

•信号与信息处理•

多孔径相干成像系统中的共相算法研究

姚平, 余华

(武汉东湖学院 电信学院, 武汉 430212)

摘要:多孔径相干成像技术通过子孔径相干合成,可以实现高分辨成像,子孔径间的共相误差是其关键问题。影响子孔径共相的误差主要包括单个子孔径内的高频误差和子孔径之间的定位误差(平移和旋转),通过对图像锐度进行优化校正相位误差。针对三孔径相干系统进行了仿真研究,结果表明,基于随机搜索算法的锐度优化方法对子孔径内的高频误差和子孔径间的平移误差有良好的校正效果,然而对于子孔径间的旋转误差效果却很差,通过在一定区间内计算合成图像的锐度指标随子孔径旋转角度的变换,搜索极值从而可以有效提取子孔径之间的旋转角度误差。

关键词:相干合成;锐度优化;共相算法

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2016)-05-0042-04

Co-phasing Algorithm in Multi-aperture Coherent Imaging System

YAO Ping, YU Hua

(School of Electronic Information Engineering, Wuhan Donghu University, Wuhan 430212, China)

Abstract: Multi-aperture coherent imaging technology can achieve high resolution imaging through sub-aperture coherent synthesizing. One of the key problems is co-phasing errors between sub-apertures. Typical errors include high-order aberrations within each sub-aperture and orientation errors between sub-apertures. The orientation errors include shift and rotation errors. Phase errors are corrected based on the image sharpness optimization. Simulations for three sub-apertures coherent systems are carried out. Results show that sharpness optimization based on stochastic parallel algorithms can correct shift phase errors of intra-apertures and inter-apertures pretty well. However the stochastic parallel algorithms don't suit for rotational errors of inter-apertures. Through computing the sharpness of synthesized images within a certain rotating angles and searching the extreme value, rotational angle errors of inter-apertures can be well extracted.

Key words: coherent synthesizing; sharpness optimization; co-phasing algorithm

光学成像系统的分辨率与孔径直径成正比,为了提高系统的分辨率,需要增大成像系统的直径。目前实现大口径成像系统的方式主要有两种:单块大镜面成像和合成孔径成像。由于光学加工和制造的难度、成本等因素,单孔径成像系统的孔径增大受到限制。多孔径相干成像技术首先通过干涉方法测量各子孔径内的光场信息,再把各子孔径光

场相干合成为大口径。其中一个关键问题是子孔径的共相误差^[1-7],相位误差主要有两类:单个子孔径内的高频相位误差和子孔径之间的合成误差,后者包括定位误差和旋转误差。对这些相位误差的校正主要是通过锐度优化方法,以合成图像的锐度作为性能指标,以相位误差系数作为优化参数,以实现高分辨率成像。

收稿日期:2016-10-18

基金项目:湖北省教育厅基金资助项目(B2015296)

作者简介:姚平(1984-),男,湖北省随州市人,博士,讲师,主要研究工作是合成孔径成像。

1 多孔径相干成像

1.1 外差探测

多孔径相干成像首先需要测量各子孔径的光场信息,可以通过干涉测量方法来实现,如外差探测^[1,3]。物体反射的光同参考光束进行干涉,通过CCD等探测器记录干涉条纹,对干涉条纹进行处理后就可以得到物光信息。设物光场为 $w(x,y)$,参考光束一般选为平面波或者球面波,这里取为平面波,设参考光波为 $r(x,y)=e^{-j2\pi(k_x x+k_y y)}$,则干涉光强表示如下

$$I(x,y)=|w(x,y)+r(x,y)|^2 \quad (1)$$

对干涉光强 $I(x,y)$ 进行傅里叶变换,可得

$$\begin{aligned} F(I(x,y)) &= F(|w(x,y)|^2) + F(|r(x,y)|^2) + \\ &F(w(x,y)r^*(x,y)) + F(w^*(x,y)r(x,y)) = \\ &R(\tilde{w}(u,v)) + R(\tilde{r}(u,v)) + \tilde{w}(u-k_x, v-k_y) + \\ &\tilde{w}(u+k_x, v+k_y) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $R(\cdot)$ 表示自相关函数; $\tilde{w}(u,v)$ 和 $\tilde{r}(u,v)$ 分别为 $w(x,y)$ 和 $r(x,y)$ 的傅里叶变换。从而可以在空间上分离出 $\tilde{w}(u,v)$,通过截取相关区域可以得到物光的频谱 $\tilde{w}(u,v)$ 。

