 必须使 $u-v$ 平面上的 (u, v) 点之间的距离最大。

3 二维圆周阵光综合孔径系统的点扩展函数、光学传递函数以及衍射成像

设 N 个半径为 a 的小的子孔径分布在半径为 r 的圆周上, θ_i 为第 i 个子孔径对应的角度。数学上, 由全同子孔径组成的任一综合孔径阵列的光瞳函数可以表示为一个子孔径光瞳函数(振幅与相位)与 δ 函数阵列的二维卷积^[12], 即

$$P(x, y) = \text{circ}\left(\frac{r}{a}\right) \exp[-j2\pi W(x, y)] * \sum_{i=1}^N \delta(x - r_i \cos \theta_i, y - r_i \sin \theta_i), \quad (2)$$

式中 $\text{circ}(r/a)$ 表示圆域函数, $r = \pm \sqrt{x^2 + y^2}$, j 为虚数单位, $W(x, y)$ 为综合孔径阵的波前像差, 对于无像差系统 $W(x, y) = 0$ 。应用 δ 函数卷积的线性特性有

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^N \text{circ}\left[\frac{\sqrt{(x - r_i \cos \theta_i)^2 + (y - r_i \sin \theta_i)^2}}{a}\right], \quad (3)$$

振幅扩展函数 $h(U, V)$ 定义为光瞳函数的二维傅里叶变换, 由卷积性质可得

$$h(U, V) = \left\{ \frac{2\pi a J_1[a(U^2 + V^2)^{1/2}]}{(U^2 + V^2)^{1/2}} \right\} \times \left\{ \sum_{i=1}^N \exp[-j(Ur_i \cos \theta_i + Vr_i \sin \theta_i)] \right\}, \quad (4)$$

式中

$$U = \frac{2\pi x_i}{\lambda f}, \quad V = \frac{2\pi y_i}{\lambda f}, \quad (5)$$

式中 f 为成像系统的焦距, x_i 和 y_i 是像平面中的坐标, λ 为波长。由于光频很高, 实际上像面上探测到的是光强, 为振幅扩展函数模的平方: $I(U, V) = |h(U, V)|^2$, 即点扩展函数。由一阶贝塞尔函数的性质知 $h(0, 0) = N\pi a^2$, 并归一化得

$$S(U, V) = \left| \frac{2J_1[a(U^2 + V^2)^{1/2}]}{a(U^2 + V^2)^{1/2}} \right|^2 \left\{ \frac{1}{N} + \frac{2}{N^2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{i=i+1}^N \cos \left[2r_i \sqrt{U^2 + V^2} \sin \left(\frac{\theta_i - \theta_l}{2} \right) \cos \left(\phi + \frac{\theta_i + \theta_l}{2} \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

$$(6) \text{ 式中 } \phi = \arcsin \left(\frac{U}{\sqrt{U^2 + V^2}} \right) = \arccos \left(\frac{V}{\sqrt{U^2 + V^2}} \right), \quad (7)$$

系统的光学传递函数(用 F_{OTF} 表示)是点扩展函数的傅里叶变换, 对(6)式取二维傅里叶变换

$$F_{\text{OTF}}(f_x, f_y) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} S(U, V) \exp[-j2\pi(f_x U + f_y V)] dU dV, \quad (8)$$

其中 $f_x = x/\lambda f$, $f_y = y/\lambda f$ 。由(6)式和(8)式可知, 对于工作于一定波长的有确定焦距的光综合孔径阵而言, 其像平面上的光强和光学传递函数与子孔径数 N 、子孔径半径 a 、大圆半径 r 、子孔径的位置 θ_i 密切相关。设一个非相干辐射的扩展源分布为 $O(U, V)$, 通过二维圆周光综合孔径阵衍射后所成的像为 $H(U, V)$, 则根据成像理论, 所成的像为目标源与光学系统点扩展函数 $S(U, V)$ 的卷积, 因此有

$$H(U, V) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} S(U - U', V - V') O(U', V') dU' dV', \quad (9)$$

