

提高相位误差容限的光学合成孔径多帧成像方法

魏小峰¹ 耿则勋¹ 沈 忱¹ 徐 鷗² 潘映峰³

(¹ 解放军信息工程大学地理空间信息学院, 河南 郑州 450002)
(² 61618 部队, 北京 102102; ³ 61175 部队, 南京 210049)

摘要 相位误差的存在严重降低了光学合成孔径系统的成像质量。针对活塞误差和倾斜误差的不同特性,设计对应的量化指标,并以维纳滤波进行复原,利用相关系数进行评价。统计结果表明,只有活塞误差均值小于 0.06λ , 倾斜误差均值小于 $16 \mu\text{rad}$ 时,才能保证相关系数大于 0.98, 近似实现无损复原。在此基础上,通过旋转阵列获取频谱不同的多帧图像共同参与复原,以减小或消除相位误差的影响。比较不同旋转角度和次数情况下的复原结果,最终确定最优方案。实验结果表明,该方法与直接成像相比,可以显著提高含相差系统的图像复原质量,而且将两种相位误差容限分别提高到 0.12λ 和 $35 \mu\text{rad}$,降低了对光学设计和相差校正的精度要求。

关键词 成像系统;光学合成孔径;相位误差;旋转阵列;相关系数;误差容限

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0411001

Multiple Imaging Method of Optical Synthetic Aperture System with Phase Error Limits Improved

Wei Xiaofeng¹ Geng Zexun¹ Shen Chen¹ Xu Kun² Pan Yingfeng³

(¹ Institute of Geography and Space Information, PLA Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China)
(² Troops 61618, Beijing 102102, China; ³ Troops 61175, Nanjing, Jiangsu 210049, China)

Abstract The existence of phase errors severely decreases the imaging quality of optical synthetic aperture system. The quantified scales are designed for the various characteristics of piston error and tip/tilt error. Moreover, Wiener filter and correlation coefficient are opted as restoration and assessment method. Statistic results demonstrate the value of correlation coefficient can be guaranteed beyond 0.98 on condition that average piston error is less than 0.06λ and average tip/tilt error is less than $16 \mu\text{rad}$. Furthermore, the method of rotating the array and acquiring multiple images with various spectra is utilized to reduce or eliminate the effects of phase errors. An optimized scheme is brought out by comparing the restoration results of various rotation angles and times. The experimental result shows that the proposed method can dramatically increase the restoration quality of imaging system with phase errors. The phase error tolerances can be improved to 0.12λ and $35 \mu\text{rad}$, respectively, which means the precision demand of optical design and phase error correction is decreased.

Key words imaging systems; optical synthetic aperture; phase error; rotated array; correlation coefficient; error tolerance

OCIS codes 070.2025; 110.5100; 110.4190

1 引 言

光学合成孔径技术是通过若干子孔径按一定方式排列,满足相位同步条件下,在焦平面上实现干涉成像,从而达到等效大口径望远镜分辨率的成像技

术。它能够突破孔径限制,满足未来各种遥感观测和太空探索任务对成像观测精度及细节分辨能力的要求。光学合成孔径系统的设计和应用主要面临两个方面的问题:1)由集光面积减小引起的中低频信息

收稿日期: 2013-11-28; 收到修改稿日期: 2014-01-01

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

衰减,这使直接获取的图像不可避免地出现模糊降质;2)相位误差存在会造成系统点扩展函数(PSF, f_{PSF})主峰偏移,频谱混叠,进而影响成像质量。

有关相位误差对光学合成孔径系统成像性能的影响,国内外学者已有广泛研究。Harvey等^[1]以同时满足视场角大于 0.5° 和斯特列尔比(SR)大于 0.8 为标准,提出共相望远镜阵列的误差控制指标,要求光束合成误差小于 0.0404λ ,而相位误差要小于 0.025λ 。Sabatke等^[2]探索了各类相位误差的产生和影响,并从光学设计方面分别给出校正方法。Chung等^[3]研究了活塞误差对系统PSF形状和角分辨率的影响,提出活塞误差容差应在 0.1λ 以内。从图像复原角度出发,Fiete等^[4]研究了合成孔径遥感成像的质量影响因素,但未能定量分析相位误差对图像复原质量的影响。国内方面,王晓华等^[5]研究了激光相干合成中的光束平移相差的检测方法,但该类基于远场图像的方法受定位精度影响较大。Wang等^[6]分别推导了活塞误差、倾斜误差和离焦误差与SR指标的变化关系,认为四孔径阵列子孔径间的活塞误差应小于 0.09λ 。

