

激光主动成像中散斑噪声对波前畸变校正性能的影响

陈波¹ 杨靖² 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

摘要 针对激光主动成像中的波前畸变和散斑噪声,分析了散斑噪声对基于图像指标优化的波前校正性能影响。通过仿真不同散斑噪声水平下图像清晰度指标值随波前均方根值的变化趋势,研究了散斑噪声对波前校正性能的影响。在此基础上,通过开展大气湍流波前畸变闭环校正数值仿真,对分析结果进行了验证。研究表明:随着散斑噪声的增大,图像清晰度指标随波前均方根(RMS)值的单调性和线性度明显变差,尤其是在RMS小于1 rad范围内,导致收敛速度和最终的校正精度变差;当散斑噪声较大时,随着波前畸变的增大,散斑噪声对校正性能的影响也越大。

关键词 自适应光学; 主动成像; 波前校正; 散斑噪声; 指标优化

中图分类号 TP273+.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1012002

Effect of Speckle Noise on Wavefront Distortion Correction in Laser Active Imaging

Chen Bo¹ Yang Jing² Yang Xu¹ Li Xiaoyang¹

¹College 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

Abstract Considering the wavefront aberration and speckle noise in laser active imaging, the influence of speckle noise on wavefront correction based on image metric optimization is discussed. The effect of speckle noise on wavefront correction is researched by simulating the trends of image sharpness value with the root-mean-square (RMS) value of wavefront under different speckle noise level. Based on that, conclusions are verified by the numerical simulation of atmospheric turbulence wavefront close-loop correction. The results show that, with the increase of speckle noise, the monotonicity and linearity between image sharpness metric and the wavefront RMS value are significantly worse, especially while the RMS value is less than 1 rad, so that the convergence speed and the final accuracy are deteriorated. Moreover, when the speckle noise is large, with the increase of wavefront distortion, the effect of speckle noise on the correction performance is much more remarkable.

Key words adaptive optics; active imaging; wavefront correction; speckle noise; metric optimization

OCIS codes 010.1080; 010.1285; 110.1080; 030.6140

1 引 言

激光主动成像系统利用激光器作为光源对目标进行照明,然后由接收装置探测目标反射光并进行成像。与被动成像相比,主动成像方式不受环境光的限制,具有成像距离远等特点,尤其适用于微光、夜视等环境下的目标成像^[1-2]。在实际应用中,由于受到系统装配误差、大气湍流等引起的波前畸变的影响,成像分辨率降低^[3-5]。此外,由激光的相干性而引起的散斑噪声也会严重影响成像分辨率^[6-8]。针对波前畸变,国内外研究人员研究了基于图像指标优化的波前校正技术^[3-5];针对散斑噪声研究了多样性图像平均^[6]、数字图像滤波技术^[7-8],但是在散斑噪声对波前校正性能的影响方面研究较少,而这一点关系着优化算法的实施方法,

收稿日期: 2015-04-16; 收到修改稿日期: 2015-05-15

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

作者简介: 陈波(1984—),男,博士,讲师,主要从事自适应光学、最优化控制技术等方面的研究。

E-mail: chenbo182001@163.com

即在波前校正过程中,是否需要采取一定的措施抑制散斑噪声。

为此本文结合散斑噪声的统计特性,通过数值仿真研究了不同散斑噪声水平下基于目标优化的波前校正速度和精度。

2 激光主动成像及波前校正模型

利用激光对目标进行照明,光学成像系统利用目标的反射光或散射光进行成像。根据相干成像原理,像平面上的光波复振幅 $U_i(u,v)$ 是目标几何光学像 $U_g(u,v)$ 和成像系统脉冲响应 $h(u,v)$ 的卷积^[9],即

$$U_i(u,v) = U_g(u,v) \otimes h(u,v). \quad (1)$$

目标散射光在大气等不均匀介质中传播时会产生波前畸变,因此需要借助自适应光学系统进行波前校正,以提高成像质量。基于无波前探测自适应光学的主动成像框图如图1所示。接收系统收集目标散射光,成像系统中的光电探测器记录目标图像,控制器计算图像的指标值,并采用一定的迭代算法,以波前校正器的控制信号为迭代变量,通过多次迭代,使得图像指标趋于最优,从而完成波前校正。

