

一种新的光学合成孔径系统成像性能指标与 光瞳优化方法

魏小峰 耿则勋 曹力 徐志军

(解放军信息工程大学地理空间信息学院, 河南 郑州 450002)

摘要 为探索能够准确反映合成孔径系统成像性能的特征指标,计算比较了三种典型的六孔径阵列的填充因子上、下限、截止频率、截止能量比以及相关系数等参数,发现其成像质量主要与调制传递函数(MTF)中低频段的频谱分布有关。在此基础上,提出了综合考虑频率高低与频段分布均匀性的加权频段能量曲线,可以较准确地反映不同阵列在成像质量方面的差异。为实现 MTF 中低频段频谱能量最大化,对三种阵列的光瞳结构进行优化,得到对应的中心聚合型阵列。实验结果表明,新阵列在成像质量上明显优于原阵列,填充因子范围也能满足一般设计需求。

关键词 成像系统;光学合成孔径;特征指标;光瞳优化;成像质量;频谱分布

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1111001

A Novel Imaging Performance Index and Pupil Optimization Method for Optical Synthetic Aperture System

Wei Xiaofeng Geng Zexun Cao Li Xu Zhijun

(School of Geography and Space Information, Information Engineering University of the People's
Liberation Army, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract In order to explore the characteristic index which can correctly reflect the imaging performance of synthetic aperture systems, the maximal and minimal fill factors, cut-off frequencies, cut-off energy ratios as well as the correlation coefficients of three typical arrays with six apertures are calculated and compared. It is revealed that the imaging quality is determined by the distribution of low and mid-band modulation transfer function (MTF) spectrum. Based on the discovery, a weighted frequency energy curve which takes the frequency magnitude and distribution into consideration is proposed to precisely reflect the difference in imaging quality of various arrays. To maximize the mid-band energy of MTF, the pupil structures of the three arrays are optimized and the corresponding center-gathered arrays are obtained. The experiment results demonstrate that the imaging qualities of the new arrays are dramatically better than those of the original arrays, and the fill factor ranges can meet the common design demand as well.

Key words imaging systems; optical synthetic aperture; characteristic index; pupil optimization; imaging quality; spectrum distribution

OCIS codes 110.5100; 120.4570; 120.4800

1 引 言

光学合成孔径成像技术是将多个单孔径系统按照一定的排列方式进行排列,通过共相干涉进行成像,实现等效大孔径光学系统的分辨力。它可以突破孔径大小的限制,满足光学系统高空间分辨率成像的要求。合成孔径系统的子孔径尺寸、数量和空

间排布决定了系统的衍射极限分辨率和成像性能,可根据不同标准对阵列构造进行设计与优化。Powers 等^[1]分别比较了三种六孔径阵列的调制传递函数(MTF)、波前误差以及曝光时间与填充因子等多个特征指标,探讨了不同类型波前误差对成像性能的影响;Mugnier 等^[2]基于图像重建误差最小

收稿日期: 2014-05-15; 收到修改稿日期: 2014-06-20

基金项目: 国家 863 计划

作者简介: 魏小峰(1988—),男,博士研究生,主要从事光学合成孔径方面的研究。E-mail: wxf198861@163.com

导师简介: 耿则勋(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光学信息处理方面的研究。E-mail: zxgeng@126.com

化准则提出了不同孔径数的优化排列方式; Tcherniavski 等^[3]通过考察特定频域内频谱分布对子孔径的位置和大小进行优化; Stokes 等^[4]利用调节子孔径尺寸的方法提高中频频谱能量; 王胜千等^[5]从频率覆盖和次峰抑制方面比较了三种不同结构的四孔径合成孔径系统的性能; 此外还有其他学者设计了不同的新型阵列结构, 并分析了相关成像特性^[6-9]。

以往的研究偏重分析合成孔径系统的成像特性, 以此为基础的光瞳结构优化准则可分为两类: 1) 以点扩展函数 (PSF) 的形状、包围能量或旁瓣水平为标准^[10], 常见的特征指标包括斯特列尔比 (SR)、半峰全宽 (FWHM) 和峰值积分旁瓣比 (PISLR) 等; 2) 以调制传递函数的均匀分布 (阵列的冗余性) 或截止频率内平均 MTF 最大为准则进行优化^[11]。需要注意的是, 这些优化准则往往只是理论最优, 并不能直接反映光学系统的成像质量, 单个指标也不能完