(9) 式再一次说明所成的像的质量主要取决于系统的点扩展函数 $S(U, V)$, 由子孔径数 N 、子孔径半径 a 、大圆半径 r 、子孔径的位置 θ_i 密切相关。

4 成像质量的计算机仿真示例和讨论

应用表 1 中的优化排列的结果, 根据上面得出的(6)式、(8)式和(9)式, 从子孔径数目、大小以及子孔径间的稀疏程度几方面计算了由 7 ~ 16 个子孔径构成的二维圆周光综合孔径阵的点扩展函数、光学传递函数以及图 2 所示的 5 个非相干光源的衍射成像情况, 设 5 个非相干光源分布可用下式表示:

$$O(U, V) = \sum_{m=0}^4 \text{circ} \left[\frac{\sqrt{[U - 2\cos(m\pi/5)]^2 - [V - 2\sin(m\pi/5)]^2}}{0.7} \right], \quad (10)$$

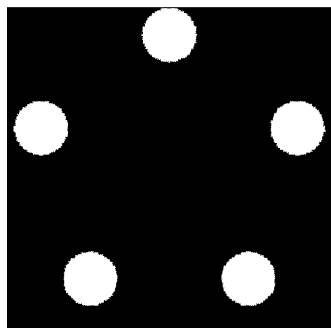


图 2 5 个非相干光源

Fig. 2 Incoherent spread light source

因篇幅关系,这里只给出优化后的 8 个子孔径

和 16 个子孔径的计算结果。此外,为了说明优化排列的成像效果,还比较了 8 个子孔径均匀排列和优化排列时的成像特性。仿真过程中,模拟 $\lambda = 1500 \text{ nm}$ 的平面波入射至 N 个 $a = 1 \text{ mm}$ 或 0.5 mm 的孔径平面这一情况。

4.1 孔径数目

图 3 和图 4 分别是孔径数为 $N=8, 16$ 的综合孔径阵列的点扩展函数、光学传递函数以及 5 个非相干光源的衍射成像的结果。计算中所用的参量为 $r=25 \text{ mm}, a=1 \text{ mm}$ (为保证靠得最近的两子孔径不会重叠, $r/a \geq 25$)。

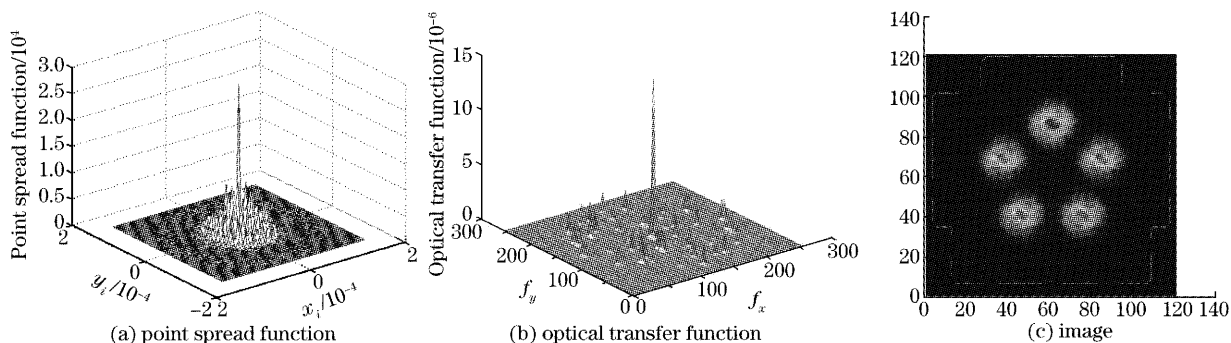
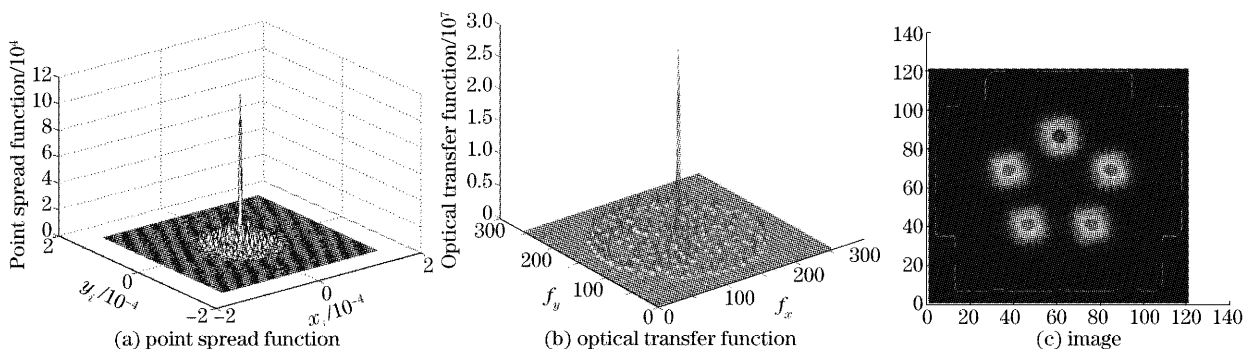
图 3 $N=8$ 优化分布综合孔径成像Fig. 3 Imaging characteristics of optimized spacing for: $N=8, a=1 \text{ mm}$ 图 4 $N=16$ 个优化分布综合孔径成像Fig. 4 Imaging characteristics of optimized spacing for $N=16, a=1 \text{ mm}$

