

相干光照明主动成像波前畸变的数字式快速校正

陈波¹, 杨靖², 李新阳³, 杨旭¹, 李小阳¹

(1. 华北理工大学电气工程学院, 河北唐山 063009; 2. 华北理工大学图书馆, 河北唐山 063009;
3. 中国科学院光电技术研究所 自适应光学实验室, 四川成都 610209)

摘要: 针对相干光照明空间外差式探测主动成像中的波前畸变, 提出一种基于图像指标优化的数字式快速校正方法。建立了实验装置, 通过数值分割将整个孔径上的目标光复振幅分割为4个子区域, 在此基础上首先利用随机并行梯度下降算法并行校正子区域内的高阶像差, 然后以其中一个子区域为参考, 并行校正子区域间的波前平移和倾斜。实验结果表明, 直接利用随机并行梯度下降算法校正需要至少600次迭代, 而文中所提出的方法校正需要大约100次迭代, 而且运算量更小, 因此大幅提高了波前畸变的校正效率。

关键词: 自适应光学; 主动成像; 波前校正; 指标优化

中图分类号: TP274.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0732001

Digital fast correction of wavefront distortion in active imaging with coherent light illumination

Chen Bo¹, Yang Jing², Li Xinyang³, Yang Xu¹, Li Xiaoyang¹

(1. School of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China;

2. Library, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China;

3. Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: Considering the wavefront aberration in active imaging with coherent light illumination and spatial heterodyne detection, a digital fast correction technique was proposed. An experimental setup was established, and the target scattering optical complex amplitude on the detection aperture was divided into four sub regions through the numerical segmentation. The high order aberrations in the sub regions were corrected in parallel with tochastic parallel gradient descent algorithm, and then the piston, tip and tilt wavefront aberration among the sub regions were corrected in parallel. The experimental results show that, 600 iterations is needed when the stochastic parallel gradient descent algorithm is used directly, while only 100 iterations is needed for this method proposed in the paper, and the amount of computation is smaller, so that the efficiency of correction is greatly improved.

Key words: adaptive optics; active imaging; wavefront correction; metric optimization

收稿日期: 2015-11-08; 修订日期: 2015-12-13

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究计划(QN2014042); 河北省自然科学基金(F2013209149)

作者简介: 陈波(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要从事自适应光学控制技术、光学主动成像方面的研究。Email: chenbo182001@163.com

0 引言

主动照明成像系统不受环境光的限制, 具有成像距离远等优势, 尤其适用于微光、夜视等环境下的目标观测^[1]。针对相干光照明、空间外差式探测成像系统中的波前畸变, 研究人员研究了基于图像指标优化的数字式波前校正技术^[2-3]。探测到光外差信号后, 首先利用傅立叶变换等方法复原出探测面上目标散射光复振幅, 然后通过模拟光束衍射即可计算出目标图像。在进行波前校正时, 借鉴无波前探测自适应光学波前校正思想, 以目标图像的清晰度指标值为优化目标, 利用优化算法对一定数量的泽尼克(Zernike)模式系数进行多次迭代, 使得清晰度指标值趋于最优, 从而实现波前畸变校正。与传统的自适应光学技术相比, 这种数字式校正技术无需波前探测器、校正器等复杂的硬件设备, 但是运算量较大, 尤其是当探测孔径较大、探测器像素数较多时, 可能导致该方法难以实施。为了减少这种方法的运算量, 提高波前校正效率, 文中提出一种基于目标光复振幅数值分割和综合的波前畸变快速校正方法, 并进行了实验验证。

1 相干光照明成像波前快速校正方法

1.1 成像模型和波前畸变

基于相干光照明和空间外差探测的主动成像模型如图 1 所示^[2-4]。利用相干光对目标进行照明, 接收装置中的光电探测器记录目标散射光和本地参考光的外差干涉信号, 数字信号处理器通过处理干涉信号获得探测面上和目标所在平面上的目标散射光复振幅, 然后针对波前畸变进行数字式波前校正, 最终获得清晰的目标像。