1.2 共相误差

在进行多孔径相干合成时,相位误差会极大的影响合成图像的质量,对于单个子孔径主要是高频像差,如离焦、像散、彗差、球差等,对于圆形孔径,通常可以采用一组完备正交基函数来描述,如泽尼克函数,通过优化各阶像差系数即可进行相位误差校正^[1,6]。子孔径之间的误差主要包括定位误差和转动误差,设第 m 个子孔径的光场复振幅为 $w_m(x,y)$,子孔径中心位置坐标为 (x_m, y_m) ,则合成光场可表示为

$$w(x,y)=\sum w_m(x-x_m, y-y_m) \quad (3)$$

其频谱计算如下

$$\tilde{w}(u,v)=\sum \tilde{w}_m(u,v)e^{j2\pi(ux_m+vy_m)} \quad (4)$$

很显然,子孔径之间的位置误差对其频谱的影响等同于引入了倾斜像差,考虑到各子孔径的前后

位置误差,对于子孔径之间的位置误差进行校正时仅对活塞项和倾斜项进行校正。

对于旋转误差的校正,研究比较少,在文献[1]中,提出了一种校正方法,把二维直角坐标系 (x,y) 转化为极坐标系 (ρ,θ) ,则在参数 (ρ,θ) 域上进行傅里叶变换,旋转误差等同于参数 θ 的平移,因此可以采用同位置误差偏移相同的校正方法。

1.3 锐度优化

对于一幅图像 $I_{N \times N}$,其锐度^[2-3]可以定义为 $S(I)=\sum \sum I_{m,n}^p / \left(\sum \sum I_{m,n} \right)^p$, p 为指数参数,基于定义的锐度指标可以对各种误差进行校正,当 $p>1$ 时,优化锐度指标至最小值,当 $p<1$ 时,优化锐度指标至最大值。

2 共相算法

为了评估锐度优化方法对不同误差的校正能力,以下以三系统为例,三个子孔径水平均匀排列,对算法进行了仿真研究,仿真分以下三种情况

- (1)单个子孔径内的高频误差校正;
- (2)各子孔径内存在高频误差,子孔径存在定位误差情况下,相干合成图像的校正;
- (3)子孔径存在旋转误差的校正。

仿真过程中采用的物体图像如图1所示,三个子孔径横向均匀排列。

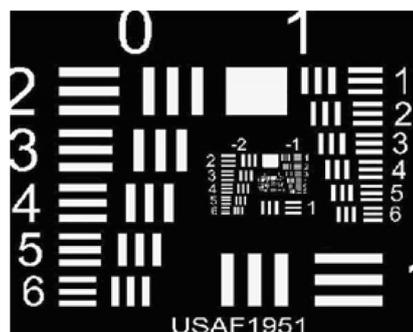


图1 物体图像

2.1 子孔径内的高频误差

选取中间的子孔径进行仿真,在没有加入高频相位误差时,进行图像复原,得到此时的复原图

像,见图 2c。当三个子孔径均不引入高频相位误差,进行图像复原,得到此时的合成图像,见图 2d。由于损失了部分频谱,相比于原图像,复原图像的高频部分比较模糊,三孔径合成图像比单一孔径复原图像具有更高的分辨率,尤其是虚线框内的图像。

