

文章编号: 1003-501X(2010)08-0086-06

基于位相相异方法的稀疏孔径系统图像复原

孙敬建^{1,2}, 王 刚¹, 许博谦¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 稀疏孔径成像系统的图像复原是稀疏孔径成像技术的一个关键环节。利用基于离焦的位相相异方法对同时存在子镜活塞误差和倾斜误差的 Golay3 结构类型稀疏孔径系统产生的退化图像进行复原研究, 并采用改进的自适应遗传算法进行数值求解, 同时对高斯噪声污染的图像进行复原。仿真实验结果表明, 利用位相相异方法, 对存在子镜配准误差的 Golay3 结构类型稀疏孔径系统进行图像复原, 能取得非常好的效果, 同时能够反演出较为精确的系统像差。

关键词: 位相相异; 稀疏孔径; 图像复原; 遗传算法

中图分类号: O436.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.08.016

Image Restoration of Sparse Aperture System Based on Phase Diversity

SUN Jing-jian^{1,2}, WANG Gang¹, XU Bo-qian¹

(1. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Image restoration of sparse aperture imaging system is an important step of sparse aperture imaging technology. Exploratory research on restoration of blurred image caused by misaligned sparse aperture imaging system is carried out by using phase diversity based on defocus, and adaptive genetic algorithm is adopted as numerical method. At the same time, the restoration of image added Gaussian noise is also researched. The result of simulation experiment shows that phase diversity is a very effective method for restoration of sparse aperture system image and retrieval of sparse aperture system aberration.

Key words: phase diversity; sparse aperture; image restoration; genetic algorithm

0 引 言

光学稀疏孔径系统通常是指由多个小孔径光学系统构成的阵列, 这些小光学系统通过相位匹配和光路调整, 使得通过各个子孔径的光束在共同的焦平面上满足共相位要求, 以实现光场的相干叠加, 从而达到与之通光口径相当的单一大口径系统的衍射极限分辨率^[1]。稀疏孔径系统利用较小的光学元件获得了更大的有效通光口径, 不但实现了成像系统的轻量化, 而且突破了传统单孔径光学系统口径尺寸的限制。然而, 由于光学稀疏孔径成像系统填充因子小于 1, 直接获取的图像存在中间频率成分损失、噪声影响严重等特点。除了光学孔径衍射与能量限制因素引起的图像质量退化之外, 由于系统是由彼此分离的独立子镜单元组成, 还存在较为敏感的活塞和倾斜误差以及环境随机扰动带来的子镜单元不“共位相”问题, 因而也会严重降低光学系统的成像质量。所以, 图像复原成为稀疏孔径成像技术中必不可少的关键环节。

收稿日期: 2010-04-26; 收到修改稿日期: 2010-06-04

基金项目: 中国科学院国防科技创新基金资助项目

作者简介: 孙敬建(1985-), 男(汉族), 山东德州人。硕士研究生, 主要研究工作是数字图像处理。E-mail: jasonciomp@163.com。

1 位相相异 (PD) 方法基础理论

1.1 PD 基本原理

位相相异是一种较新的图像复原和波前传感方法, 其基本原理是引入已知波前误差的图像对建立目标函数, 并通过非线性最优化技术求解目标函数的最优解以复原目标的清晰像, 同时得到成像系统的波前信息。早在 1988 年, Paxma^[2]和 Fienup 便将基于离焦的 PD 方法应用于稀疏孔径系统的像差反演和图像复原, 但国内的相关研究主要集中在无像差光学稀疏孔径系统的图像复原^[3-4], 对于存在子镜配准误差的稀疏孔径系统的图像复原方面的研究并不多见。PD 方法的基本原理如图 1, 目标物通过稀疏孔径光学系统成像, 成像光束被光学系统后面的分束镜分成两束, 分别在两个通道接收图像。通道一的 CCD 在焦面上接收一幅在焦像, 通道二的 CCD 在一个已知离焦量的离焦位置上接收一幅离焦像, 两个通道的点扩散函数存在一定的非线性关系。位相相异方法就是利用在两个通道采集到的同一目标的不同的像, 将成像系统的光瞳函数和两个通道的光学传递函数之间的关系作为约束条件, 进行图像复原^[5]。