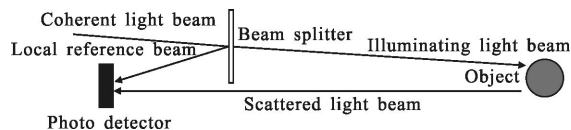


图 1 相干光照明和空间外差探测的主动成像模型

Fig.1 Scheme of active imaging based on coherent light illumination and spatial heterodyne detection

利用 $R(x, y)$ 和 $T(x, y)$ 分别表示本地参考光和目标散射光在探测平面上的光场, 那么光电探测器记

录的外差信号可表示为:

$$I(x, y) = |R(x, y) + T(x, y)|^2 = |R(x, y)|^2 + |T(x, y)|^2 + R^*(x, y)T(x, y) + R(x, y)T^*(x, y) \quad (1)$$

理想情况下, 如果本地参考光为一个平面波 $R(x, y) = R_0 \exp[-j2\pi(ax + by)]$, 对 $I(x, y)$ 进行傅立叶逆变换 (IFT), 可得

$$I(u, v) = \text{IFT}[I(x, y)] = R_0^2 \delta(u, v) + t(u, v) \otimes t^*(u, v) + R_0 t(u + a, v + b) + R_0^* t^*(u - a, v - b) \quad (2)$$

式中: $R_0 \delta(u - a, v - b)$ 为 $R(x, y)$ 的傅立叶逆变换结果; $t(u, v)$ 表示 $T(x, y)$ 的傅立叶逆变换结果; “ \otimes ” 表示卷积运算; “*” 表示共轭运算。

当 a 和 b 满足条件使得 $t(u, v) \otimes t^*(u, v)$ 、 $R_0 t(u + a, v + b)$ 和 $R_0^* t^*(u - a, v - b)$ 不重叠时, 就能够通过图像滤波从 $I(u, v)$ 中提取出 $R_0 t(u, v)$ 。对 $R_0 t(u, v)$ 进行傅立叶变换就能够获得目标散射光在探测平面上的光场 $T(x, y)$ 。在此基础上, 借助菲涅耳衍射等运算就能够获得目标所在平面光场 $t_1(x_1, y_1)$ 以及清晰的目标图像 $O(x_1, y_1)$ ^[5]。

在实际中, 本地参考光、目标散射光的波前畸变会影响重构出的目标图像质量。假设存在相位畸变的参考光为 $R'(x, y) = R(x, y) \exp(j\phi_1)$, 存在相位畸变的目标散射光为 $T'(x, y) = T(x, y) \exp(j\phi_2)$, 这时利用傅里叶变换复原出的探测面上畸变目标散射光场为 $T'(x, y) = T(x, y) \exp[j(\phi_1 - \phi_2)]$, 从而影响最终重构出的目标图像质量。

1.2 波前畸变快速校正方法

针对畸变目标散射光场 $T'(x, y)$, 目前广泛采用的基于图像指标优化的波前校正方法如图 2 所示。优化算法以一定数量的 Zernike 模式系数 z 为迭代变量, 通过多次迭代使目标图像清晰度指标值 J 达到最优, 从而完成波前畸变校正^[2], 对于上述波前校正技术, 运算量和优化算法的效率是影响波前校正效果的主要因素。从运算量的角度考虑, $T'(x, y)$ 到 $O(x_1, y_1)$ 的运算主要为离散傅里叶变换^[5], 其运算量与采样点数的平方成正比, 因此将一个长序列分为几个段序列进行运算就能够显著减少运算量。从优化算法的效率的角度考虑, 以目前普遍使用的随机并行梯度下降 (SPGD) 算法为例^[6-7], 算法收敛所需迭代次数与迭代变量总数的平方根成正比, 因此减少迭代变量就能够显著提高算法效率。