全满足阵列设计的需求。光学合成孔径系统的性能优劣最终体现在成像质量的高低, 而决定不同阵列结构成像性能的关键因素仍需进一步挖掘。本文以此为出发点, 通过比较三种典型六孔径阵列的频域特征指标, 探索频谱分布与成像质量间的关系, 并设计一种能够准确反映成像质量的加权频段能量指标。在此基础上提出中心聚合型光瞳优化方案, 从多个方面与原阵列进行比较, 证明新阵列具有更好的成像特性。

2 典型阵列的特征指标对比

光学合成孔径系统是由多个子孔径以一定方式排列组合而成, 以六孔径为例, 典型的合成孔径系统阵列构造方式有三种: 环型、Golay 型和三臂型。合成孔径系统的 MTF 可通过各子光瞳的 MTF 叠加得到:

$$f_{\text{array}}(f_x, f_y) = f_{\text{sub}}(f_x, f_y) * \left[\delta(f_x, f_y) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N(N-1)/2} \delta\left(f_x \pm \frac{\Delta x_n}{\lambda f}, f_y \pm \frac{\Delta y_n}{\lambda f}\right) \right], \quad (1)$$

式中 * 为卷积, $\delta()$ 为脉冲函数, λ 为波长, f 为焦距, N 为子孔径数, $(\Delta x_n, \Delta y_n)$ 是任意两个子孔径中心的距离, f_{sub} 为单个子孔径的 MTF, 可表示为

$$f_{\text{sub}}(\rho) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) - \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^2} \right], & \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \rho > \rho_0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $\rho_0 = D/\lambda f$, D 为子孔径直径, $\rho = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ 。

构与对应的 MTF 如图 1 所示。

填充因子 F 为 0.3 时, 三种典型阵列的光瞳结

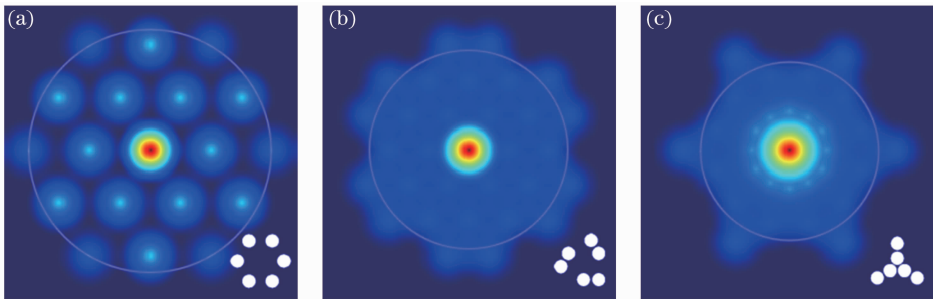


图 1 三种典型阵列的光瞳结构与 MTF。(a) 环型; (b) Golay 型; (c) 三臂型

Fig. 1 Pupil structures and MTF of three typical arrays. (a) Annulus; (b) Golay; (c) Tri-Arm

三种阵列在结构上的不同造成其特征指标与成像性能等方面的差异。下面分别从填充因子、截止频率以及成像质量等方面进行考察。

2.1 最大与最小填充因子

对任一合成孔径阵列而言, 填充因子 F 只能在一定范围内选取。相邻子孔径相切时 F 达到最大,

使截止频率内刚好没有零值点的 F 为最小填充因子, 两者分别用 F_{max} 和 F_{min} 表示。

根据填充因子的定义, 当子孔径数为 N 时, F 与合成孔径外接圆直径 D 以及子孔径直径 d 之间满足

$$F = \frac{Nd^2}{D^2}. \quad (3)$$

假设相邻子孔径中心间距为 a ，则令 $a=d$ 的填充因子即为 F_{\max} ；另外，根据文献[12]提出的利用

表 1 三种典型阵列的最大、最小填充因子

Table 1 Maximal and minimal fill factors of the three typical arrays

	Tri-Arm	Golay	Annulus
F_{\min}	$\frac{1}{6} \approx 0.17$	$\frac{6}{(1+2\sqrt{7})^2} \approx 0.15$	$\frac{6}{(1+2\sqrt{3})^2} \approx 0.30$
F_{\max}	$\frac{6}{(4/\sqrt{3}+2)^2} \approx 0.32$	$\frac{6}{(2\sqrt{7/3}+1)^2} \approx 0.36$	$\frac{2}{3} \approx 0.67$