图 3(a)和图 4(a)为点扩展函数(PSF)。因 r, a 相同,两图中的点扩展函数中央峰的锐度、强度包络以及艾里斑的范围相同,说明具有相同的空间分辨力和视场角;而点扩展函数各峰之间的间隔与孔径间距成反比,子孔径数目增多,造成孔径间距减小,因此次峰向外移,衰减更大,光能更多地向几何像点处集中,即减小了由于衍射效应而存在的旁瓣对成像效果的损害,提高了成像质量。图 3(b)和图 4(b)

为光学传递函数(OTF),可以看出,在一定的截止频率范围内,16 个孔径阵列在频域上的覆盖率明显大于 8 个子孔径阵列,两峰之间的零频间隔减小,允许更丰富的频率信息通过,提高成像质量。无论从空域(PSF)、频域(OTF)还是从具体目标成像上考虑,孔径数目的增多都是有利的。

4.2 孔径的大小

将图 3 中的子孔径半径取为 $a=0.5 \text{ mm}$,其余

参量不变,仿真结果如图 5 所示。从图 5(a)上可以看出,中央峰的锐度、各峰之间的间隔与 $a=1$ mm 时相同,但因为子孔径减小,意味着单孔衍射因子对应的强度包络在空间扩展,因此在空域上表现为归一化点扩展函数的次峰值增大,造成成像过程中所谓的“幻影”,对于一物点,所成的像不再是一个锐度

较大的点,而是一系列明暗相间的圆环;在频域上,所覆盖的各频率点的位置不变,但每个频率点周围的覆盖面积减小,零频间隔增大,漏掉了一些频率信息,不利于成像。从图 5(c)可以看出,此时对 5 个非相干光源所成的像已不能很好地分辨出 5 个光源。