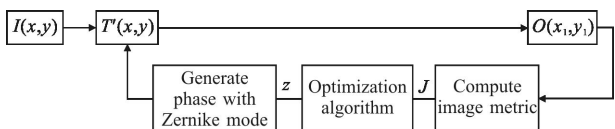


图 2 基于图像指标优化的波前校正示意图

Fig.2 Scheme of wavefront correction based on image metric optimization

基于以上分析,将 $T'(x, y)$ 分割为 N 个子模块 $T_1'(x, y), T_2'(x, y), \dots, T_N'(x, y)$, 在此基础上首先利用优化算法并行校正子模块内的高阶像差, 然后以某一子模块为参考, 利用优化算法并行校正子模块间的波前平移和倾斜, 就能够完成对 $T'(x, y)$ 的波前校正, 如图 3 所示。从快速傅里叶变换运算量的角度来看, 由于子模块的点数较小, 因此能够减少运算量; 从 SPGD 算法所需迭代变量数目的角度来看, 在校正各个子模块 $T_j'(x, y)$ 内的高阶像差时, 根据科尔莫哥诺夫大气湍流波前相位畸变方差与 Zernike 模式数量、口径 D 之间的关系^[8], 由于子模块对应的口径小, 所以所需模式数量远小于直接校正 $T'(x, y)$ 像差所需模式数量; 在并行校正子模块 $T_j'(x, y)$ 间的波前平移和倾斜时, SPGD 算法只需要 3 个迭代变量。

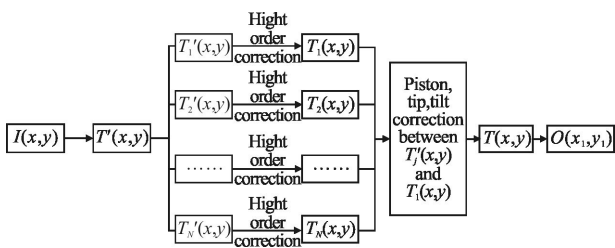


图 3 $T'(x, y)$ 波前畸变快速校正示意图

Fig.3 Scheme of fast wavefront correction process of $T'(x, y)$

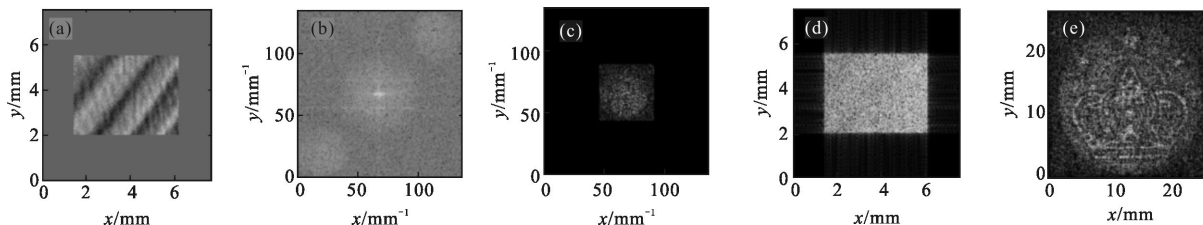


图 5 目标散射光 $T(x, y)$ 及图像 $O(x_1, y_1)$ 的重构过程

Fig.5 Process of reconstructing the target scattering light $T(x, y)$ and image $O(x_1, y_1)$

目标图像 $O(x_1, y_1)$ ^[5]。

考虑到实验系统口径较小, 较难引入波前畸变, 利用 C. M. Harding 的方法随机产生一帧大气湍流

2 实验与结果分析

2.1 实验系统及方案

搭建了如图 4(a)所示的实验装置(其中的虚线条代表光路): 激光器(1 mW, 635 nm)的出射光束经过衰减后依次经过准直透镜、光阑和分光镜(分束比为 1:1), 其反射光束作为本地参考光, 透射光束对一枚直径约为 25 mm 的金属币(图 4(b))进行照明, CCD 相机(德国 svs340 MTR CPC, 像素数为 480×640, 像素大小 7.4 μm×7.4 μm)记录参考光和硬币散射光的干涉信号。经过光阑后的光束直径约为 20 mm, 金属币与 CCD 之间的距离约为 900 mm。