由此可见,目前主要利用SR指标衡量合成孔

径系统成像性能,而其最终标准应是成像或经后处理后的图像质量,基于图像质量分析相位误差影响的研究并不多见,研究不影响图像复原质量的相位误差水平以及如何提高其容限具有重要意义。本文根据两种相位误差的不同特性,设计量化指标,以相关系数为评价方法,得到含相差系统直接成像的误差容限。基于对相位误差对频谱影响的分析,提出旋转阵列进行多帧成像并复原的方法,通过实验确定了最优旋转角度和次数,利用该方法能够有效改善图像复原质量,提高相位误差容限,具有一定的应用价值。

2 基本原理

光学合成孔径系统最主要的两种相位误差分别为活塞误差和倾斜误差^[7]。实际观测过程中,需要使这两种误差均在系统容许值内,这样合成干涉阵列才能近似达到共相位光束合成。

活塞误差又称为相位平移误差,是由于通过各子孔径的光束到达出瞳面的光程差(OPD)引起的,只与复合光束有关。有活塞误差条件下,合成孔径系统的PSF可以表示为

$$f_{\text{PSF, syn}}(x, y) = f_{\text{PSF, sub}}(x, y) \left\{ N + 2 \sum_{n=1}^{N(N-1)/2} \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\Delta\phi_n - \frac{\Delta\epsilon_n x}{f} - \frac{\Delta\eta_n y}{f} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 (x, y) 为像平面坐标, N 为子孔径数, f 为焦距, λ 为波长, $(\Delta\epsilon_n, \Delta\eta_n)$ 是任意两个子孔径中心的距离。 $\Delta\phi_n$ 表示第 n 对子孔径间的OPD(即活塞误差),通常以波长的倍数表示。理想无相位误差条件下, $\Delta\phi_n = 0$ 。PSF_{sub}为单孔径衍射受限非相干成像系统的PSF,可表示为

$$f_{\text{PSF, sub}} = \left| \left(\frac{\pi D^2}{4\lambda f} \right) \frac{J_1(\pi Dr/\lambda f)}{\pi Dr/\lambda f} \right|^2, \quad (2)$$

式中 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 和 J_1 为一阶Bessel函数。

倾斜误差是由于子孔径光瞳在系统光瞳面内或垂直光瞳面方向的旋转产生的。当合成孔径成像系统存在倾斜误差时,其光瞳函数可表示为

$$P_{\text{tip/tilt}}(x, y) = \text{circ} \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D/2} \right) * \sum_{n=1}^N \delta(x - x_n, y - y_n) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} (\alpha_n x + \beta_n y) \right], \quad (3)$$

式中 α_n 和 β_n 分别为光束在第 n 个子孔径波前边缘处的最大X轴与Y轴倾斜误差。含有倾斜误差的合成孔径系统PSF也可以用(1)式表示,此时的 $\Delta\phi_n$ 与坐标有关。

以Golay-6为例,刚好能满足频域内无零点的调制传递函数(MTF)点阵图如图1(a)所示。此时阵列的填充因子最小($F_{\text{min}} = 15.16\%$)^[8]。对于填充因子较小的情况,相位误差的存在更容易使系统MTF频谱内部出现零值区,从而对成像质量造成不

可逆的影响。本文研究即以 $F = 0.16$ 的六孔径Golay型阵列为对象展开。向各子孔径随机添加不同大小的相位误差,则此时的MTF频谱如图1(b)所示。利用图1(c)作为理想图像,以此含相差系统进行仿真成像,结果如图1(d)所示。

比较图1(c)、(d)可见,合成孔径阵列直接成像得到的图像模糊较为严重,部分区域还出现平行于边缘的重复振荡纹理。两种现象产生原因不同:前者是由于频谱能量衰减,中低频信息缺失;而后者是