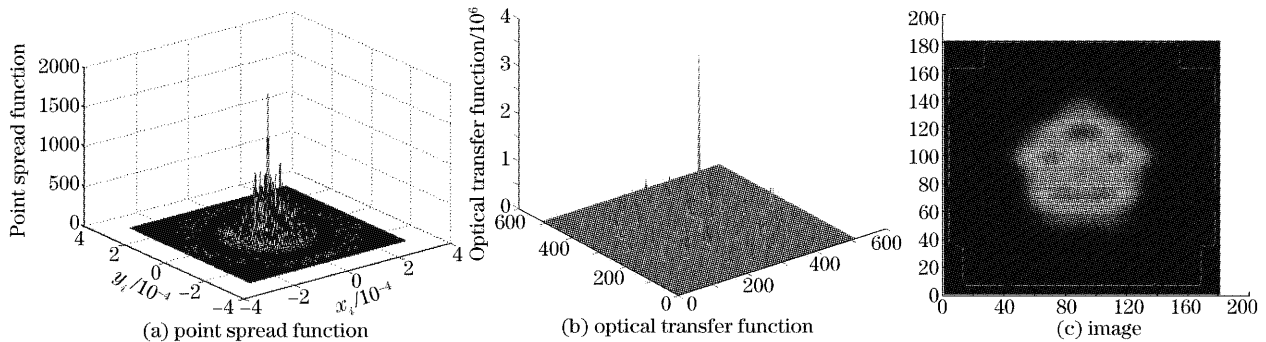


图 5 $N=8, a=0.5$ mm 优化综合孔径成像

Fig. 5 Imaging characteristics of optimized spacing for: $N=8, a=0.5$ mm

4.3 r 增大对成像的影响

保持 N, a 以及子孔径的排列不变,对于均匀分布和优化分布的综合孔径,增大或减小 r ,对应的成像特征呈现不同的规律^[7]。篇幅关系,这里只给出 $N=8$ 时候点扩展函数的计算结果。

首先,以 $N=8$,均匀分布的综合孔径阵为例,比较不同 r 下的点扩展函数(如图 6 所示)。分别取 $k=r/a=8, 25, 50, a=1$ mm。1) 当 r 增大时,等效于 $\Delta\theta=1.22\lambda/D$ 中的 D 增大,点扩展函数中央主峰

的半角宽度减小,系统的角分辨力提高;2) a 不变,意味着单孔衍射因子,即强度包络不变;3) r 增大导致孔径间距增大,又因主峰与次峰之间的间隔与孔径间距成反比,所以次峰向中心靠拢。基于以上三点,图形应是:主峰变细,次峰值增大,成像质量变差。从图 6 中各子图可以看出,仿真结果与理论分析完全一致。对 $N=7\sim 16$ 个均匀分布的综合孔径分别进行仿真计算^[13],都显示随着 r 增大,成像质量变差。

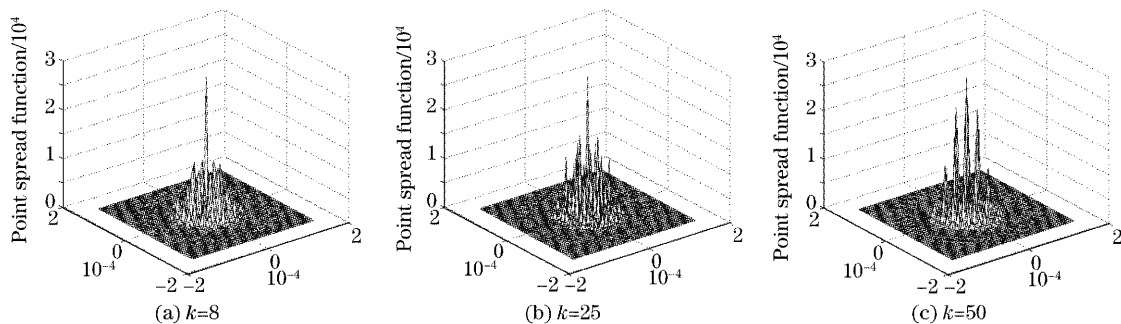


图 6 不同圆周半径下均匀合成孔径的点扩展函数

Fig. 6 Point spread function of different radius of circle for uniform distribution of the array

均匀分布的综合孔径,其点扩展函数具有各向对称性。增大 r ,每组条纹叠加,最终导致中央主峰变细,但各个方向的次峰统统向中央靠拢、次峰值增大。

另外从频域上考虑: r 增大,光学传递函数各频率点同时向外移。对于均匀分布,光学传递函数具有各向对称性,频率点向外移时,某一截止频率范围内、各个方向的频率信息同时失去,成像质量变坏。