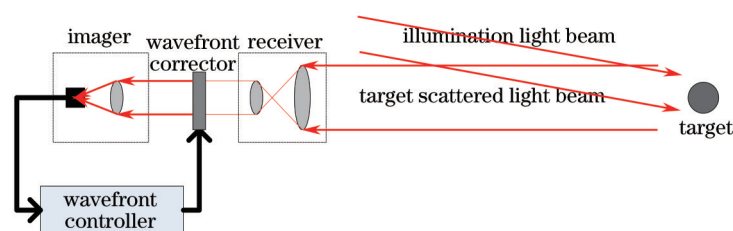


图1 基于无波前探测自适应光学的主动成像示意图

Fig.1 Diagram of active imaging based on wavefront sensorless adaptive optics

3 数值仿真模型

目标几何光学像 $U_g(u,v)$ 的仿真过程为采用如图2所示的 USA F1951 灰度图作为漫反射目标,采样点数为 256×256 ,取其灰度值的平方根 $\sqrt{g(u,v)}$ 作为 $U_g(u,v)$ 的振幅,随机产生大小在 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布的 $r(u,v)$ 作为 $U_g(u,v)$ 的相位,即

$$U_g(u,v) = \sqrt{g(u,v)} \exp[jr(u,v)]. \quad (2)$$

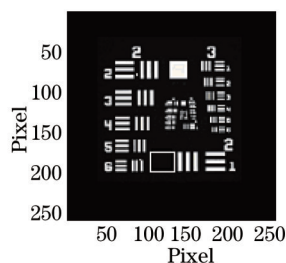


图2 USA F1951 灰度图

Fig.2 Gray value image of USA F1951

利用 Harding 等^[10]的方法产生大气湍流相位屏 $\varphi(x,y)$,其中湍流外尺度为 100 m,内尺度为 0.01 m,采样点数为 256×256 。仿真中通过改变 D/r_0 来获得不同程度的相位畸变。然后利用傅里叶变换(FT)计算成像系统的脉冲响应 $h(u,v)$,即

$$h(u,v) = \mathcal{F} \left\{ p(x,y) \exp[j\varphi(x,y)] \right\}, \quad (3)$$

式中 $p(x,y)$ 为半径归一化的圆形孔径函数。

在此基础上,采用(1)式计算出像平面复振幅 $U_i(u,v)$,对应的像面强度分布为

$$I(u,v) = |U_i(u,v)|^2. \quad (4)$$

无波前探测自适应光学系统采用的波前校正器为 61 单元连续表面压电变形镜(DM)。变形镜引入的补

偿相位为

$$\Phi(x,y) = \sum_{j=1}^{61} u_j V_j(x,y), \quad (5)$$

式中 u_j 表示变形镜第 j 个驱动器上的控制信号, $V_j(x,y)$ 为第 j 个驱动器的响应函数^[11],

$$V_j(x,y) = \exp \{ \ln(w) [\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} / d]^a \}, \quad (6)$$

其中, (x_i, y_i) 表示第 j 个驱动器的位置, w 为驱动器间的耦合系数, a 为高斯指数, d 为驱动器中心间距。仿真中对变形镜的通过口径进行归一化, 61 单元变形镜的驱动器排布如图 3 所示, $d=0.286$, $w=0.08$, $a=2$ 。

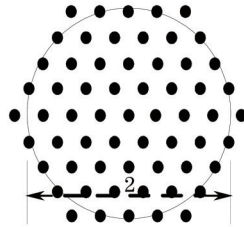


图 3 61 单元变形镜的驱动器排布

Fig.3 Actuators distribution of 61-element DM

波前控制器根据成像系统的图像强度值 $I(u,v)$ 计算的指标值 J , 并采用文献提出的并行扰动梯度下降算法^[12], 以波前校正器的控制信号 u_j 为迭代变量, 通过多次迭代使得图像指标趋于最优。仿真中采用如下像清晰度指标^[5,13]:

$$J = \sum I(u,v)^\beta / \left[\sum I(u,v) \right]^\beta. \quad (7)$$

考虑到相干成像中的散斑噪声对图像对比度的影响^[5,14], 避免过校正以及方便选择梯度下降算法迭代步长参数^[15], 令 $\beta=0.9$, 这时 J 越小表示图像清晰度越高。

