

远距离数字全息成像波前畸变校正和散斑噪声抑制

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 针对远距离数字全息成像中波前畸变和散斑噪声对成像质量的影响, 实验研究了基于图像指标优化的波前校正技术, 以及基于孔径分割的多帧图像平均散斑噪声抑制方法。建立了数字离轴全息实验装置, 针对系统自身像差, 采用梯度下降算法, 以图像清晰度为优化指标进行了波前校正实验; 在此基础上通过孔径分割, 重构出多帧散斑噪声分布各异的目标图像, 进行平均运算。结果表明, 基于图像清晰度优化的波前校正技术能够有效消除波前畸变, 提高成像分辨率; 采用基于孔径分割的多帧图像平均方法能够在一定程度上消除目标图像的散斑噪声, 获得更高的成像质量。

关键词 全息; 畸变校正; 指标优化; 散斑噪声

中图分类号 TP273.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.020902

Aberration Correction and Speckle Noise Reduction in Long Distance Digital Holography

Chen Bo¹ Yang Jing² Li Xinyang³ Yang Xu¹ Li Xiaoyang¹

¹School of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063009, China

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

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

Abstract Considering the wavefront aberration and speckle noises in long distance digital holography, the wavefront correction based on image metric optimization and speckle noise reduction based on multi-image averaging are studied, in which the multi-images are generated with aperture dividing technique. A digital off-axis holography experimental setup is established, and the wavefront aberration correction experiments are performed, in which the gradient descent algorithm is used to optimize the image sharpness metric. Multi-images with different speckle noises are reconstructed by dividing aperture into certain small parts, and average operation is performed among those multi images. The results show that the image resolution is improved effectively while the aberration is corrected with image metric optimization method, and a higher quality image is obtained after multi-images averaging.

Key words holography; aberration correction; metric optimization; speckle noise

OCIS codes 090.1995; 090.1000; 100.3010; 110.4280

1 引言

远距离数字全息成像是主动成像领域的研究热点之一, 得到了国内外多家研究机构的重视^[1-9]。早在1969年, 斯坦福大学电子学实验室的 Goodman 等^[2]就利用光电器件替代传统的全息记录材料记录全息图, 开展了远距离成像实验。这种成像系统, 波前畸变和散斑噪声是影响成像质量的主要因素。针对系统装配误差、大气湍流等引起的波前畸变, 研究人员主要研究了基于图像指标优化的数字式波前校正技术^[3-5,7-8]。研究表明, 通过校正波前畸变能够有效提高成像质量, 而且信噪比越高, 波前校正精度越高^[4]。针对散斑噪声, 主要有光学和图像处理两种抑制噪声的方法。对于光学法^[10], 如采用多角度照明目标的光学结构,

收稿日期: 2015-05-29; 收到修改稿日期: 2015-08-04; 网络出版日期: 2015-12-23

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

作者简介: 陈波(1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: chenbo182001@163.com

其目的是重构出多帧散斑噪声各异的图像,通过平均运算就能够有效降低散斑噪声。这种方法的主要不足是光学结构复杂,而且不适合对运动目标成像。对于图像处理法目前广泛采用中值滤波、小波函数处理等数字图像滤波技术^[11-12],这些方法普遍存在的问题为其性能依赖于目标特性。

本文对基于图像指标优化的波前校正技术和基于孔径分割的多帧图像平均散斑噪声抑制方法进行了实验研究。

2 远距离数字离轴全息成像模型

基于数字离轴全息的远距离成像模型如图1所示^[3-4]。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干涉信号,即全息图,数字信号处理器通过处理全息图数字重构出目标图像。

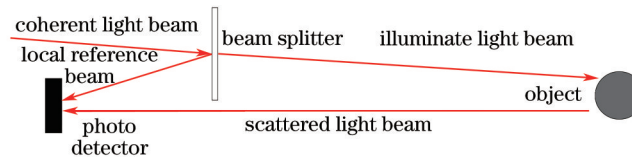


图1 基于离轴数字全息的远距离成像模型

Fig.1 Scheme of long distance imaging base on digital off-axis holography

光电探测器记录的全息图为

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

式中 $R(x,y)$ 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。

理想情况下,如果 $R(x,y)$ 为理想平面波,且与 $T(x,y)$ 即的夹角满足一定条件时^[4],对 $I(x,y)$ 进行离散逆傅里叶变换,然后对结果进行图像滤波,从中提取出 $T(x,y)$ 的频谱,最后通过傅里叶变换即可获得 $T(x,y)$ 。在此基础上,借助菲涅耳衍射逆运算等方法就能够准确获得目标所在平面光场 $t(x_i, y_i)$ 以及清晰的目标图像 $O(x_i, y_i)$ ^[13]。