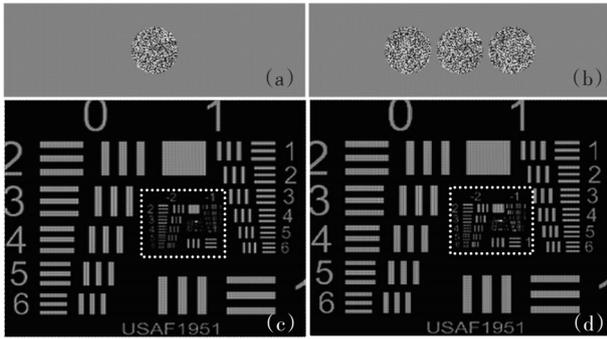
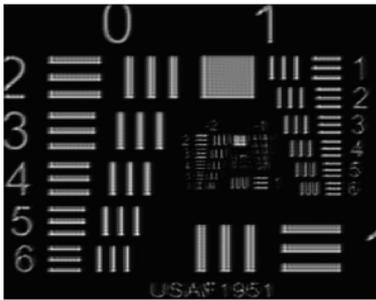
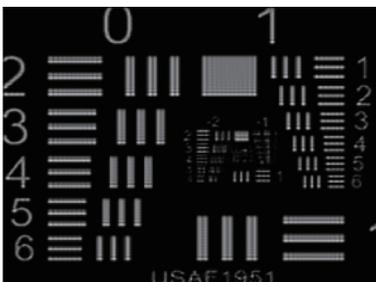


图2 (a)单孔径结构;(b)三孔径结构;
(c)单孔径的复原图像;(d)三孔径的合成图像

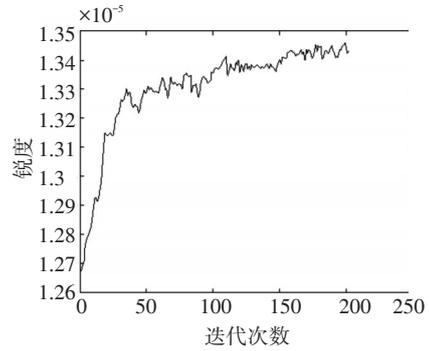
对单孔径的高频像差在子孔径光场中引入高频随机相位误差,仿真时采用了前 15 阶泽尼克像差,复原得到的原始图像见图 3。进行锐度优化过程,一组仿真结果见下图,图 3a 和图 3b 分别为校正前后的复原图像,图 3c 为优化过程中锐度指标的变化曲线。可以看出,在图像质量和锐度指标上均有了明显的改善。



(a)存在高阶相差情况下单孔径的复原图像



(b)优化后的单孔径复原图像

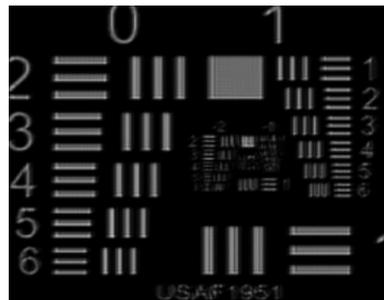


(c)图像的锐度指标随迭代次数的变化曲线

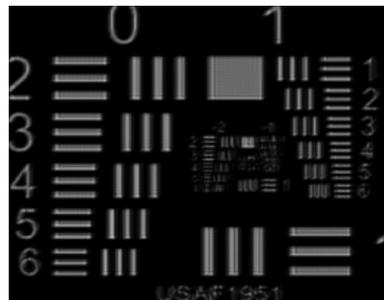
图3 (a)存在高阶相差情况下单孔径的复原图像;
(b)优化后的单孔径复原图像;
(c)图像的锐度指标随迭代次数的变化曲线

2.2 子孔径相干合成

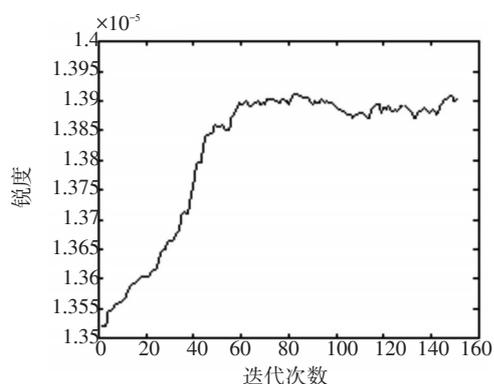
在各子孔径中均引入高频像差,同时各子孔径间存在定位误差,首先在各子孔径内进行高频误差校正,然后进行相干合成校正孔径之间的活塞和倾斜像差。一组优化结果如图 4 所示。图像质量和锐度指标均有了明显的改善。



(a)三孔径结构的初始合成图像



(b)优化后的合成孔径图像



(c) 图像的锐度指标随迭代次数的变化曲线

图4(a)三孔径结构的初始合成图像;