其中，三臂型 F 变化范围最窄，Golay 型阵列的 F 范围可以将前者完全覆盖，且 F_{\min} 最小，而环型阵列的 F 上下限均达到或接近其他两种阵列的两倍。在确定阵列的填充因子上下限后，即可在此范围内计算并分析合成孔径阵列各项特征指标变化情况。

2.2 截止频率与截止能量比

合成孔径的实际截止频率可定义为 MTF 第一次出现零点时所对应的空间频率 ρ_{\min} ，它决定了合成孔径成像系统的分辨率。 $F=0.3$ 时各阵列的截止频率如图 1 中圆圈所示。以 0.01 为步长，依次增加 F ，则可得到 ρ_{\min} 随 F 的变化关系，如图 2 所示。

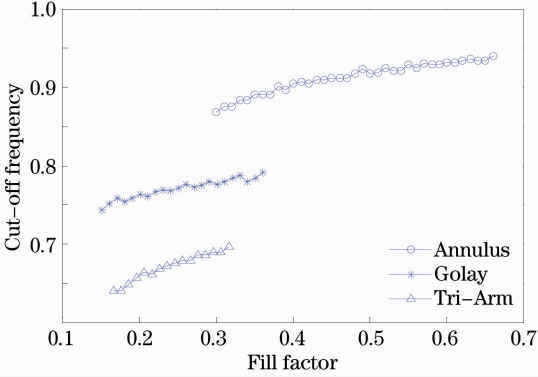


图 2 ρ_{\min} 随 F 的变化关系

Fig. 2 Relationship between ρ_{\min} and F

由图 2 可知，不同阵列的截止频率相差较大，但同一阵列 ρ_{\min} 随 F 增加变化较慢，即截止频率对填充因子不敏感。

得到截止频率之后，可以进一步比较截止频率内的 MTF 频谱能量与总能量之比，将其定义为截止能量比 (CER)，计算公式为

$$R_{CE} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\rho_{\min}} f_{MTF}(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta}{2\pi \int_0^1 f_{MTF}(\rho) \rho d\rho}. \quad (4)$$

该指标可直观地比较合成孔径阵列截止频率内

特征三角计算最小填充因子方法，令 $a=\sqrt{3}d/2$ ，即可得到 F_{\min} 。经计算，可得到三种阵列的最大、最小填充因子，如表 1 所示。

的频谱能量集中程度，三种阵列的 CER 随 F 的变化曲线如图 3 所示。

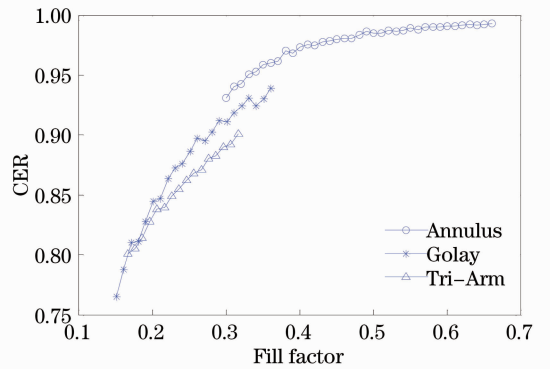


图 3 CER 随 F 变化关系

Fig. 3 Relationship between CER and F

随着 F 的增加，三臂型与 Golay 型的 CER 均有显著提升；通过比较可以发现，环型阵列截止频率内能量最大，三臂型最小。从截止频率及截止能量比两项指标来看，环型阵列成像性能应为最优，Golay 型次之。

2.3 成像质量

受集光面积减小的影响，经合成孔径系统直接获取的图像会出现模糊降质现象。通过计算直接仿真成像与理想图像之间的相关系数，对成像质量进行定量评价，即可比较客观地衡量三种阵列的成像性能^[13-14]。以 Lena 图像为例， $F=0.3$ 时，三种阵列的直接成像结果分别如图 4(b)~(d) 所示。

意外的是，通过环型阵列进行直接成像的视觉效果最差，不仅模糊严重，且边缘出现振铃效应，相关系数也最低；Golay 型阵列的成像质量与三臂型接近，而后的相关系数最高。进一步计算三种阵列在各自填充因子范围内的成像相关系数变化，结果如图 5 所示。

可以发现， F 相同时，成像质量最好的为三臂型阵列，Golay 型次之。通过比较一系列特征指标可



图 4 $F=0.3$ 时三种阵列直接成像结果
Fig. 4 Direct imaging results of three arrays when $F=0.3$