控制信号 \mathbf{u} 的迭代过程: 第 $k+1$ 次迭代时, 首先产生一个扰动向量 $\Delta \mathbf{u}^{(k)}$ ^[12], 然后将 $\mathbf{u}^{(k)} + \Delta \mathbf{u}^{(k)}$ 信号加载到变形镜上, 计算图像强度值 $I(u,v)$ 即对应的指标值 J^+ , 接着将 $\mathbf{u}^{(k)} - \Delta \mathbf{u}^{(k)}$ 信号加载到变形镜上, 计算图像强度值 $I(u,v)$ 即对应的指标值 J^- , 最后更新变形镜校正信号

$$\mathbf{u}^{(k+1)} = \mathbf{u}^{(k)} - \gamma \Delta \mathbf{u}^{(k)} (J^+ - J^-), \quad k=0,1,2,\dots, \quad (8)$$

式中 $\mathbf{u}^{(k+1)}$ 为第 $k+1$ 次迭代后的控制信号, $\mathbf{u}^{(k)}$ 为第 k 次迭代后的控制信号, γ 为调节迭代步长的常数。根据(7)式所示的指标值的特性, γ 取负数, 即指标值 J 向最小值方向优化。仿真过程中 $\gamma=200$; 扰动向量 $\Delta \mathbf{u}^{(k)}$ 的幅度为 0.2。

4 仿真分析

4.1 不同散斑信噪比的目标图像 $I(x,y)$ 仿真

使用散斑信噪比(SNR, R_{SN})评价目标图像散斑噪声的大小^[6]:

$$R_{SN} = E(O) / \sigma(O), \quad (9)$$

式中 O 表示散斑图像, $E(O)$ 为其均值, $\sigma(O)$ 为其标准差。根据散斑噪声的统计特性, 对 N 帧独立分布、强度相等的完全散射散斑噪声图像进行平均, 其 R_{SN} 可以提高 \sqrt{N} 倍^[5,16]。在实际中, 通过改变激光的照明角度等方法就能够获得散斑噪声分布各异的目标图像。仿真中, 通过随机生成 $U_k(u,v)$ 的相位 $r(u,v)$ 来获得散斑噪声分布各异的目标图像 $I(u,v)$, 然后采用 $I(u,v)$ 中像素范围为 171~190 行和 111~130 列对应的区域作为 O 来计算目标图像的 R_{SN} , 如图 2 所示, 该区域可看作是完全散射散斑图像。

$D/r_0 = 10$ 时随机生成一帧相位屏 $\varphi(x,y)$, 计算出成像系统的脉冲响应 $h(u,v)$ 。然后随机生成 30 组 $r(u,v)$, 计算出对应的 30 帧散斑噪声分布各异的目标图像 $I(u,v)$, 再分析其中 N 帧图像平均值的 R_{SN} , 结果如图 4 所示。可以看出, 仿真结果与理论结果基本一致, 即随着帧数 N 的增加, 平均值的 R_{SN} 以 \sqrt{N} 的倍率提高, 因此通过改变帧数 N 就能够获得不同散斑信噪比的目标图像。图 5 为 $N=1, 5, 10, 15$ 时的平均图像, 可以

看出随着帧数 N 的增加,平均图像的散斑噪声越小,与图 4 结果一致。根据文献[4],当 N 趋近于无穷大时,散斑噪声趋近于 0,因此多样性迭加是抑制散斑噪声的有效方法。