由于相位误差的存在,子孔径光束不能达到共相干涉条件造成的。如果利用传统的图像复原方法,可

以提高图像清晰度,但恢复后的图像仍有较严重的失真。

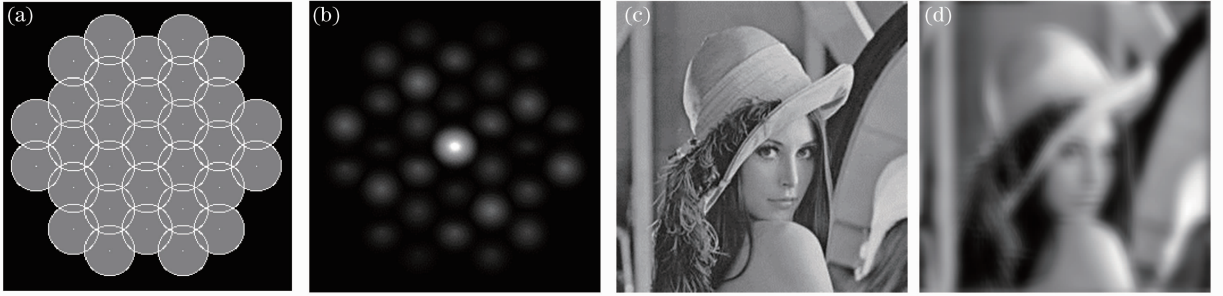


图1 相位误差对系统 MTF 及成像质量影响。(a) $F=0.16$ 时的 MTF 点阵; (b)受相位误差影响的 MTF; (c)理想图像; (d)含相差系统仿真成像

Fig. 1 Influence of phase errors to modulation transfer function (MTF) and image quality. (a) Points array of MTF with $F=0.16$; (b) MTF influenced by phase errors; (c) ideal image; (d) simulation imaging

3 相位误差对复原质量影响

3.1 评价方法

对于不同阵列类型或填充因子的合成孔径系统而言,相位误差的存在均会对其成像质量有一定影响。为了具体分析该影响因素,应当设计合适的评价指标,并分别对随机大小和分布的活塞误差和倾斜误差进行考察。

由于合成孔径阵列的稀疏性和中低频衰减等特性,直接经合成孔径系统成像模糊退化现象严重,相位误差作用无法直观地在退化图像上表现。由于图像复原等后处理技术是必不可少的,系统成像质量可以通过图像复原质量进行评价。暂时忽略光学系统衍射效应和噪声干扰,利用维纳滤波方法对含不同相位误差图像进行复原,并利用相关系数指标对复原质量进行定量评价,即可得到不同相位误差水平对成像质量的直观影响。

维纳滤波算法是一种经典的线性图像复原方法,也是目前国内外进行合成孔径图像复原的主流算法。将图像看作二维平稳连续信号,噪声独立且有零均值,则误差函数的最小值在频域中可用下式

计算^[9]

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{1}{H(u, v)} \frac{|H(u, v)|^2}{|H(u, v)|^2 + S_\eta(u, v)/S_f(u, v)} \right] G(u, v), \quad (4)$$

式中 $S_\eta(u, v)/S_f(u, v)$ 为噪声功率谱与理想图像功率谱之比。实验使用的 PSF 是由理想无相差的光瞳函数经傅里叶变换得到,且暂不考虑噪声影响,以保证复原质量只受活塞误差影响。

相关系数(CC)是一种全局的客观评价指标,通过计算复原图像与理想图像对应像素点的差值,反映它们之间的相似程度,其定义如下

$$r = \frac{E\{[f - E(f)][\hat{f} - E(\hat{f})]\}}{\sqrt{E(f^2) - [E(f)]^2} \sqrt{E(\hat{f}^2) - [E(\hat{f})]^2}}, \quad (5)$$

式中 $E[\cdot]$ 表示数学期望。相关系数越趋近 1,说明复原结果与理想图像越相似,复原效果越好;反之,复原图像与理想图像的偏差越大。文献[10]将相关系数作为评价合成孔径图像复原质量标准是比较合适的,但并未考虑相位误差。



图2 相关系数不同的复原图像对比。(a) $r=0.96039$; (b) $r=0.97477$; (c) $r=0.98011$

Fig. 2 Comparison of restoration images with various correlation coefficients. (a) $r=0.96039$; (b) $r=0.97477$; (c) $r=0.98011$