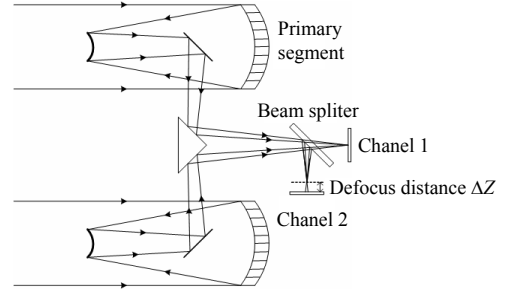


图 1 稀疏孔径系统位相相异原理示意图

Fig.1 Sketch map of phase diversity principle for sparse aperture system

1.2 数学模型

假设光学成像系统是空间不变系统, 且入射光是准单色非相干光, 考虑噪声影响, 则各通道的物像关系可以表示为式(1)的卷积形式:

$$d_k(x, y) = f * h_k(x, y) + n_k(x, y), \quad k = 1, 2 \quad (1)$$

式中: $k=1$ 表示未离焦的情况, $k=2$ 表示离焦的情况, $d_k(x, y)$ 为像的强度分布, $f(x, y)$ 为目标物, $*$ 表示卷积运算, $h_k(x, y)$ 为成像系统的点扩散函数 (PSF), $n_k(x, y)$ 代表附加噪声。在频率域, 式(1)可以表示为

$$D_k(u, v) = F(u, v)H_k(u, v) + N_k(u, v), \quad k = 1, 2 \quad (2)$$

式中: $D_k(u, v)$ 为图像的空间频谱, $F_k(u, v)$ 为目标物的空间频谱, $H_k(u, v)$ 为成像系统的光学传递函数 (OTF)。 $H_k(u, v)$ 是系统相干传递函数 (CTF) 的自相关:

$$H_k(u, v) = C_k(u, v) \otimes C_k(u, v), \quad k = 1, 2 \quad (3)$$

其中 \otimes 代表相关运算。对于稀疏孔径系统的 CTF 可以表示为

$$C_k(u, v) = \sum_{n=1}^N A_n(u, v) \exp\{i[\phi_n(u, v) + \Delta\phi_k(u, v)]\}, \quad k = 1, 2 \quad (4)$$

式中: N 表示系统子镜的总数, $A_n(u, v)$ 为表示第 n 个子镜的二值函数, $\phi_n(u, v)$ 表示第 n 个子镜的像差, 可以用泽尼克多项式来表示:

$$\phi_n(u, v) = \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{j=1}^3 \alpha_j z_j \quad (5)$$

因为稀疏孔径系统中影响像质的像差主要包括活塞和倾斜误差, 所以只用到泽尼克多项式的前三项。 $\Delta\phi_k(u, v)$ 表示离焦造成的像差,

$$\Delta\phi_k(u, v) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\Delta Z_k}{8(f/D)^2} \cdot (u^2 + v^2) \quad (6)$$

式中: λ 为入射光波长, f 为系统焦距, ΔZ_k 为离焦距离。

由于噪声的存在, $d_k(x, y)$ 成为一个满足正态分布的随机变量。根据最大似然估计理论, 推导出目标函数为^[2,6]:

$$L_M(\alpha) = \sum_{u,v} \sum_{k=1}^2 |D_k(u,v)| - \sum_{u,v} \frac{|\sum_{k=1}^2 D_k(u,v) H_k^*(u,v)|^2}{\gamma + \sum_{k=1}^2 |H_k(u,v)|} \quad (7)$$

其中 γ 是根据 Tikhonov 正则化原理引入的正则化因子, 可以避免搜索算法陷入局部极值。 F 为估计图像的频谱:

$$F = \frac{\sum_{k=1}^2 D_k(u,v) H_k^*(u,v)}{\gamma + \sum_{k=1}^2 |H_k(u,v)|^2} \quad (8)$$