在实际中,由各种因素引起的本地参考光、目标散射光的波前畸变会影响重构出的目标图像质量。假设参考光的相位畸变为 ϕ_1 , 即 $R'(x,y) = R(x,y)\exp(j\phi_1)$, 目标散射光的相位畸变为 ϕ_2 , 即 $T'(x,y) = T(x,y)\exp(j\phi_2)$, 那么采用上述方法计算出的探测面上目标散射光场为 $T''(x,y) = T(x,y)\exp[j(\phi_1 - \phi_2)]$ 。与 $T(x,y)$ 相比存在相位误差 $\phi_1 - \phi_2$, 最终导致重构出的目标图像发生畸变。

3 波前校正和散斑噪声处理方法

3.1 基于图像指标优化的波前校正方法

基于图像指标优化的波前校正技术源于天文成像自适应光学^[14]。这种波前校正技术,借助于各种优化算法,以目标图像清晰度等指标为目标函数,以波前校正器的控制信号为迭代变量,通过多次迭代使目标函数达到最优,从而完成波前畸变校正。

对于远距离数字全息成像,优化算法的迭代变量通常为一定数量的泽尼克(Zernike)多项式系数 z 。具体校正过程如图2所示。首先利用前面所述的方法,从全息图 $I(x,y)$ 中复原出目标散射光在探测平面上的光场 $T(x,y)$, 并重构出目标图像 $O(x_i, y_i)$, 在此基础上进行多次迭代式校正。每次迭代过程为首先计算 $O(x_i, y_i)$ 的指标值 J , 然后利用优化算法计算出 Zernike 多项式系数 z , 并生成对应的相位加载到 $T'(x,y)$, 重复迭代直至图像指标收敛。

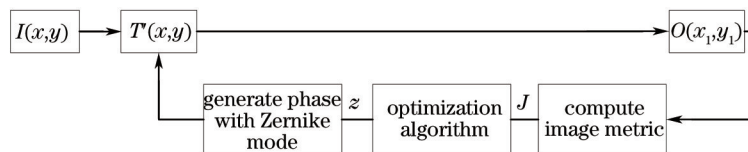


图2 基于图像指标优化的波前校正示意图

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

采用图像清晰度指标

$$J = \iint [O(x_1, y_1)]^{0.9} dx_1 dy_1 / \left[\iint O(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \right]^{0.9}, \quad (2)$$

作为优化算法的目标函数, J 越小图像清晰度越高^[14]; 采用梯度下降算法作为优化算法^[15], 迭代变量为前 4~20 阶泽尼克模式系数, 即不包含波前平移和倾斜项。梯度下降算法一次迭代的过程为^[15]: 第 $k+1$ 迭代时首先生成一个扰动向量 $\Delta z(k)$; 然后利用 Zernike 多项式产生 $z(k) + \Delta z(k)$ 对应的相位并施加到 $T'(x, y)$, 然后重构目标图像 $O(x_1, y_1)$ 并计算出图像指标值 J^* ; 接着计算 $z(k) - \Delta z(k)$ 对应的相位并施加到 $T(x, y)$, 重构目标图像 $O(x_1, y_1)$ 并计算图像指标值 J^- ; 最后按照如下所示更新泽尼克系数 z 为

$$z(k+1) = z(k) - \gamma(J^+ - J^-)\Delta z(k), \quad (k=0, 1, \dots), \quad (3)$$

式中 γ 为步长系数, $z(k)$ 为第 k 次迭代得到的模式系数。

3.2 基于孔径分割的多帧图像平均散斑噪声抑制方法

根据散斑噪声的统计特性, 对散斑噪声分布相互独立的多帧图像进行平均, 可以有效去除散斑噪声。根据散斑噪声的空间分布特性, 通过改变探测器和目标之间的相对位置, 即可改变散斑噪声的分布^[10]。换言之, 利用探测器上不同位置的全息信号复原出的目标图像, 其散斑噪声分布存在差异。因此针对一帧全息图, 可通过孔径分割的方法重构出多帧 $N+1$ 散斑噪声分布各异的目标图像, 然后通过平均运算即可降低散斑噪声, 如图 3 所示。