4.4 优化与非优化阵列的比较

综合孔径阵列中,各子孔径的结构排列非常重要。一个优化排列的孔径结构,空域上表现为比均匀分布的综合孔径更好地对次峰进行衰减,降低其对中心像点处的干扰;在频域上表现为减少频率的冗余,防止某个空间频率范围的信息被过多通过,避免在光学传递函数中,中央主瓣和旁瓣之间出现函数为零的区域,增大频域覆盖率。对于频谱信息丰

富的目标成像时,可以通过各种图像恢复算法进行补偿,图像失真程度减小,从而达到单个大口径光学系统的分辨力。

仍取 $a=1\text{ mm}$, $r=25\text{ mm}$, $\lambda=1500\text{ nm}$,应用表 1 中的结果,比较在圆周上均匀分布和优化分布的 $N=8$ 个综合孔径阵列的成像特性。将图 7 和图 8

中各子图相比较,显然,经优化设计后,阵列的点扩展函数次峰强度明显减小,成像质量提高;更为重要的是,在频域上,瓣与瓣之间的原本为零值的地方也出现了频率响应,覆盖率增大,更易满足对目标信息频域的采样要求。为便于比较,光学传递函数另从俯视图角度进行观察,如图 7(c),图 8(c)所示。

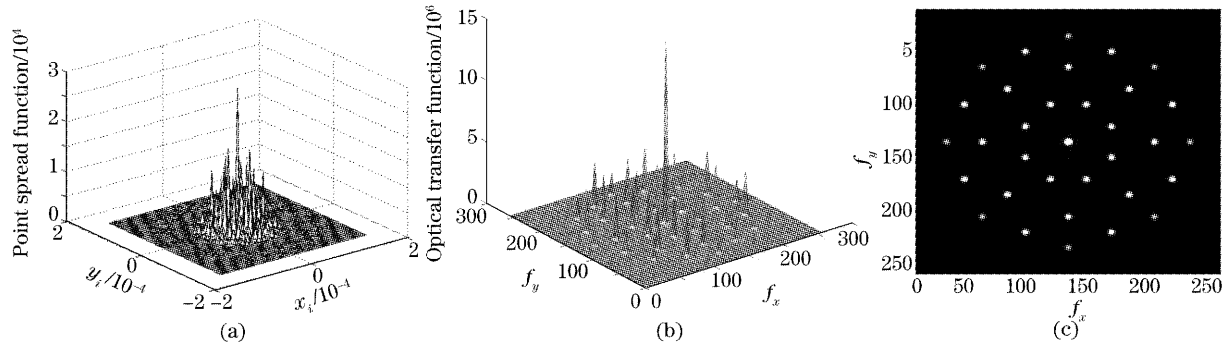


图 7 $N=8$ 均匀排列综合孔径阵的成像特性

Fig. 7 Imaging characteristics of arrays consist of eight sub-apertures distributed evenly.

(a) Point spread function, (b) optical transfer function, (c) top view of optical transfer function