对 F 进行逆傅里叶变换就可以得到目标物, 即复原的图像:

$$f = FFT^{-1}(F) \quad (9)$$

2 数值解法

利用 PD 方法, 成像系统的波前探测与图像复原问题演变为寻求目标函数极值点的最优化问题, 研究人员已提出了多种 PD 的数值求解算法, 如共轭梯度法^[2], 拟牛顿算法^[6], 神经网络优化方法^[7-8], 遗传算法^[9]等。我们采用的是一种改进的自适应遗传算法。图 2 为自适应遗传算法流程图。自适应遗传算法中的交叉算子和变异算子是随适应度值自动改变的, 这样不但维持了种群的多样性, 还保证了遗传算法的收敛性。本算法在文献[10]提出的自适应遗传算法的基础上做了一点改进。一方面, 在变异操作中采用了非均匀变异操作^[11]。在进行由 $X = x_1 x_2 \cdots x_k \cdots x_n$ 向 $X = x_1 x_2 \cdots x'_k \cdots x_n$ 的非均匀变异操作时, 若变异点 x_k 处的基因值 v_k 取值范围为 $[U_{\min}^k, U_{\max}^k]$, 则新的基因值 x'_k 由下式确定:

$$x'_k = \begin{cases} x_k + \Delta(t, U_{\max}^k - v_k), & \text{if } \text{random}(0, 1) = 0 \\ x_k + \Delta(t, v_k - U_{\max}^k), & \text{if } \text{random}(0, 1) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\Delta(t, y)$ (y 代表 $U_{\max}^k - v_k$ 和 $v_k - U_{\max}^k$) 表示 $[0, y]$ 范围内符合非均匀分布的一个随机数, 可以表示为

$$\Delta(t, y) = y \cdot (1 - r^{(1-t/T)^b}) \quad (11)$$

式中: r 为 $[0, 1]$ 范围内符合均匀概率分布的一个随机数, T 是最大进化代数, b 是一个系统参数, 它决定了随机扰动对进化代数 t 的依赖程度。非均匀变异使得遗传算法在初始运行阶段(t 较小时)进行均匀随机搜索, 而在运行后期(t 较接近于 T 时)进行局部搜索, 产生的新基因值比均匀变异所产生的基因值更接近于原有基因值, 增加了算法的局部搜索能力^[11]。

另一方面是根据稀疏孔径系统图像退化的先验知识做的改进, 当稀疏孔径系统的活塞误差接近半个波长时, 会造成目标函数在实际的误差值的负值附近产生局部极值, 见图 3, 搜索算法很容易搜索到 0.5 而陷入局部极值。