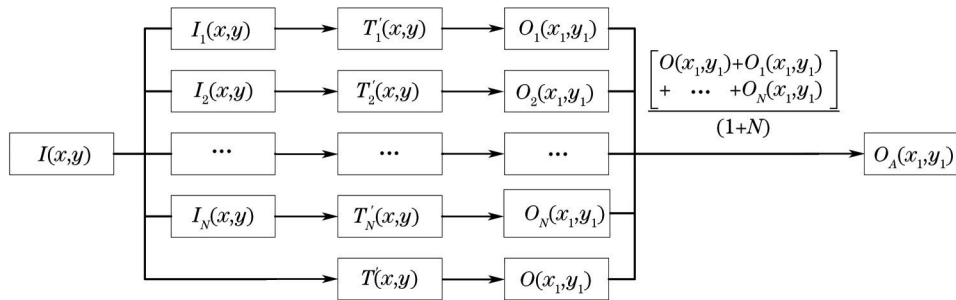


图 3 基于孔径分割的多帧散斑分布各异目标图像生成过程示意图

Fig.3 Processes of generating multi-images by dividing aperture

对于图 3 所示的过程, 根据傅里叶变换的线性性质, 可以先根据 $I(x, y)$ 复原出目标散射光在探测平面上的光场 $T'(x, y)$, 然后对 $T'(x, y)$ 再进行空间分割, 如图 4 所示, 这样可以减少运算量。

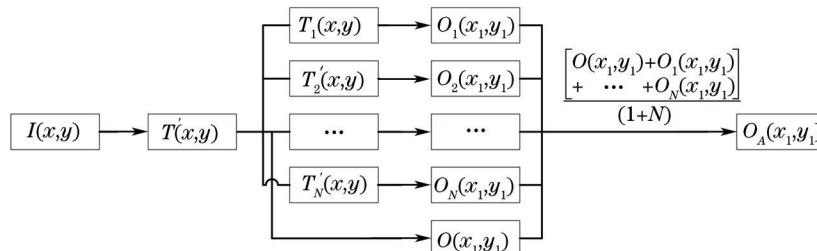


图 4 简化后的多帧散斑分布各异目标图像生成示意图

Fig.4 Simplified processes of generating multi-aim-images

4 实验分析

搭建了如图 5(a) 所示的实验装置(其中的实线条代表光路): 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 的金属币进行照明如图 5(b) 所示, CCD 相机(德国 SVS-Vistek: sv340 MTR CPC, 像素数为 480 pixel×640 pixel, 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。

CCD 记录的全息图经采集卡读入计算机, 在计算机中利用前面所述的傅里叶变换法完成目标图像重建。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 1024 pixel×1024 pixel 后进行运算, 具体过程为如图 6 所示。图 6(a) 为对 CCD 检测到的一帧干涉信号 $I(x, y)$ 补零至 1024 pixel×1024 pixel 像素; 图 6

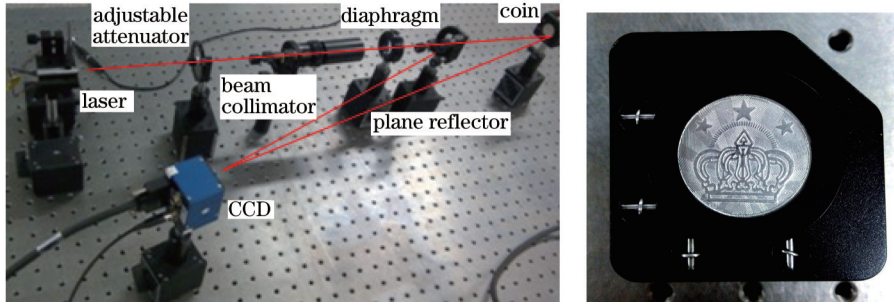


图5 (a)空间外差探测主动成像实验装置; (b) 用作目标的金属币

Fig.5 (a) Experimental setup; (b) target in experiment

(b)为对补零后的 $I(x,y)$ 进行逆傅里叶变换的结果(模值);图6(c)为从逆傅里叶变换结果中提取出目标散射光场的频谱(模值);图6(d)为对图6(c)进行傅里叶变换得到CCD平面上的目标散射光场 $T'(x,y)$ 。