图 2 为三幅不同相位误差下仿真成像的维纳滤波复原结果,相关系数依次为 0.96039,0.97477 和 0.98011。从直观视觉效果可以看出,相位误差的存在对成像质量的影响主要表现为振铃效应(RA),在高频信息集中的边缘区域尤其明显。对比图 2(a)~(c)可以发现,只有相关系数大于 0.98 的复原图像才能较好避免振铃效应影响,满足合成孔径高分辨率成像要求。

3.2 活塞误差

由于活塞误差是由不同子孔径间的光程差造成的,因而应综合考虑合成孔径阵列各对子孔径间光程差。将各对子孔径间的光程差的平均值作为整个阵列的活塞误差水平,该指标可被定义为活塞误差均值(PEA, R_p),并由下式表示:

$$R_p = \frac{\sum_{i,j}^{N(N-1)/2} \Delta\phi_{ij}}{N(N-1)/2}, \quad (6)$$

式中 $\Delta\phi_{ij} = |\phi_i - \phi_j|, i \neq j$ 。

通过比较不同 PEA 水平下各子孔径随机分布的活塞误差对整个阵列成像质量的影响,可以得到已知阵列类型或填充因子时不影响复原质量的活塞误差限值。

一般的实验方法是对某个或某些子孔径添加固定的相位误差,但实际中必须考虑所有子孔径间活塞误差随机分布的情况。在仿真实验中,利用 Matlab 软件生成均值为零,方差为 σ 的均匀分布数组,将其各元素分别作为对应子孔径的活塞误差值。分别取 σ_ϕ 为 0.01 λ ,0.03 λ 和 0.05 λ ,各进行 200 次“活塞误差添加—仿真成像—图像复原—像质评价”实验,并统计复原图像相关系数随相位误差均值变化情况,结果如图 3 所示。

分析这 600 次的随机实验可以发现,即使 PEA

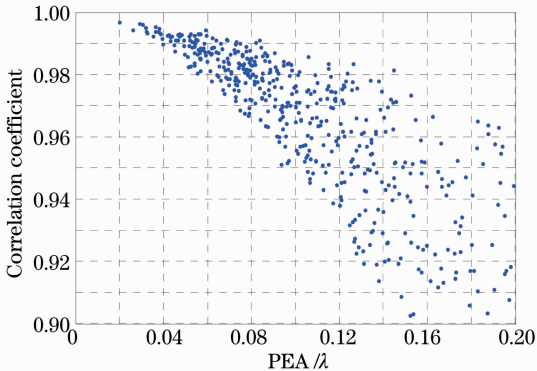


图 3 PEA 与相关系数变化关系

Fig. 3 Relationship between piston error average (PEA) and correlation coefficient

相同,由于各子孔径活塞误差具体数值不同,复原质量仍有较大差异。另一方面,总体来看,相关系数会随 PEA 的减小而逐渐上升,特别是相关系数最小值与 PEA 近似呈线性关系。根据离散点的分布情况不难发现,满足 $r \geq 0.98$ 的 PEA 近似值约为 0.06 λ 。这说明这一指标较 0.1 λ 更为严格,从像质方面对相位误差的检测和纠正提出更高要求。需要注意的是,这一结论是基于 $F=0.16$ 的 Golay-6 型阵列得到的, F 的增大会降低系统对活塞误差的敏感性,在 $F=0.3$ 时,满足 $r \geq 0.98$ 的 PEA 约为 0.09 λ 。如果利用成像时刻含相差的真实 PSF 进行复原,得到结果并无明显差别。这说明活塞误差会使频谱中间出现零值,从而降低截止频率,导致不可逆的降质。

3.3 倾斜误差

与活塞误差相比,倾斜误差对合成孔径阵列的影响更为复杂,其主要原因在于某一子孔径的倾斜误差由两个方向的变量组成,且同一子光瞳面上倾斜误差大小与坐标有关。令 α_n 和 β_n 分别表示第 n 个子孔径光瞳在垂直于光瞳面和光瞳面内的旋转角度。二者最显著的区别在于前者表征镜片的倾斜角度,其大小一般需要控制在 μrad 级别,后者的大小则可认为是完全随机的,因为子孔径镜片理论上可能朝任意方向倾斜。由于两个方向上的倾斜误差实质不同,大小、分布和影响也存在较大差异,因而不能简单相加或取均值来表达其整体的倾斜误差水平。基于以上分析,倾斜误差均值(TEA, R_T)可以由 $\beta_n \in [-\pi, \pi]$ 条件下的 α_n 绝对值均值来表示:

$$R_T(\alpha_n | \beta_n \in [-\pi, \pi]) = \sum_{n=1}^N |\alpha_n|. \quad (7)$$

仿照对活塞误差的处理方式,利用 Matlab 软件生成均值为零,方差为 σ_α 和 σ_β 的均匀分布数组,将其各元素分别作为对应子孔径的两个方向倾斜误差值。取 $\sigma_\alpha=0.05 \mu\text{rad}, \sigma_\beta=0.1 \text{rad}$ 进行 600 次“倾斜误差添加—仿真成像—图像复原—像质评价”过程,得到相关系数与 TEA 关系如图 4 所示。

由图可知,在保证 β_n 在 $[-\pi, \pi]$ 随机分布的同时,TEA 与相关系数同样存在一定相关。根据离散点的分布情况不难发现,满足 $r \geq 0.98$ 的 TEA 近似值为 16 μrad 。在 $F=0.3$ 时,满足 $r \geq 0.98$ 的 TEA 约为 23.8 μrad 。此外,如果在每次图像复原过程中使用含相差的真实 PSF 进行解卷积,则可以发现,无论 TEA 如何变化,相关系数数值一直稳定在 0.998 左右。这说明:1) 任意大小的倾斜误差均不会使频谱中间出现零值;2) 精确已知的含相差点扩展函数

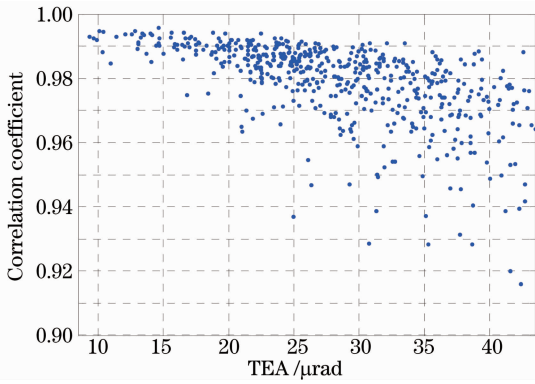


图4 TEA与相关系数变化关系

Fig. 4 Relationship between tilt error average (TEA) and correlation coefficient

时,图像复原质量基本不受倾斜误差影响。真实观测条件下,难以获取实时的PSF,因此无法忽视倾斜误差的存在。

4 旋转阵列与多帧成像

基于复原图像相关系数的相位误差评价标准给

表1 各子孔径相位误差值

Table 1 Phase errors of each sub-aperture

	Sub1	Sub2	Sub3	Sub4	Sub5	Sub6	PEA/TEA
Piston error / λ	0.33	0.12	0.23	0.04	0.4	0.19	0.165
Tip error / μrad	4.5	1.3	2.8	5.2	1.7	3.4	3.15
Tilt error /rad	0.1	0.6	0.2	0	1.2	0.9	0.5

观察图1(a)的MTF分布可知,无相差时,Golay-6阵列旋转 60° 前后MTF分布相同。理论上,以 60° 旋转阵列,各次成像的频谱相叠加,可以最有效地消除相位误差的影响。分别选择 $30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ 和 60° 作为单次旋转角度(用 α 表示),将阵列旋转两周,并在每次旋转后进行仿真成像,对旋转前后几次成像结果取均值作为输入图像, $H(u, v)$ 由理想无相位误差的Golay-6阵列PSF经傅里叶变换得到,然后利用维纳滤波方法进行复原,并计算复原结果与理想图像之间的相关系数,从而得到相关系数随不同旋转角度及旋转次数的变化关系,如图5所示。

观察上图可发现,没有旋转直接成像时, $r = 0.942$,这正常反映了PEA较大时合成孔径图像的复原质量。随着旋转次数的增加,参与图像复原的帧数逐渐增多,但除了 $\alpha = 60^\circ$ 以外,其相关系数反而有不同程度的降低。而且只有 $\alpha = 60^\circ$ 时的复原效果明显优于单帧的维纳滤波方法,且能够达到 $r > 0.98$ 的要求。无论旋转角度如何或者参与复原的图像帧数多少,旋转满一周时, r 正好达到最大值,