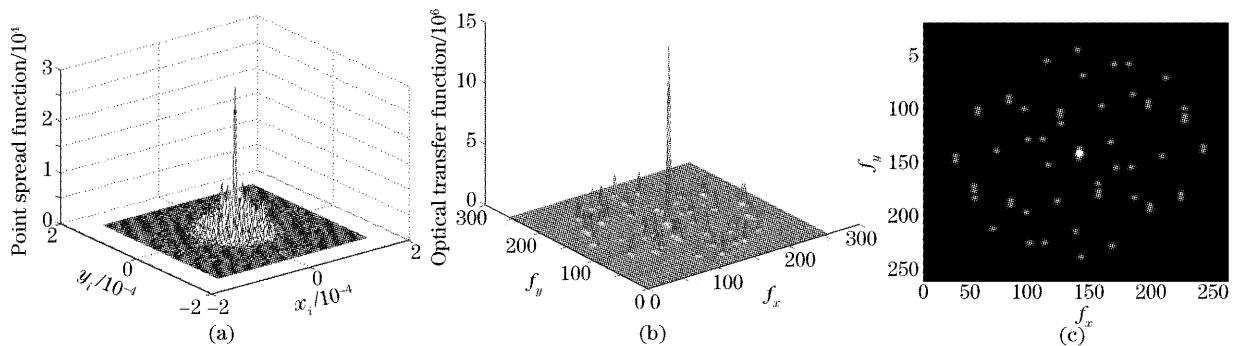


图 8 $N=8$ 优化排列综合孔径阵的成像特性

Fig. 8 Imaging characteristics of arrays consist of eight sub-apertures with optimized position.

(a) Point spread function, (b) optical transfer function, (c) top view of optical transfer function

通过观察光学传递函数及其俯视图,我们注意到,经优化后的阵列,在某些空间频率处的频率响应比均匀分布阵列小(俯视图中亮点变暗)。这是因为均匀分布的综合孔径存在频率冗余,使得某个空间频率的信息被过多通过,而经优化排列后,减小了频率冗余,在频域上的覆盖点增多,但也使得对某一定空间频率的响应减小。

5 结 论

本文采用模拟退火法对二维圆周上 7~16 子孔径组成的光综合孔径阵列进行了优化排列,依据最小冗余度和均匀分布的原则设计了优化的目标函数,并依据光学衍射成像原理,推导了二维圆周光综合孔径阵列的点扩展函数、光学传递函数以及对非

相干目标源的衍射成像公式。运用 Matlab 软件详细分析了子孔径数目、尺寸、最大基线长度以及阵列的排列等因素的不同对系统成像质量的影响,并给出实例说明。本文的结果对实际工程实现有重要的参考价值。

参 考 文 献

- 1 A. B. Meinel. Aperture synthesis using independent telescope [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(11): 2501~2504
- 2 R. V. Shack, J. D. Rancourt, H. Morrow. Effects of dilution on a six-element synthetic aperture[J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(2): 257~259
- 3 Fan Weijun, Zhou Bifang, Wang Haitao *et al.*. Research of Fourier plane in optical synthetic-aperture imaging technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 408~412 (in Chinese)
- 4 范伟军,周必方,王海涛等. 光学综合孔径成像中的傅里叶相位研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 408~412
- 4 Alan T. Moffet. Minimum-redundancy linear arrays[J]. *IEEE*

- Transactions on Antennas and Propagation*, 1968, **AP-16**(2): 172~175
- 5 Marcel J. E. Golay. Point arrays having compact, nonredundant autocorrelations[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**: 272~273
- 6 James E. Harvey, Anita Kotha, Ronald L. Philips. Imaging characteristics in applications utilizing dilute subaperture arrays [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(16): 2983~2992
- 7 Jiang Yuesong. Effects of diameter of sub-aperture on imaging of linear array of optical aperture synthesis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): (to be published) (in Chinese)
江月松. 直线阵光综合孔径成像中的子孔径尺寸效应[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8):
- 8 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
- 9 Su Xianyu, Li Jitao. *Information Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1999. 20~26 (in Chinese)
苏显渝, 李继陶. *信息光学*[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 20~26
- 10 S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr., M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, **220**(4598): 671~680
- 11 T. J. Cornwell, M. A. Holdaway, J. M. Uson. Radio-interferometric imaging of very large objects; implications for array design[J]. *Astrn. Astrophys.*, 1993, **271**: 697~713
- 12 Janet S. Fender. Synthetic aperture: an overview [J]. *Proc. SPIE*, 1983, **440**: 2~7
- 13 Long Weijun, Wang Zhile, Zhou Yanping. Imaging analysis computer simulation of optical synthetic aperture telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1009~1014 (in Chinese)
龙伟军, 王治乐, 周彦平. 光学综合孔径望远镜成像分析及计算机仿真[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1009~1014