以发现,三种典型的六孔径阵列分别代表了不同光瞳优化方法的结果——从截止频率或截止能量比方面比较,环型阵列最优;Golay 型阵列为非冗余阵列,频谱分布最为均匀,并能够得到最小的填充因子;虽然三臂型阵列在这些特征指标上并没有太大优势,但直接成像质量最佳。这一结果表明 ρ_{\min} 或

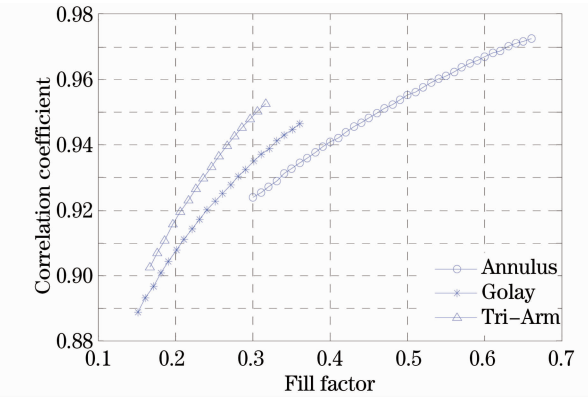
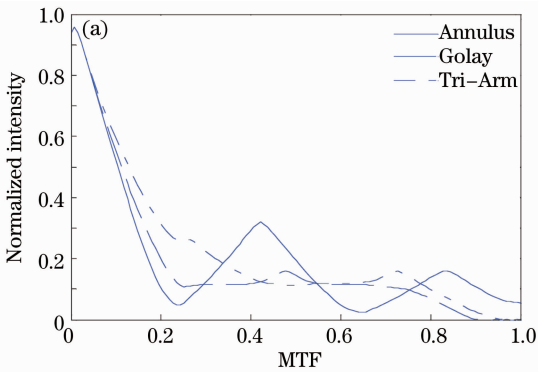


图 5 相关系数随 F 的变化
Fig. 5 Relationship between correlation coefficient and F

CER 等特征指标并不能准确反映合成孔径系统的成像性能,需要另外寻找合适方法进行衡量。

3 加权频段能量曲线

合成孔径系统不同的光瞳分布会导致 MTF 各频段能量的差异。一般而言,合成孔径系统的 MTF 分布具有方向性,具体形状与子孔径排列方式有关。观察图 1 的 MTF 二维分布可发现,过中心的垂直方向与水平方向的 MTF 分别为其最大与最小截止频率方向,图 6 分别给出了 $F=0.3$ 时三种阵列在这两个方向上的 MTF 值。

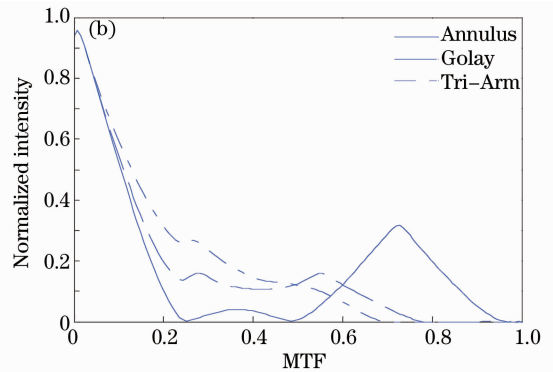


图 6 (a)最大与(b)最小截止频率方向上的 MTF 曲线
Fig. 6 MTF curves indirections of (a) maximal and (b) minimal cut-off frequencies

经过比较发现,环型阵列的频谱起伏最大,其在较高频段仍有多个强度较大的次峰,但在 0.25 左右的频率值接近零,中频能量有较大损失;Golay 型阵列为非冗余阵列,MTF 分布最为均匀,除主峰外的其他频段能量基本一致;与其他两阵列相比,三臂型阵列主峰衰减最慢,在中低频段(0~0.3)的能量也最大。据此可初步推断,中低频段的频谱分布及能量的衰减程度是影响成像质量的重要因素。

从整个频谱进行分析,以 0.05 为步长,将 MTF 分为 20 个同心圆环,分别计算 $F=0.3$ 时不同频段能量占总 MTF 能量的比例,其结果如图 7 所示。