(b) 优化后的合成孔径图像;

(c) 图像的锐度指标随迭代次数的变化曲线

2.3 子孔径间旋转误差

如果各子孔径之间存在旋转误差,该误差直接不能通过优化泽尼克像差系数进行优化,在文献[1]中给出了一种变换域方法:假定第 k 个子孔径的频谱为 $w_k(\rho, \phi)$,其相对于第一个子孔径的旋转角度为 θ ,则实际测量的频谱为 $w_k(\rho, \phi - \theta)$,在极坐标系下,则子孔径之间的旋转角度误差转换为参量的平移误差,从而可以采用与2.2节相同的方法予以优化。按照该方法进行仿真,遇到的主要问题是锐度指标不能够很好的收敛,有极大的可能性陷入振荡,分析其主要原因:当把直角坐标系变换为极坐标系时,需要重采样,从而引入了采样误差;基于随机并行搜索方法进行优化时,通过微小的扰动判断搜索方向,由于采样误差的存在,对锐度指标的计算引入误差,从而容易发生误判。

以下采用两个子孔径进行分析,当两者存在旋转角度时,对合成图像的锐度指标进行分析,其变化曲线如图5所示。

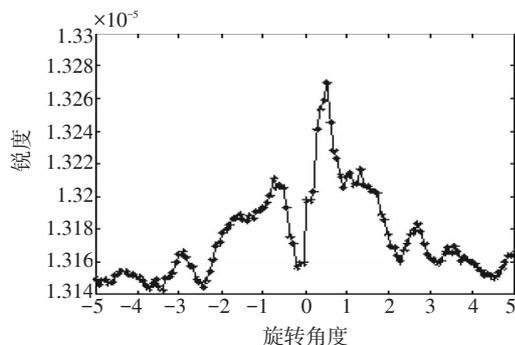


图5 合成图像的锐度指标随旋转角度的变化曲线

由图可见,当旋转角度为0时,锐度指标并不是最大值。当旋转角度约为 0.5° 时锐度指标取得最大值。其原因可解释如下:图像的锐度很大程度上描述了图像的清晰度,锐度指数时,图像的清晰度越高锐度指标越大,该描述并不完全准确,即图像清晰度最高时锐度指标不一定取最大值,二者并不完全同步,因此采用锐度指标对旋转误差进行校正存在一定的误差。通过在一定区间内计算合成图像的锐度指标随子孔径旋转角度的变换,搜索极值从而可以有效提取子孔径之间的旋转角度误差。

3 结论

针对多孔径相干成像技术的共相算法进行了仿真研究。结果表明,通过基于随机搜索算法的锐度优化方法对子孔径内的高频误差和子孔径间的平移误差进行校正,具有很好的效果;基于锐度优化的随机搜索算法对子孔径之间的旋转误差校正效果较差,通过在一定区间内计算合成图像的锐度指标随子孔径旋转角度的变换,搜索极值从而可以有效提取子孔径之间的旋转角度误差。

参考文献

- [1] Bahadir K Gunturk, Nicholas J Miller, Edward A Watson. Camera phasing in multi-aperture coherent imaging[J]. Optics Express, 2012, 20(11): 796-805.
- [2] Fienup J R, Miller J J. Aberration correction by maximizing generalized sharpness metrics[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2003, 20(4): 609-620.
- [3] Samuel T Thurman, James R Fienup. Phase-error correction in digital holography[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2008, 25(4): 983-994.
- [4] Nicholas J Miller, Joseph W Haus, Paul F McManamon, et al. Multi-aperture coherent imaging[J]. Proc. of SPIE, 2011, 8052(7): 1-10.
- [5] David Rabb, Douglas Jameson, Andrew Stokes, et al. Distributed aperture synthesis[J]. Optics Express, 2010, 18(10): 334-342.
- [6] Paxman R G, Marron J C. Aberration correction of speckled imagery with an image sharpness criterion[J]. Proc. of SPIE, 1988, 976: 37-47.
- [7] Nicholas J Miller, Matthew P Dierking, Bradley D Duncan, et al. Optical sparse aperture imaging[J]. Applied Optics, 2007, 46(23): 5933-5943.