光学合成孔径的设计和成像带来更大挑战,目前的光学制造技术很可能无法满足限差要求,现有的相位检测及纠正技术也很难将各个子孔径的活塞误差和倾斜误差均校正到理想水平^[11]。因此,探索含相位误差的光学合成孔径成像及后处理技术十分有必要。

文献[12]提出旋转子孔径阵列成像以获取包含互补信息的多帧图像,并利用多帧迭代盲解卷积算法进行图像复原,取得了较好的效果,但不足之处在于未考虑相位误差影响。有相位误差条件下,旋转阵列以获得多帧不同图像,从理论上可以弥补因活塞误差而出现的频谱零值,以及倾斜误差造成的MTF分布不匀,从而使图像无损或接近无损复原成为可能。

4.1 旋转方案确定

为了比较不同旋转角度及旋转次数对成像质量的影响,分别将六个子孔径活塞误差和倾斜误差设为随机产生的固定值,如表1所示。

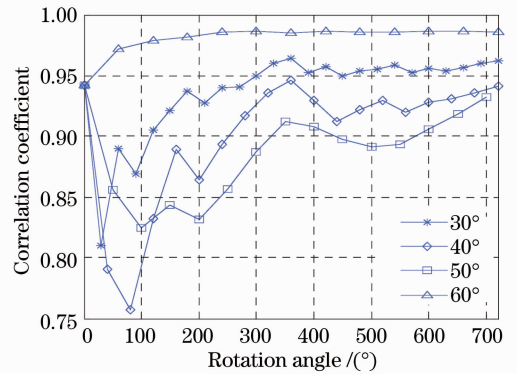


图5 相关系数随旋转角度及次数的变化关系

Fig. 5 Relationship between rotation angles/times and correlation coefficients

此后即使图像帧数增加,像质反而又开始降低,并在旋转两周时达到另一峰值。

当 $\alpha = 60^\circ$,旋转5次时,旋转前后的六帧图像恰好能代表不同方向上的成像情况,原本因相位误差而出现的MTF低频响应或零值区域得到其他方向上的频谱叠加,此时的MTF接近无相位误差的理想情况。因此,再继续旋转成像并进行叠加平均,反

而又会引入新的误差,旋转一周后相关系数随 a 的周期性变化也验证了这一结论。其他情况下,由于旋转后的 MTF 很少或无法与之前频谱重叠,新的频谱较原始频谱会有较大差异,因此复原结果不佳。图 6(a)、(b)分别给出未经旋转和以 60° 旋转 5 次后叠加的 MTF 分布,旋转后的频谱分布明显更加均匀。

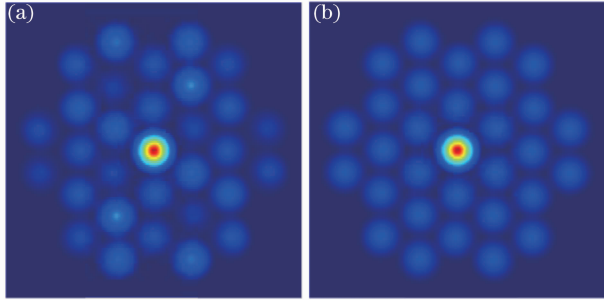


图 6 (a)单次成像及(b)旋转后叠加的 MTF 对比
Fig. 6 Comparison of MTFs by (a) direct imaging and (b) rotated imaging

根据以上分析,结合实验结果可以推断,只有旋转角度和次数均满足一定条件,才能有效利用多帧图像的互补信息,得到更可靠的复原结果。从频谱叠加角度来看,以 60° 或 60° 的倍数为旋转角度最为理想。因此,分别考察 $a=60^\circ$ 、 120° 和 180° 时的多帧成像及复原情况,以确定阵列旋转的最佳角度和次数。综合考虑两种相位误差影响,取 $\sigma_\phi=0.01\lambda$, $\sigma_\alpha=0.01 \mu\text{rad}$, $\sigma_\beta=0.1 \text{ rad}$, 生成随机的活塞误差和倾斜误差并添加到合成孔径阵列的光瞳面。将旋转次数固定为 6,在每次旋转后进行成像和多帧维纳滤波复原,并记录得到的相关系数。分别令 $a=60^\circ$ 、 120° 和 180° ,将此过程各重复 200 次,统计相关系数均值,结果如图 7 所示。