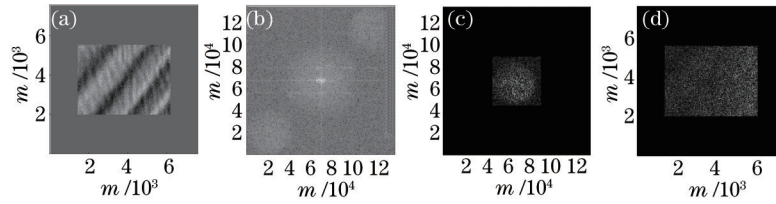


图6 目标散射光 $T'(x,y)$ 的重构过程

Fig.6 Process of reconstructing the $T'(x,y)$

针对实验系统自身误差,采用图3所示的波前校正方法进行校正,结果如图7所示。图7(a)为校正前的目标图像,即由图6(d)所示的 $T'(x,y)$ 重构出的目标图像;图7(b)为校正后的目标图像;图7(c)为校正过程中 $O(x_1,y_1)$ 的清晰度指标值 J 的迭代曲线,从校正前的2.975减小到校正后的2.946,说明校正后的目标图像质量得到提高。

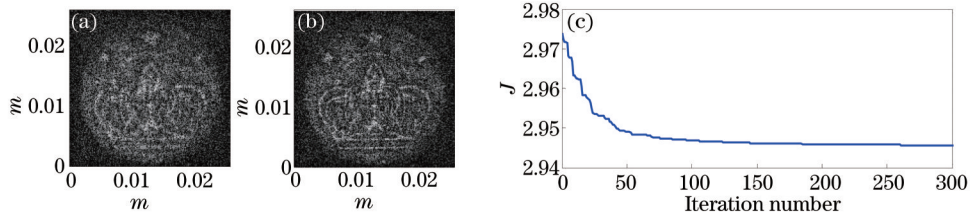


图7 (a) 校正前的目标图像; (b) 校正后的目标图像; (c) 校正过程中图像指标迭代曲线

Fig.7 (a) Image before correction; (b) image after correction; (c) evolution curve of metric J during correction process

对波前校正后的 $T'(x,y)$ 等分为左上、右上、左下、右下四部分,分别记作 $T'_1(x,y)$ 、 $T'_2(x,y)$ 、 $T'_3(x,y)$ 、 $T'_4(x,y)$,补零后按照图4方法重构出的目标图像如图8(a)~8(d)所示,分别记作 $O_1(x_1,y_1)$ 、 $O_2(x_1,y_1)$ 、 $O_3(x_1,y_1)$ 、 $O_4(x_1,y_1)$ 。对图8(a)~8(d)和图7(b)共计5帧图像进行平均得到的目标图像如图8(e)所示。

利用

$$E = \left| \nabla^2 [\text{sign}(O - \bar{O})] \right|, \tag{4}$$

式中 ∇^2 为拉普拉斯算子, sign 表示符号运算, O 为图像数据, \bar{O} 为 O 的均值,对图7(a)~7(b)和图8(e)进行边缘提取,得到的结果如图9(a)~9(c)所示。可以直观地看出,图9(c)的散斑噪声最小。

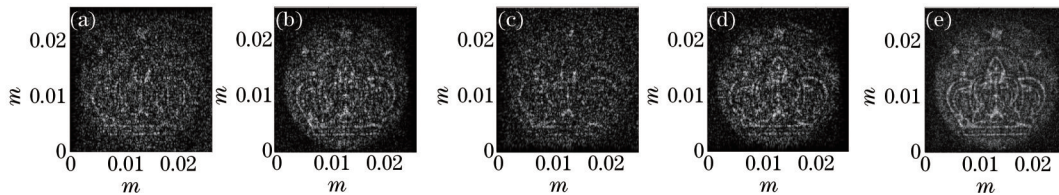


图8 (a)~(d)通过分割孔径重构出的4帧子图像; (e) 对图8(a)~(d)和图7(b)进行平均得到的目标图像

Fig.8 (a)~(d) Four sub-images that reconstructed with the method shown as Fig.4;

(e) the averaging result of Fig.8 (a)~(d) and Fig.7 (b)