为了防止陷入局部极值, 每次迭代产生新的种群后都将最优染色体中对应的活塞误差基因值逐一取其负值

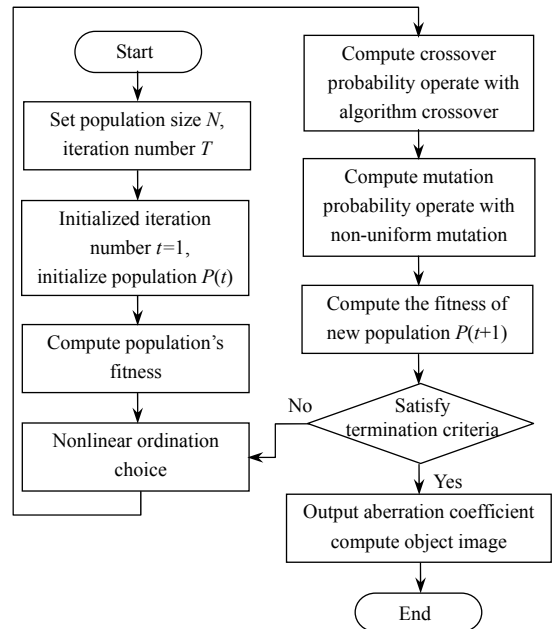


图 2 遗传算法流程图

Fig.2 The flow chart of genetic algorithm

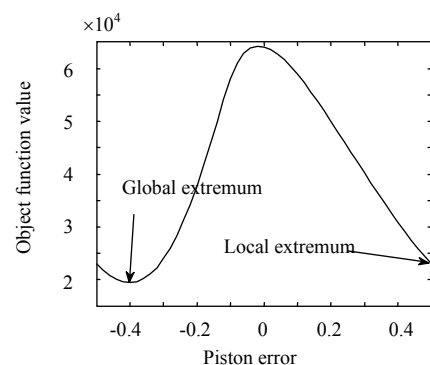


图 3 目标函数的局部极值

Fig.3 Local extremum of object function

产生新的染色体, 将这些新的染色体代替种群中较差个体组成新的种群。新产生的染色体中必定有一个是接近全局极值点的, 通过这种方法可以有效的避免陷入局部极值, 姑且将做这一步改进后的算法称之为新自适应遗传算法(New AGA)。

3 仿真实验结果

设定模拟光学系统的相对口径为 $1/4$ 、焦距为 160 mm , Golay3 结构的稀疏孔径成像系统的孔径布局及子孔径编号如图 4 所示, 其填充因子为 0.5 , 所谓填充因子即为子孔径面积之和与包围孔径面积的比值。稀疏孔径系统子孔径配准误差可分为三种: 活塞误差(Piston)、水平方向倾斜误差(Tip)、竖直方向倾斜误差(Tilt)。将 1 号子孔径作为参考镜, 三种误差同时存在时, 目标函数就存在 6 个独立变量。以 Cameraman 图作为目标物, 见图 7(a), 图像大小为 256×256 。利用式(2)~(6)所示原理获得一幅在焦像、一幅离焦像, 离焦量为 1 个波长, 子孔径误差如表 1 所示, 图 5 为加像差后的 Golay3 系统光瞳的相位面。仿真生成的退化图像见图 7(b)、图 7(c), 由于稀疏孔径系统的通光面积比全孔径系统小, 所以图像的对比度降低。利用 MATLAB 中的 imnoise 函数给退化图像加上方差为 0.1% 的高斯噪声产生噪声图像, 见图 7(g)。由于噪声对图像频谱的影响主要集中在高频部分, 所以可以通过低通滤波滤掉图像的高频信息以降低噪声的影响^[2]。在对噪声图像进行 PD 处理时, 利用二阶巴特沃兹低通滤波器对噪声图像进行频域滤波^[12]。

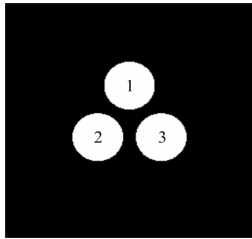


图 4 Golay3 孔径结构

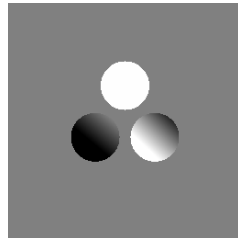


图 5 加像差后的光瞳相位面

Fig.4 Golay3 aperture configuration

Fig.5 Pupil phase plane added aberration

表 1 子孔径配准误差

Table 1 Sub-aperture misalignment configuration

Number of mirror	Piston / λ	Tip / λ	Tilt / λ
1	0	0	0
2	-0.40	0.25	-0.3
3	0.20	-0.38	0.4

利用基于遗传算法求解的 PD 方法进行图像复原, 遗传算法中种群规模为 30, 进化代数 100, 每一维的搜索空间为 $(-0.5, 0.5)$, 式(7)中 b 取 0.5 , 遗传算法中其它参数与文献[9]中相同, 目标函数中 γ 取 10^{-5} 。巴特沃兹低通滤波器的截止频率 D_0 为 26, 在无噪声退化图像复原时式(8)中的 γ 取 10^{-4} , 存在噪声时 γ 取 10^{-3} 。经 PD 方法处理后, 反演像差见表 2, 其中未利用先验知识产生新种群的 AGA 方法反演的 2 号子镜的 Piston 误差陷入如图 3 所示的局部极值, 而改进后的算法可以搜索到全局极值, 其估计误差的 RMS 值为 0.014 , 二者的 RMS 收敛曲线如图 6 所示。通过滤波处理后的噪声图像经 PD 方法处理后也可以搜索到全局极值点, 估计误差的 RMS 为 0.01 , 其收敛曲线如图 6 中间隔线所示。