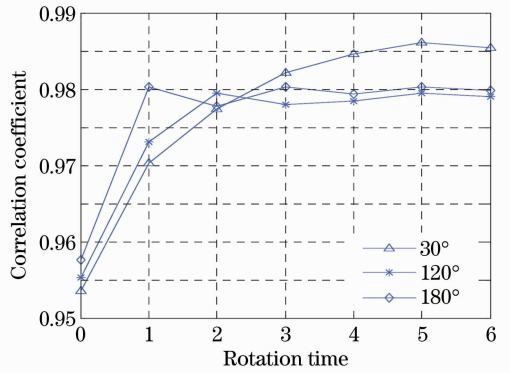


图 7 不同旋转角度与次数对成像质量影响
Fig. 7 Influence to imaging quality by various rotation angles and times

分析 200 次实验的统计结果可发现:1) 未经旋转直接成像时,复原质量普遍较差,而经旋转叠加成像,可以明显提高相关系数值;2) 相关系数一般都在旋转一周时达到最大值,即分别以 60° 、 120° 和 180° 旋转 5 次,2 次和 1 次,极值分别为 0.986,0.979 和 0.981。此后,随着旋转次数增加,相关系数有所回落并基本保持稳定;3) 从复原质量方面比较, $a=60^\circ$ 显然最优:旋转 3 次之后的相关系数均优于其他两组结果。 $a=120^\circ$ 或 180° 时,仅相当于两帧或三帧频谱进行叠加,因而可能出现频谱不能完全覆盖的情况。如果考虑效率和便利因素,也可以采用 $a=180^\circ$,旋转 1 次即可。

由此可以确定,无论旋转角度如何,旋转一周时的成像及复原质量最优。利用旋转阵列进行多帧成像的最优方案并不唯一,可以根据应用需求不同进行选择。

4.2 容限分析与实验

上一节通过实验确定了多帧成像的旋转角度和

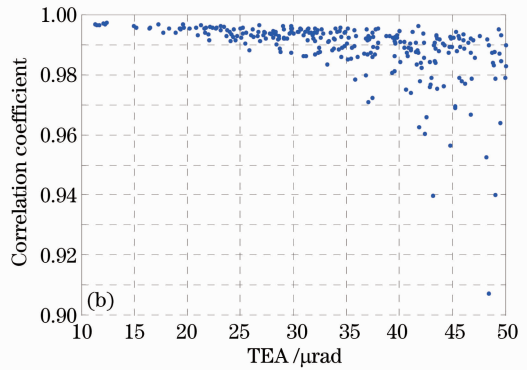
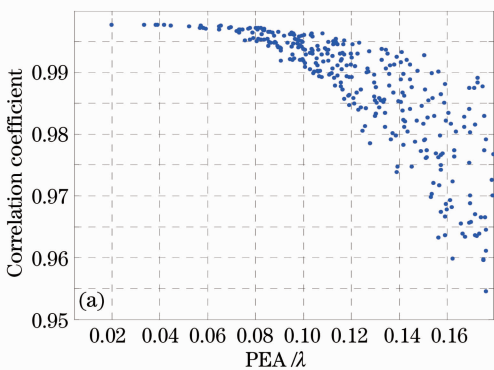


图 8 旋转阵列成像 PEA/TEA 与相关系数变化关系

Fig. 8 Relationship between correlation coefficient and PEA/TEA with rotation array

次数,然而,另一值得关注的问题是基于旋转阵列的多帧维纳滤波方法对相位误差的容限。为此,通过实验考察不同 PEA/TEA 水平下该方法的有效性。分别生成含随机活塞误差或倾斜误差的合成孔径光瞳,直接成像后以 60° 旋转 5 次,得到六帧图像。然后利用多帧维纳滤波方法进行复原,并计算相关系数,对两种相位误差分别重复进行 600 次实验,结果如图 8 所示。

与直接成像、单帧复原的结果(见图 3 和图 4)相比,旋转阵列方法提高了对相位误差的容限: PEA $<0.12\lambda$ 的活塞误差及 TEA $<35\ \mu\text{rad}$ 的倾斜误差均不会影响复原质量(即 $r>0.98$),比直接成像的指标均提高至少一倍。以表 1 中的含相差阵列进行复原实验,未旋转和旋转阵列方法得到的结果分别如图 9(a)、(b)所示。