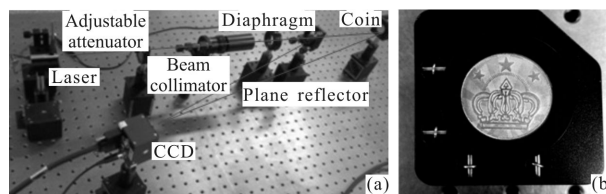


图 4 空间外差探测主动成像实验装置(a)和用作目标的金属币(b)
Fig.4 Experimental setup (a) and coin as target in experiment (b)

CCD 采集到的全息图经采集卡读入计算机, 在计算机中完成目标图像重建。为了减小频率混叠引起的误差, 对干涉信号补零至采样点数为 1 024×1 024 后进行运算, 具体过程为如图 5 所示。图 5(a)为对 CCD 检测到的一帧干涉信号 $I(x, y)$ 补零至 1 024×1 024 像素; 图 5(b)为对补零后的 $I(x, y)$ 进行傅立叶反变换和取模, 即 $|I(u, v)|$; 图 5(c)为从 $I(u, v)$ 中提取 $R_{of}(u, v)$, 并补零; 图 5(d)为对补零后的 $R_{of}(u, v)$ 进行傅立叶变换, 得到目标散射光在探测平面上的光场 $T(x, y)$, 图 5(e)为采用一次傅里叶变换法从 $T(x, y)$ 计算到的

相位屏^[9], 去除其中的波前整体倾斜, 然后加载到复原出的 $T(x, y)$ 上作为 $T'(x, y)$ 。相位屏采样点数为 1 024×1 024, 湍流外尺度为 100 m, 内尺度为 0.01 m,

D/r_0 等于 10。将 $T'(x,y)$ 等分为左上、右上、左下、右下 4 部分, 分别记作 $T_1'(x,y)$ 、 $T_2'(x,y)$ 、 $T_3'(x,y)$ 、 $T_4'(x,y)$, 然后采用图 3 所示的基于复振幅分割的快速校正方法进行波前校正, 并与对 $T'(x,y)$ 直接采用图 2 校正方法取得的结果进行对比, 以验证这种方法的效率。实验中采用 SPGD 算法作为优化算法, 采用图像清晰度函数

$$J = \frac{\iint O(x_1, y_1)^{0.9} dx_1 dy_1}{\left(\iint O(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \right)^{0.9}} \quad (3)$$