在 0.1~0.5 频段($n \in [2,10]$),三臂型阵列的能量分布十分均匀,且远大于其他两个阵列。各个阵列在中低频段的能量分布与相关系数的变化情况相符。由此可以进一步肯定,决定合成孔径阵列直接成像质量的是中低频段的能量分布,而与截止频

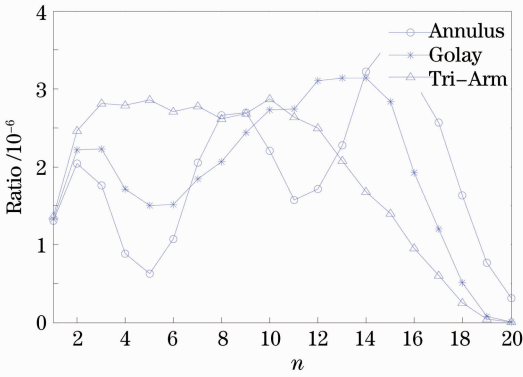


图 7 $F=0.3$ 时各频段能量占总 MTF 能量的比例
Fig. 7 Ratio of each band energy to the whole MTF energy when $F=0.3$

率或截止能量比等因素无关。

在此基础上,设计一种加权频段能量(WFE)曲线,以实现针对不同阵列的成像性能进行准确反映与直观比较。该曲线要达到以下要求:1)单调递减性:频率越高,MTF 频谱对整体成像质量影响越小,因此中低频段的权重应大于高频处,整体能量分布随频率增大而衰减;2)均匀性:某些冗余度较大的阵列(如环型)可能同一频段上会出现强度相差较大的波峰与波谷,而且其成像质量远低于频谱均匀分布的阵列,因此要将同一频段的能量分布均匀性作为另一加权依据;3)统一性:经过两个方面的加权处理,最终应达到具有相同成像质量(即相关系数相同)的不同阵列(F 不同)的能量曲线形状基本一致,即该曲线与阵列结构无关。

经多次实验,确定了能够满足以上要求的加权方法:

1) 计算对频谱位置加权的新频谱能量:坐标 (ξ, η) 处的加权频谱值为 $f_{\text{MTF}}(\xi, \eta) / \omega_1(\xi, \eta)$, 其中, $\omega_1(\xi, \eta) = \xi^2 + \eta^2$, 即该点至频谱中心距离的平方;

2) 得到新的频谱后,以 0.05 为步长,分别统计各同心环型频段内频谱方差 $\sigma_n (n = 1, 2, \dots, 20)$ 。方差值越大,说明该频段能量分布越不均匀,整个频段的权值 $\omega_2(n) = \log(\sigma_n / 2)$ 。

由此可得到频段 n 的加权能量值为

$$E_{\text{WFE}}(n) = \frac{2\pi}{\omega_2(n)} \int_{(n-1)/20}^{n/20} \frac{f_{\text{MTF}}(\rho)}{\omega_1(\rho)} \rho d\rho. \quad (5)$$

该加权方法考虑了同一频段内各点位置的差异,并将整个频段的均匀性以方差形式表达,可以同时满足单调性和均匀性要求。 $F=0.3$ 时,利用(5)式计算得到的三种阵列的 WFE 曲线如图 8 所示。

经过比较可知,合成孔径阵列的加权频段能量

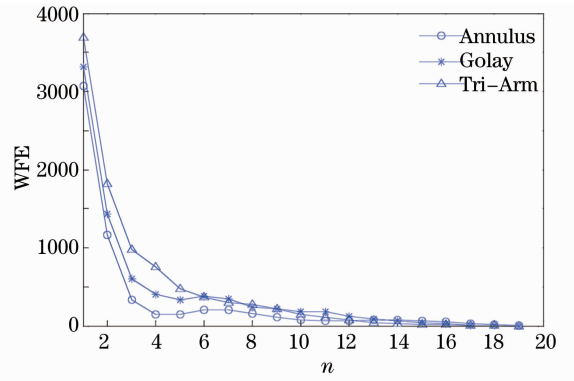


图 8 $F=0.3$ 时三种阵列的 WFE 曲线

Fig. 8 WFE curves of the three arrays when $F=0.3$ 值的高低与其直接成像质量相符;不同阵列 WFE 曲线的差异主要体现在中低频段,三臂型阵列的低频能量衰减最小,Golay 型频谱分布最为均匀,因而均优于环型阵列。另一方面,比较具有相同成像质量的不同阵列(F 不同)WFE 曲线,以相关系数为 0.8 为例,三臂型、Golay 型与环型的填充因子分别为 0.22, 0.27 和 0.33,此时的 WFE 曲线如图 9 所示。