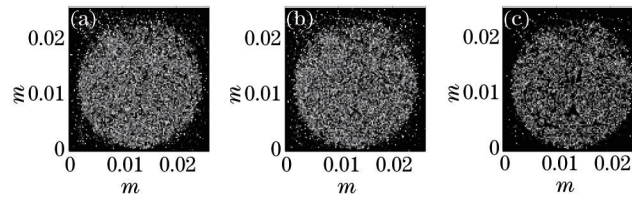


图9 (a)~(c)分别为图7 (a)~(b)和图8(e)的边沿提取结果

Fig.9 (a)~(c) Edge-maps of Fig.7 (a)~(b) and Fig.8 (e) respectively

进一步,利用

$$f_{\text{SNR}} = \frac{E(O)}{\sigma(O)}, \quad (5)$$

式中 $E(O)$ 和 $\sigma(O)$ 分别表示图像数据 O 的均值和标准差,分别计算图7(a)~(b)和图8(e)左上角 50 pixel×50 pixel 像素区域的散斑信噪比^[10],结果分别为 0.9662、0.9618 和 1.3701,定量说明基于孔径分割的多帧图像平均散斑噪声抑制方法能够在一定程度上抑制散斑噪声,提高图像质量。

5 结 论

采用梯度下降法对目标图像的清晰度函数进行迭代优化,能够有效校正远距离数字全息成像中的波前畸变,提成成像质量;在此基础上,将校正后的目标散射光场分割为几个子部分,分别利用这些子部分重构出多帧散斑噪声各异的目标图像,进行多帧图像平均,能够在一定程度上提高目标图像的信噪比。需要说明的是,由于分割后孔径变小,由其重构出的目标图像的分辨率有所降低,因此在实际中应该根据实际孔径的大小,合理选择分割的方式和数量。

此外,在低信噪比情况下,可以将波前校正和孔径分割方法结合起来,即以多帧散斑噪声图像的平均值的清晰度指标为优化目标,这将是下一步的工作。

参 考 文 献

- 1 J W Goodman, R W Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. Appl Phys Lett, 1967, 11(3): 77-79.
- 2 J W Goodman, D W Jackson, M Lehmann, *et al.*. Experiments in long-distance holographic imagery[J]. Appl Opt, 1969, 8(8): 1581-1586.
- 3 Joseph C. Marron, Richard L Kendrick. Distributed aperture active imaging[C]. SPIE, 2007, 6550: 65500A.
- 4 Thurman S T, Fienup J R. Phase-error correction in digital holography[J]. J Opt Soc Am A, 2008, 25(4): 983-994.
- 5 J C Marron, R L Kendrick, N Seldomridge, *et al.*. Atmospheric turbulence correction using digital holographic detection: experimental results[J]. Opt Express, 2009, 17(14): 11638-11651.
- 6 J W Stafford, B D Duncan, M P Dierking. Experimental demonstration of a stripmap holographic aperture lidar system[J]. Appl Opt, 2010, 49(12): 2262-2270.
- 7 David Rabb, Douglas Jameson, Andrew Stokes, *et al.*. Distributed aperture synthesis[J]. Opt Express, 2010, 18(10): 10334-10342.
- 8 Nicholas J Miller, Jeffrey J Widiker, Paul F McManamon, *et al.*. Active multi-aperture imaging through turbulence[C]. SPIE, 2012, 8395: 839504.
- 9 Venable S M, Duncan B D, Dierking M P, *et al.*. Demonstrated resolution enhancement capability of a stripmap holographic aperture lidar system[J]. Appl Opt, 2012, 51(22): 5531-5542.
- 10 Joseph W Goodman. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications[M]. Greenwood Village: Roberts & Company Publisher, 2007: 26-27, 125-135.
- 11 Wang Canjin, Sun Tao, Chen Juan. Image restoration in laser active imaging based on directional filters[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802011.
王灿进, 孙涛, 陈娟. 基于方向滤波器组的激光主动成像图像复原[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802011.
- 12 Xu Yifin, Xu Jun, Zhao Falin, *et al.*. Laser active image-denoising method based on wavelet transform[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(12): 1786-1790.
许毅玢, 徐军, 赵法林, 等. 基于小波变换的激光主动成像图像去噪方法[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(12): 1786-1790.

- 13 Li Junchang, Song Qinghe, Picart Pascal, *et al.*. Discussion of wavefront reconstruction algorithm of off-axis digital holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209008.
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.
- 14 R A Muller, A Buffington. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening [J]. J Opt Soc Am, 1974, 64(9): 1200-1210.
- 15 Chen Bo, Huang Linhai, Li Xinyang. Wavefront sensorless adaptive optics based on the gradient descent algorithm with Hadamard model[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(s1): s113001.
陈波, 黄林海, 李新阳. 基于 Hadamard 模式扰动梯度下降算法的无波前探测自适应光学[J]. 中国激光, 2013, 40(s1): s113001.

栏目编辑: 何卓铭