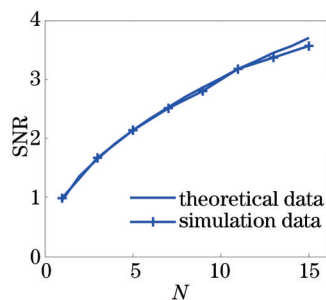


图 4 N 帧图像平均值的 SNR

Fig.4 SNR of the average result of N -frame images

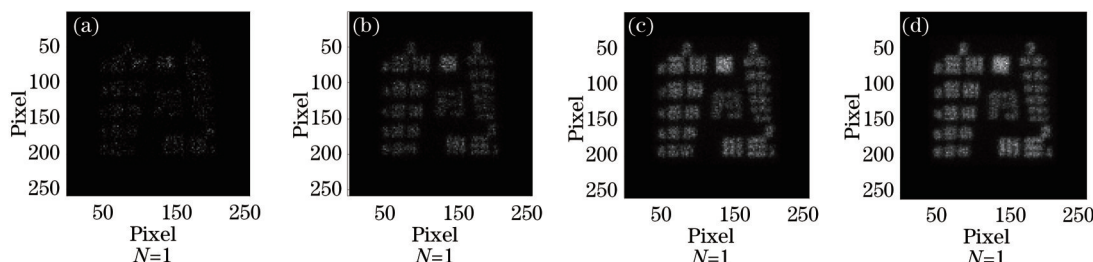


图 5 $N=1,5,10,15$ 时的平均图像

Fig.5 Average results of N -frame images with $N=1,5,10,15$

4.2 散斑噪声对波前校正性能的影响

对于基于指标优化的波前校正技术,图像指标 J 必须具有良好的单调性,即随着波前误差均方根(RMS)值的减小而单调变化^[15]。在此基础上,图像指标与波前误差的 RMS 之间的线性度越好,意味着指标的动态特性越好,那么算法的收敛速度就越快,波前校正精度越高。因此,对于(7)式所示的清晰度指标,通过分析不同散斑噪声水平下指标值 J 随波前 RMS 的变化趋势,就能够得到散斑噪声对波前校正性能的影响。仿真中,通过改变 D/r_0 的大小随机生成 RMS 各异的湍流相位屏;通过对 N 帧散斑各异的目标图像取平均然后计算指标值,得到不同散斑噪声水平下的 J 。

$N=1, 5, 10$ 时的 1 次实验的结果如图 6(a)所示,可以看出, $N=1, 5, 10$ 时指标 J 在整体趋势上随着波前 RMS 的减小而单调减小;随着 N 的减小,指标 J 的局部起伏明显增大,即单调性变差,尤其是当 $N=1$ 时在 RMS 小于 1 rad 范围内指标 J 与 RMS 间的线性度显著降低。为了进一步分析由散斑噪声导致 J 的局部起伏大小,重复了 50 次实验,得到的指标的平均值 $E(J)$ 和标准差 $\sigma(J)$ 分别如图 6(b)、(c)所示。从图 6(b)可以进一步看出, J 在整体趋势上随着波前 RMS 的减小而单调减小,而且随着 N 的减小 J 与波前相位误差 RMS 之间的线性度变差,尤其是在 RMS 小于 1 rad 范围内。从图 6(c)可以看出,随着 N 的减小 $\sigma(J)$ 的起伏显著增大;当 $N=1$ 时在 RMS 小于 1 rad 范围内,随着波前 RMS 的增大 $\sigma(J)$ 有增大的趋势。

结合图 4 和图 6 得出: 1) 基于该指标的波前校正是可行的; 2) 随着散斑噪声的增大,指标 J 随 RMS 的单调性和线性度明显变差,尤其是在 RMS 小于 1 rad 范围内,因此算法的收敛速度和最终的校正精度也会变差; 3) 当散斑噪声较大时,随着波前畸变的增大,散斑噪声对校正性能的影响可能越大。

为了验证上述结论,在湍流强度分别为 $D/r_0 = 5$ 、 $D/r_0 = 10$ 、 $D/r_0 = 15$ 条件下各随机生成一帧相位屏,然后利用 1、5、10 帧图像的平均值来计算图像指标 J 并进行优化(即 $N=1, 5, 10$)。通过对比校正过程中残余波前的 RMS 值的迭代情况,验证了上述散斑噪声对波前校正性能影响的分析结果。

图 7、8、9 分别为 $D/r_0 = 5$ 、 $D/r_0 = 10$ 、 $D/r_0 = 15$ 时的仿真结果,其中图(a)~(c)中的图像为校正前目标图像,图(d)~(f)为校正后的目标图像,(g)为指标 J 的迭代过程,(h)为校正过程中残余波前的 RMS。从图 7~9 可以看出,随着 N 的增加,散斑噪声得到明显抑制;校正后图像质量明显提高,且 N 越小校正效果越差。