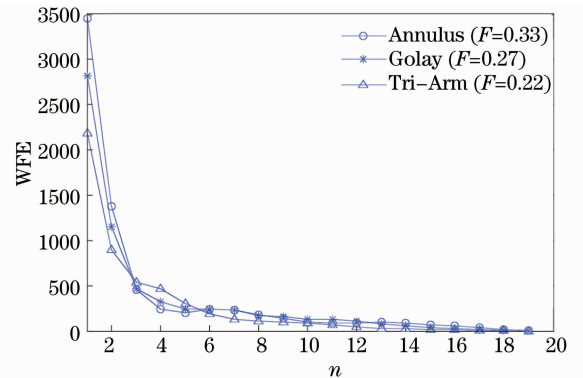


图 9 相同成像质量的三种阵列 WFE 曲线

Fig. 9 WFE curves of the three arrays with the same image quality

可以发现,相关系数相同时,除了靠近中心的两个频段外(主峰能量主要由 F 大小决定),不同阵列的 WFE 曲线基本重合,说明该加权方法能够满足统一性要求。利用该加权频段能量曲线,即可较为直观地预测或反映不同阵列结构的成像质量。

4 中心聚合型阵列

经过以上分析,发现合成孔径阵列的直接成像质量由中低频段能量分布决定。而 MTF 在各个频段的频谱大小又是由阵列结构,即各子孔径间的相对位置决定的。具体而言,靠近阵列中心的子孔径对 MTF 中低频谱影响更大,这可以通过观察合成

孔径系统 MTF 的点阵分布看出。以三臂型阵列为例,以子孔径中心到阵列中心距离为依据,将 6 个子孔径分为内环与外环两类。分别考察内外环上三个子孔径间的 MTF 叠加方式,生成如图 10 所示的 MTF 点阵图。

外环与内环子孔径均为正三角形排列,其 MTF 点阵的差异主要是由子光瞳间的距离决定的。由图 10(a)到图 10(b)可以看作是三孔径阵列的子光瞳向中心聚合的过程,MTF 在聚合后相互叠加,中心频谱得到增强。由此可知,若三臂型阵列内环三个子孔径相切,则能使能量在中低频衰减最小。另外,Golay 型阵列同样可以看作内外环结构,将其内环三个子孔径同时向中心聚合得到新的阵列结构,则其中低频段频谱应能优于原阵列。对于环型阵列

可以采用类似的处理方法,只需要将其不相邻的三个子孔径同时聚合到阵列中心位置即可。采用这种光瞳中心聚合的办法对三种阵列分别进行改进,新阵列的结构与 MTF 分布如图 11 所示。

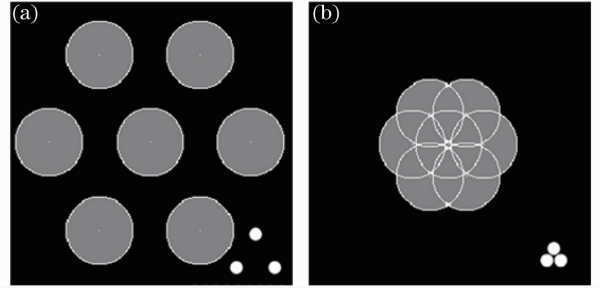


图 10 三臂型内外环 MTF 点阵图

Fig. 10 MTF point distribution of inner and outer rings of the Tri-Arm array

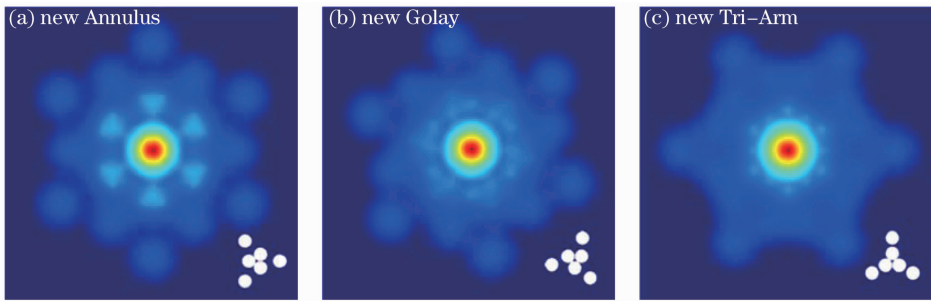


图 11 三种中心聚合型阵列的光瞳结构与 MTF

Fig. 11 Pupil structures and MTFs of the three center-gathered arrays

其中,新三臂型与原阵列相差不大,而其他两种阵列实际上可看作是新三臂型内环分别旋转不同角度得到,它们的频谱分布与 Golay 型及环型有较大不同,为方便起见,仍称之为新 Golay 型与新环型。