图 9 两种方法复原结果对比。(a) $r=0.9412$;
(b) $r=0.9843$

Fig. 9 Comparison of restoration results. (a) $r=0.9412$; (b) $r=0.9843$

可以看出,受相位误差影响,直接成像并复原的结果在边缘区出现严重的振铃效应,而平坦区域也出现分块;利用本文方法得到的复原图像,虚假纹理得到抑制,视觉效果改善明显,相关系数也提高了 0.043。

5 结 论

从图像复原质量出发,分别探讨了 $F=0.16$ 的 Golay-6 阵列活塞误差和倾斜误差的限值,提出一种新的合成孔径成像和复原方法。针对两种相位误差的不同特性,设计对应的量化指标——PEA 和 TEA,分别以维纳滤波和相关系数作为复原与评价方法展开实验。根据统计结果得到的活塞误差和倾斜误差容限分别为 0.06λ 和 $16\ \mu\text{rad}$ 。为减小或消除相位误差的影响,通过旋转阵列获取频谱不同的多帧图像,将其均值作为初始图像进行复原。实验表明,以 60° 旋转 5 次或以 180° 旋转 1 次分别是效果

最好和效率最高的方案。该方法与直接成像相比,可以有效改善相位误差造成的图像失真,而且将两种相差容限分别提高了至少一倍。

参 考 文 献

- 1 James E Harvey, Christ Ftaclas. Field-of-view limitations of phased telescope arrays [J]. Appl Opt, 1995, 34(25): 5787—5798.
- 2 E E Sabatke, H B James, P Hinz. Optical design of interferometric telescopes with wide field of view [J]. Appl Opt, 2006, 45(31): 8026—8035.
- 3 Soon-Jo Chung, David W Miller, Olivier L de Weck. Design and implementation of sparse aperture imaging systems [C]. SPIE, 2002, 4849: 181—192.
- 4 R D Fiete, T A Tantalos, J R Calus, *et al.*. Image quality of sparse-aperture designs for remote sensing [J]. Opt Eng, 2002, 41(8): 1957—1969.
- 5 Wang Xiaohua, Zheng Yi, Shen Feng, *et al.*. Research on detection and adaptive correction of phase errors for coherent combing laser arrays [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 021401.
王晓华,郑轶,沈锋,等.光阵列相干合成相位误差的探测与自适应校正研究[J].激光与光电子学进展,2012,49(2): 021401.
- 6 Wang Shengqian, Rao Changhui, Jiang Wenhan. Diffraction-limited performance and aberration tolerance of a sparse optical synthetic aperture imaging system with four sub-apertures [J]. Journal of Modern Optics, 2008, 55(11): 1771—1785.
- 7 R R Butts. Effects of piston and tilt errors on the performance of multiple mirror telescopes [C]. SPIE, 1981, 293: 85—89.
- 8 Jiang Yanchao, Wang Zhile, Zhao Ming, *et al.*. MTF-based research on the minimum fill factor in optical sparse aperture system [C]. Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2011, 612—615.
- 9 Wu Pengfei, Xu Qingshan, Fang Shuai, *et al.*. Optical model of image degradation in atmospheric inhomogeneous path [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0501002.
武鹏飞,徐青山,方帅,等.大气非均匀路径中图像退化光学模型[J].光学学报,2012,32(5): 0501002.
- 10 Wang Dayong, Han Ji, Liu Hancheng. Imaging of optical sparse aperture systems and evaluate method [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(6): 1208—1212.
王大勇,韩骥,刘汉承,等.光学稀疏孔径系统的成像及其评价方法[J].光子学报,2008,37(6): 1208—1212.
- 11 Chen Yiwei, Wang Fei, Wang Gaowen, *et al.*. New sub-aperture stitching algorithm based on transformation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912004.
陈一巍,王飞,王高文,等.基于变换的子孔径拼接新算法[J].光学学报,2013,33(9): 0912004.
- 12 Wei Xiaofeng, Geng Zexun, Lou Bo, *et al.*. Multi-frame synthetic aperture image restoration based on array rotation [J]. J Optoelectronics•Laser, 2013, 24(4): 820—825.
魏小峰,耿则勋,娄博,等.基于旋转阵列的多帧合成孔径图像复原[J].光电子·激光,2013,24(4): 820—825.

栏目编辑:张浩佳