作为优化目标^[2-3], 其中 $O(x_1, y_1)$ 表示目标图像。

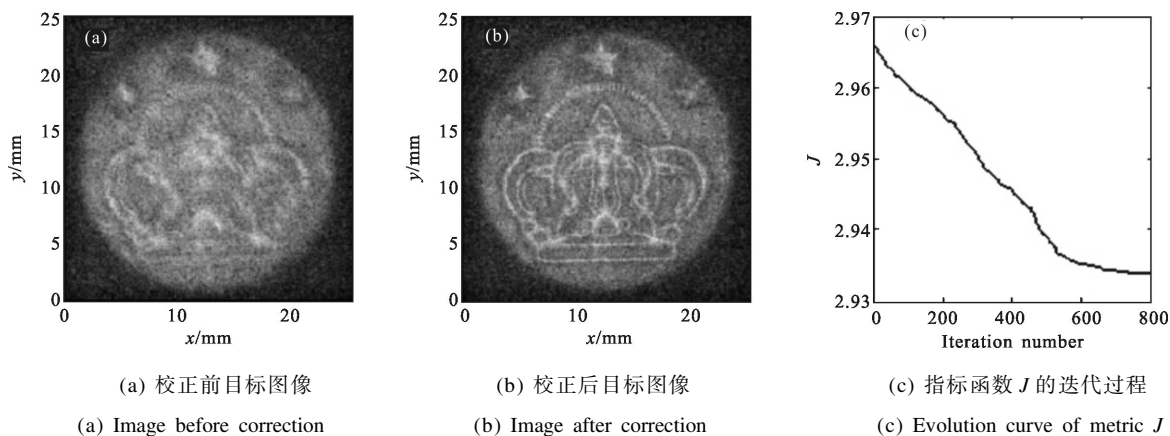


图 6 直接对 $T'(x,y)$ 采用图 2 的方法校正的结果

Fig.6 Correction results with the method in Fig.2

采用图 3 所示的方法, 对 $T_1'(x,y)$ 、 $T_2'(x,y)$ 、 $T_3'(x,y)$ 、 $T_4'(x,y)$ 内的高阶像差校正时, 由于各个子模块对应的口径为分割前的 1/2, 根据科尔莫哥诺夫大气湍流波前畸变方差、Zernike 模式数量、 D/r_0 之间的关系^[9], 校正前 10 阶 Zernike 像差 (不包括波前平移和倾斜) 后的残余波前方差为 0.5852 rad^2 ^[9], 与直接对 $T'(x,y)$ 校正前 40 阶 Zernike 模式后的残余波前的方差 0.5592 rad^2 接近。因此, 对上述 4 个子模块内的高阶像差利用前 10 阶 Zernike 模式进行迭代校正时, J 的迭代过程如图 7(a) 所示。在此基础上, 分别校正 $T_2(x,y)$ 、 $T_3(x,y)$ 、 $T_4(x,y)$ 相对于 $T_1(x,y)$ 的波前平移和倾斜 (piston、tilt 和 tip, PTT) 误差, J 的迭代过程如图 7(b) 所示。最后将 $T_1(x,y)$ 、 $T_2(x,y)$ 、 $T_3(x,y)$ 、 $T_4(x,y)$ 根据其分割前的位置排布起来组成 $T(x,y)$, 利用 $T(x,y)$ 计算得到的目标图像如图 7(c) 所示 (5 帧平均结果)。可以看出, 校正 4 个子区域内高阶像差大约需要 75 次

J 越小图像清晰度越高, 因此实验中对其向最小值方向优化。公式(3)中图像数据的指数取 0.9 的原因是: 首先该参数不能等于 0 或 1, 其次当该指数大于 1 时, 优化算法向极大值方向优化 J , 在校正后期 J 较大, 容易引起振荡而难以全局收敛。

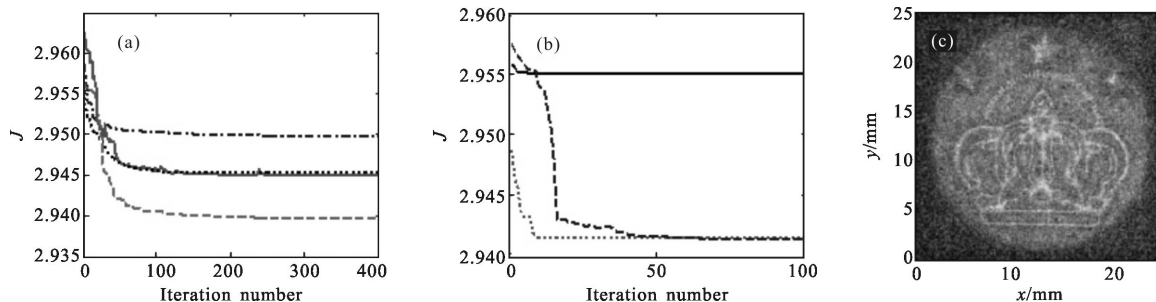
2.2 实验数据及分析

对 $T'(x,y)$ 采用图 2 所示的校正方法, 以前 40 阶 Zernike 模式系数 (不包括波前平移和倾斜) 作为迭代变量。校正前后的 5 帧目标图像的平均结果如图 6(a) 和 (b) 所示, 清晰度函数 J 的迭代过程如图 6(c) 所示。可以看出, 600 次迭代后图像质量得到明显改善, 图像清晰度指标值为 2.9347。

迭代, 校正子区域间 PTT 像差最多需要 25 次迭代, 所以整个校正过程只需 100 次迭代即可, 校正得到图像清晰度指标值为 2.9417, 与图 6(b) 的图像清晰度指标值基本相当。