新的中心聚合型阵列可以最大程度地弥补中低频段信息衰减的不足,其代价是截止频率减小,同时填充因子的上下限也随之发生变化,具体参数如表 2 所示。

表 2 不同阵列特征指标对比

Table 2 Comparison of characteristic indices of various arrays

Array Type	F_{min}	F_{max}	$\rho_{min}(F=0.3)$	$CER(F=0.3)$
Tri-Arm	0.17	0.32	0.6900	0.8904
New Tri-Arm	0.19	0.35	0.6900	0.8915
Golay-6	0.15	0.36	0.7811	0.9162
New Golay-6	0.22	0.43	0.7222	0.9144
Annulus	0.30	0.67	0.8679	0.9302
New Annulus	0.21	0.55	0.7585	0.9433

从填充因子范围来看,原 Golay 型与环型仍分别有最小和最大填充因子的优势;新阵列的 F 范围是 0.19~0.55,同样能够满足不同的设计需求。中

心聚合型阵列的 MTF 能量更集中在中低频段,因此造成截止频率有所降低,但新环型与新三臂型的 CER 又有所提高,这说明能量进一步向截止频率内集中。

类似地,通过计算相关系数对原阵列和新阵列从成像质量方面进行比较,结果如图 12 所示。

通过图 12 可以直观地比较各阵列在成像方面

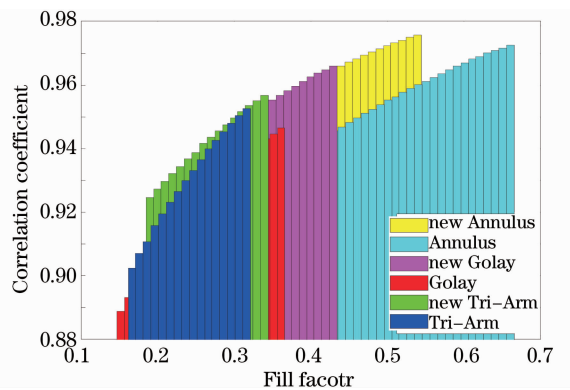


图 12 相关系数随 F 变化关系

Fig. 12 Relationship between correlation coefficient and F

的优劣与特点:整体而言, F 相同的三种中心聚合型阵列直接成像质量均优于原阵列,新阵列之间的主要区别在于填充因子范围不同,成像差异并不明显。利用上节提出的加权频段能量曲线对新阵列进行分析,并与图 8 进行叠加比较,结果如图 13 所示。

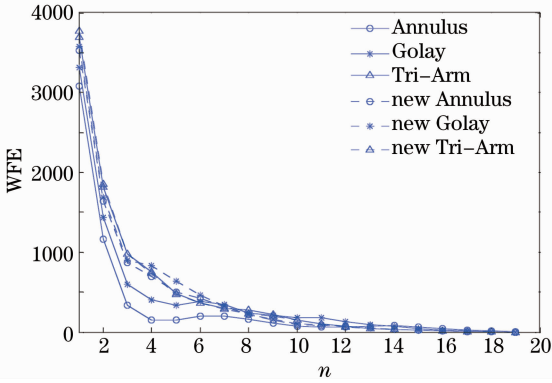


图 13 $F=0.3$ 时三种新阵列的 WFE 曲线

Fig. 13 WFE curves of the three new arrays when $F=0.3$

由图 13 可以看出,WFE 曲线真实反映了新阵列在成像性能方面的提高,三种中心聚合型阵列的 WFE 基本与三臂型重合,这也与相关系数大小相符。分别利用相关系数、均方误差(MSE)和结构相似度(SSIM)三项客观评价指标对 $F=0.3$ 时的 6 种阵列仿真成像结果进行比较,结果如表 3 所示。

表 3 6 种阵列成像评价指标对比($F=0.3$)

Table 3 Imaging assessment indices of the six arrays ($F=0.3$)