表 2 反演像差

Table 2 Retrieval aberration coefficient

	Mirror	Piston / λ	Tip / λ	Tilt / λ
AGA	2	0.498	0.253	-0.308
	3	0.165	-0.377	0.388
New AGA	2	-0.375	0.256	-0.289
	3	0.227	-0.376	0.411
Noise added	2	-0.381	0.239	-0.305
	3	0.191	-0.389	0.401

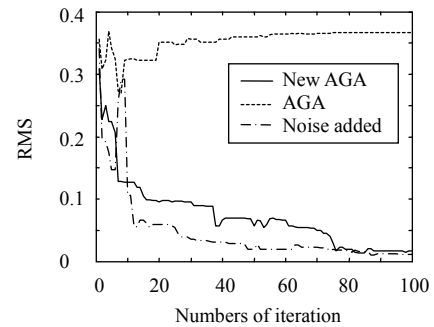


图 6 RMS 随迭代次数变化曲线

Fig.6 The curve of RMS varying with iteration number

图 7 所示为复原图像的结果, 图 7(a)为目标图像, 图 7(b)、图 7(c)为模拟生成的退化图像及离焦图像, 图 7(d)与包围孔径相同大小的单孔径系统的衍射极限图像, 图 7(e)为以无像差系统的光瞳函数生成的光学

传递函数作为退化函数进行维纳滤波处理后得到的图像, 由于估计的退化函数与真实退化函数差距较大, 所以复原后的图像质量依然很差。图 7(f)为利用 PD 方法经过 100 次迭代复原后的图像, 图像的清晰度和对比度都得到了显著的提高。图 7(g)为噪声污染的图像, 图 7(h)为复原后的图像, 图像噪声得到一定程度的抑制, 由于对图像进行了低通滤波, 所以图像的清晰度没有得到明显的提升。



图 7 退化图像复原结果

Fig. 7 The result of image restoration

4 结 论

本文将 PD 方法应用于 Golay3 结构类型稀疏孔径系统的像差反演和图像复原, 并利用改进的自适应遗传算法进行数值求解。仿真结果表明, 对同时存在活塞和倾斜误差稀疏孔径退化图像利用 PD 方法进行像差反演和图像复原, 可以取得很好的效果, 并且对存在噪声的图像, 利用低通滤波的方法同样能够很好的反演像差, 并较好的复原图像。此外, 还证明了遗传算法解决此类问题的有效性, 但是对于变量较多的情况, 种群规模和进化代数很大, 需要很长的处理时间, 针对这个问题还需进一步研究, 拟采用并行遗传算法或者将梯度信息引入到遗传算法中以加快收敛速度。

参考文献:

- [1] 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.
LONG Wei-jun, WANG Zhi-le, ZHOU Yan-ping. Imaging Analysis and Computer Simulation of Optical Synthetic Aperture Telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1009-1014.
- [2] Paxman R G, Fienup J R. Optical misalignment sensing and image reconstruction using phase diversity [J]. *Optical Society of America, Journal, A: Optics and Image Science*(S0740-3232), 1988, **5**(6): 914-923.
- [3] 钱霖, 吴泉英, 吴峰, 等. 稀疏孔径系统成像和图像复原[J]. 激光杂志, 2005, **26**(6): 1030-1035.
QIAN Lin, WU Quan-ying, WU Feng, *et al.* Image recovering for sparse-aperture systems [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(6): 1030-1035.
- [4] 朱锡芳, 吴峰, 陶纯堪. 稀疏孔径光学系统成像恢复算法研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(12): 2319-2324.
ZHU Xi-fang, WU Feng, TAO Chun-kan. Research on image restoration for sparse aperture systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2319-2324.
- [5] 李强, 沈忙作. 基于相位差方法的天文目标高分辨率成像研究[J]. 天文学报, 2007, **48**(1): 113-120.