从计算量的角度来看, 在校正 4 个子区域内高阶像差时, 快速傅里叶变换运算的点数为 512×512 , 而直接对 $T'(x,y)$ 采用图 2 方法进行校正时快速傅里叶变换运算的点数为 1024×1024 。所以与图 2 相比, 图 3 所示的校正技术的运算量显著减少。

从噪声的角度来看, 根据参考文献 [3,10], 探测器噪声和散斑噪声均对波前校正性能有一定的影响, 一般情况下噪声越大, 优化算法局部收敛的可能性越大。对于文中提出的这种分割校正的方法, 由于分割前后的探测器噪声没有变化, 所以其对校正性能没有显著影响。但是从散斑噪声的角度来看, 由于分割得到的各个子区域较小, 由其重构出的目标图



(a) 校正 4 个子区域内高阶像差时 J 的迭代过程 (b) 校正子区域间 PTT 像差时 J 的迭代过程 (c) 校正后的目标图像
 (a) Iterative process of metric J when high order aberrations in sub-regions are corrected (b) Iterative process of metric J when PTT aberrations among sub-regions are corrected (c) Image after correction

图 7 采用图 3 的方法校正的结果

Fig.7 Correction results with the method in Fig.3

像的散斑噪声尺度较大,进而影响校正效果。所以在实际中应该结合散斑噪声水平有效选择分割的数量。

3 结束语

针对相干光照明和空间外差探测主动成像中的波前畸变,通过数值分割,将整个孔径上的目标光复振幅分割为若干个子区域。在此基础上,首先并行校正各个子区域内的高阶像差,然后以某一子区域为参考,并行校正子区域间的波前平移和倾斜,能够有效减少优化算法的迭代模式数量和运算量,从而获得更高的校正效率。

参考文献:

[1] Richard L Espinola, Brian Teaney, Quang Nguyen, et al. Active imaging system performance model for target acquisition[C]//SPIE, 2007, 6543: 65430T.
 [2] Marron J C, Kendrick R L, Seldomridge N, et al. Atmospheric turbulence correction using digital holographic detection: experimental results[J]. *Opt Express*, 2009, 17(14): 11638–11651.
 [3] Thurman S T, Fienup J R. Phase-error correction in digital holography[J]. *J Opt Soc Am A*, 2008, 25(4): 983–994.
 [4] Chen Bo, Yang Xu, Li Xiaoyang. Wavefront correction in the active imaging system based on spatial heterodyne detection[C]//SPIE, 2015, 9622: 96221E.
 [5] Li Junchang, Song Qinghe, Picart Pascal, et al. Discussion of wavefront reconstruction algorithm of off-axis digital

holography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209008. (in Chinese)
 李俊昌, 宋庆和, Picart Pascal, 等. 离轴数字全息波前重建算法讨论[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209008.
 [6] Li Feng, Geng Chao, Li Xinyang, et al. Technical research of adaptive fiber coupler array based on SPGD algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2156–2161. (in Chinese)
 李枫, 耿超, 李新阳, 等. 基于 SPGD 算法的自适应光纤耦合器阵列技术研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2156–2161.
 [7] Ma Huimin, Zhang Jinghui, Zhang Pengfei, et al. Simulation of turbulence aberration correction based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1738–1742. (in Chinese)
 马慧敏, 张京会, 张鹏飞, 等. 基于随机并行梯度下降算法的湍流像差校正仿真 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1738–1742.
 [8] Robert Tyson. Principles of Adaptive Optics [M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011, 61.
 [9] Cresside M Harding, Rachel A Johnston, Richard G Lane. Fast simulation of a Kolmogorov phase screen[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(11): 2161–2170.
 [10] Chen Bo, Yang Jing, Yang Xu, et al. Effect of speckle noise on wavefront distortion correction in laser active imaging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1012002. (in Chinese)
 陈波, 杨靖, 杨旭, 等. 激光主动成像中散斑噪声对波前畸变校正性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1012002.