Array type	Correlation coefficient	MSE	SSIM
Annulus	0.9236	594.86	0.6796
New Annulus	0.9464	487.45	0.7664
Goly	0.9348	555.47	0.7227
New Goly	0.9470	498.22	0.7671
Tri-Arm	0.9488	490.62	0.7752
New Tri-Arm	0.9498	489.31	0.7756

通过分析比较可以发现,新三臂型与原阵列构造相似,成像质量也最接近;新 Goly 型与新环型的各项指标均有较大提高,其中两者的 MSE 分别降低了 10% 和 18%,SSIM 分别提高了 6% 和 13%,与原阵列相比具有明显的成像优势。

5 结 论

通过对三种六孔径光学合成孔径阵列的若干特征指标进行对比分析,发现 MTF 频谱的大小和分布对系统成像质量有决定作用。提出了一种结合频率高低和频谱均匀性的加权频段能量曲线计算方法,可以准确反映不同阵列结构的成像性能差异。

从提高中低频段频谱能量的角度对原有光瞳结构进行优化,得到中心聚合型阵列及其相关特征参数,实验证明,新阵列的成像质量与原阵列相比有较大提高,可以较好地满足光学合成孔径系统的设计需求。

参 考 文 献

- 1 M Powers, J Leitner, E Hackney, *et al.*. Assessment of a large aperture telescope trade space and active opto-mechanical control architecture [C]. Aerospace Conference, IEEE, 1997, 1: 197-229.
- 2 L M Mugnier, G Rousset, F Cassaing. Aperture configuration optimality criterion for phased arrays of optical telescopes [J]. J Opt Soc Am, 1996, 13(12): 2367-2374.
- 3 L Tcherniavski, M Kahrizi. Optimization of the optical sparse array configuration [J]. Optical Engineering, 2005, 44(10): 103201.
- 4 A J Stokes, B Duncan, M P Dierking. Improving mid-frequency contrast in sparse aperture optical imaging systems based upon the Goly-9 array [J]. Opt Express, 2010, 18(5): 4417-4427.
- 5 Wang Shengqian, Rao Changhui, Jiang Wenhan, *et al.*. Analysis of spatial arrangement for optical synthetic aperture imaging system with four sub-aperture [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(4): 692-699.
- 6 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.
- 7 Wu Quanying, Qian Lin, Shen Weimin. Research on pupil configuration of dual three sub-apertures sparse-aperture system [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(2): 187-192.
- 8 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.
- 9 Yi Hongwei, Li Yingcai, Fan Chao. Research on pupil configuration of equilateral six sub-apertures sparse-aperture system [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(11): 2062-2065.
- 10 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.
- 11 Liang Shitong, Yang Jianfeng, Xue Bin. Imaging research on a new nine-sub-aperture sparse-aperture system [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(s2): 216-220.
- 12 梁士通, 杨建峰, 薛彬. 新型九子镜稀疏孔径结构成像研究 [J]. 光学学报, 2009, 29(s2): 216-220.
- 13 Liu Jun, Jiang Hui, Wang Jun, *et al.*. Study on the torus sparse aperture [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 111101.
- 14 柳军, 姜慧, 王军, 等. 环面形稀疏孔径的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(11): 111101.
- 15 N J Miller, M P Dierking, B D Duncan. Optical sparse aperture imaging [J]. Appl Opt, 2007, 46(23): 5933-5943.
- 16 S T Thurman, J R Fienup. Multi-aperture Fourier transform imaging spectroscopy: theory and imaging properties [J]. Opt Express, 2005, 13(6): 2160-2175.
- 17 Y Jiang, Z Wang, M Zhao, *et al.*. MTF-based research on the minimum fill factor in optical sparse aperture system [C]. 4th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2011. 612-615.
- 18 Wei Xiaofeng, Geng Zexun, Shen Chen, *et al.*. Multiple imaging method of optical synthetic aperture system with phase error limits improved [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0411001.
- 19 魏小峰, 耿则勋, 沈忱, 等. 提高相位误差容限的光学合成孔径多帧成像方法 [J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0411001.
- 20 Kong Xinxin, Huang Min, Zhang Wenxi. Effect analysis of laser frequency-shift error on imaging quality in Fourier telescope [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1211001.
- 21 孔新新, 黄旻, 张文喜. 傅里叶望远镜中激光频移误差对成像质量影响的分析 [J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1211001.

栏目编辑: 张浩佳