- LI Qiang, SHEN Mang-zuo. The study of high-resolution imaging of astronomical object based on phase-diversity method [J]. **Acta Astronomica Sinica**, 2007, **48**(1): 113-120.
- [6] Vogel C R, Chan T, Plemmons R. Fast algorithms for phase diversity based blind deconvolution [J]. **Proc. of SPIE**(S0277-786X), 1998, **3353**: 994-1005.
- [7] Miller N, Ling A. Imaging with phase diversity: Simulations with a Neural Network [J]. **Proc. of SPIE**(S0277-786X), 1993, **1982**: 410-417.
- [8] 易红伟, 李英才, 樊超, 等. 基于自组织映射神经网络的位相差异波前传感新方法[J]. 光子学报, 2008, **37**(7): 1373-1377.
YI Hong-wei, LI Ying-cai, FAN Chao, *et al.* A new method of phase diversity wave-front sensing based on SOFM NN [J]. **Acta Photonica Sinica**, 2008, **37**(7): 1373-1377.
- [9] Zhang A H, Wang T T, Li Z Y, *et al.* Algorithm study of phase diverse speckle corrective technique [J]. **Proc. of SPIE** (S0277-786X), 2007, **6595**: 65951D.
- [10] 任子武, 伞冶. 自适应遗传算法的改进及在系统辨识中应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, **18**(1): 41-66.
REN Zi-wu, SAN Ye. Improved adaptive genetic algorithm and its application research in parameter identification [J]. **Journal of System Simulation**, 2006, **18**(1): 41-66.
- [11] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
ZHOU Ming, SUN Shu-dong. **Genetic Algorithms: Theory and Applications** [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.
- [12] 王欣, 赵达尊. 图像噪声对相位变更波前传感的影响研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(8): 2142-2146.
WANG Xin, ZHAO Da-zun. Influence of Noise to Phase Diversity Wavefront Sensing [J]. **Acta Optica Sinica**, 2009, **29**(8): 2142-2146.

~~~~~  
( 上接第 85 页 )

- [11] Wang Guanghui, Wu Q M Jonathan, Ji Zhengqiao. Pose Estimation from Circle or Parallel Lines in a Single Image [J]. **Lecture Notes in Computer Science**(S0302-9743), 2007, **4844**: 363-372.
- [12] 哈特利, 齐瑟曼. 计算机视觉中的多视图几何[M]. 韦穗, 杨尚骏, 译. 合肥: 安徽大学出版社, 2002.  
Hartley R, Zisserman A. **Multiple View Geometry in Computer Vision** [M]. WEI Hui, YANG Shang-jun. Hefei: Anhui University Press, 2002.
- [13] Madsen K, Nielsen H B. Methods for Non-linear Least Squares Problems [R/OL]. (2004) <http://www.imm.dtu.dk/~hbn/immoptibox>.
- [14] WANG Guang-hui, WANG She-wei, GAO Xiang, *et al.* Three Dimensional Reconstruction of Structured Scenes Based on Vanishing Points [J]. **Lecture Notes in Computer Science**(S0302-9743), 2006, **4261**: 935-942.
- [15] Kim J S, Gurdjos P, Kweon I S. Geometric and Algebraic Constraints of Projected Concentric Circles and Their Applications to Camera Calibration [J]. **IEEE Trans. on Pattern Anal. Mach. Intell**(S0162-8828), 2005, **27**(4): 637-642.
- [16] JIANG Guang, QUAN Long. Detection of Concentric circles for Camera Calibration [C]// **Tenth IEEE International Conference on Computer Vision**, Beijing, October 17-20, 2005, **1**: 333-340.
- [17] 宋新, 罗军, 王鲁平, 等. 基于凸包的椭圆检测方法[J]. 光电工程, 2007, **34**(10): 40-44.  
SONG Xin, LUO Jun, WANG Lu-ping, *et al.* Ellipse detection approach based on convex hull [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2007, **34**(10): 40-44.
- [18] Bleser G, Pastarmov Y. Real-time 3D Camera Tracking for Industrial Augmented Reality Applications [C]// **WSCG 2005**, Plzen, Czech Republic, January 31-February 4, 2005: 47-54.