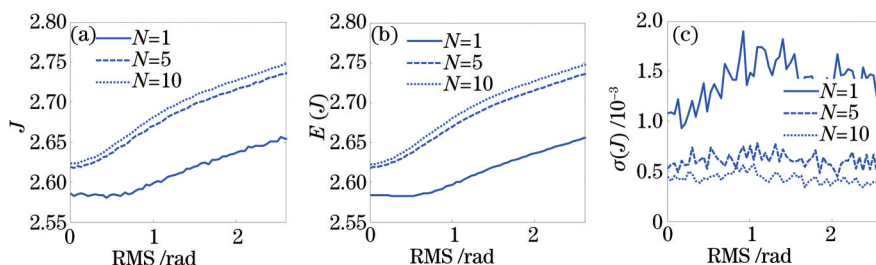


图6 N 取不同值时 J 随波前RMS的变化趋势。(a) 1次仿真结果; (b) 50次仿真的平均结果; (c) 50次仿真得到的 J 的标准差
Fig.6 Trends of image sharpness value with the RMS of wavefront. (a) Result of one simulation; (b) averaged result of 50 simulations; (c) standard deviation of J in 50 simulations

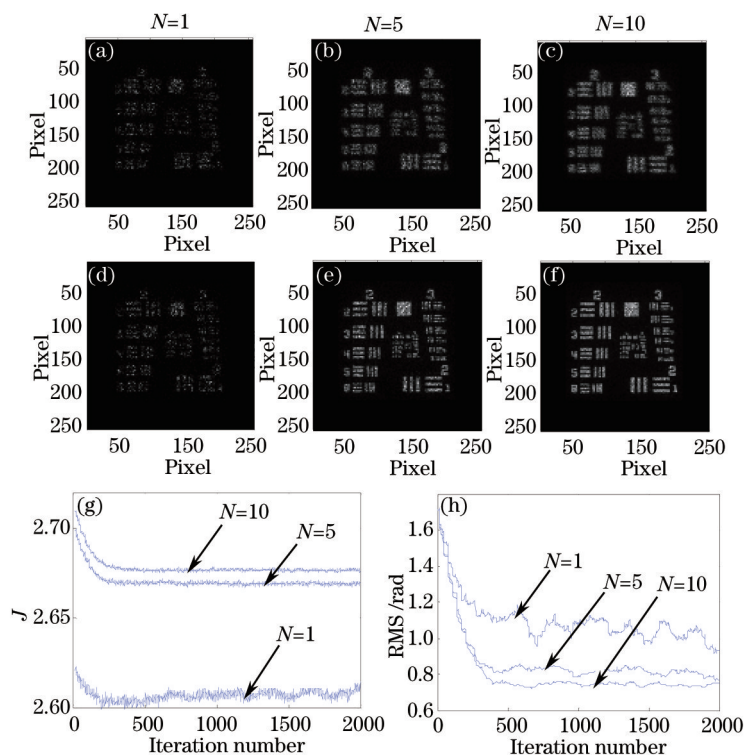


图7 $D/r_0 = 5$ 时的闭环校正结果。(a)~(c) 校正前目标图像; (d)~(f) 校正后的目标图像;
(g)和(h) J 和参与波前RMS的迭代曲线

Fig.7 Results of close-loop correction when $D/r_0 = 5$. (a)~(c) Images before correction; (d)~(f) images after correction;
(g) and (h) curves of J and residual wavefront RMS

图10为 $D/r_0 = 5$ 、 $D/r_0 = 10$ 、 $D/r_0 = 15$ ，2000次迭代后的残余波前RMS值。 $D/r_0 = 5$ 、 $N=1, 5, 10$ 时校正后的RMS分别为0.9308、0.7664、0.75；当 $D/r_0 = 10$ 、 $N=1, 5, 10$ 时校正后的RMS值分别为2.1204、1.6409、1.6260；当 $D/r_0 = 15$ 、 $N=1, 5, 10$ 时校正后的RMS值分别为2.9983、1.8479、1.8418。可以看出，当散斑噪声较大时，随着 D/r_0 的增大，散斑噪声对校正性能的影响越大。

5 结 论

在激光主动成像中，波前畸变和散斑噪声会严重影响成像分辨率。通过分析不同散斑噪声水平下指标值 J 随波前RMS的变化趋势，研究了散斑噪声对波前校正性能的影响，并通过数值仿真加以验证。结果表明：1) 基于该指标的波前校正是可行的；2) 随着散斑噪声的增大，指标 J 随RMS的单调性和线性度明显变差，尤其是在RMS小于1 rad范围内，导致算法的收敛速度和精度变差；3) 当散斑噪声较大时，随着波前畸变的增大，散斑噪声对校正性能的影响越大。因此对于主动成像、数字全息等存在散斑噪声的场合，在波前校正过程中应当采取一定的散斑抑制措施，以提高波前校正效率。

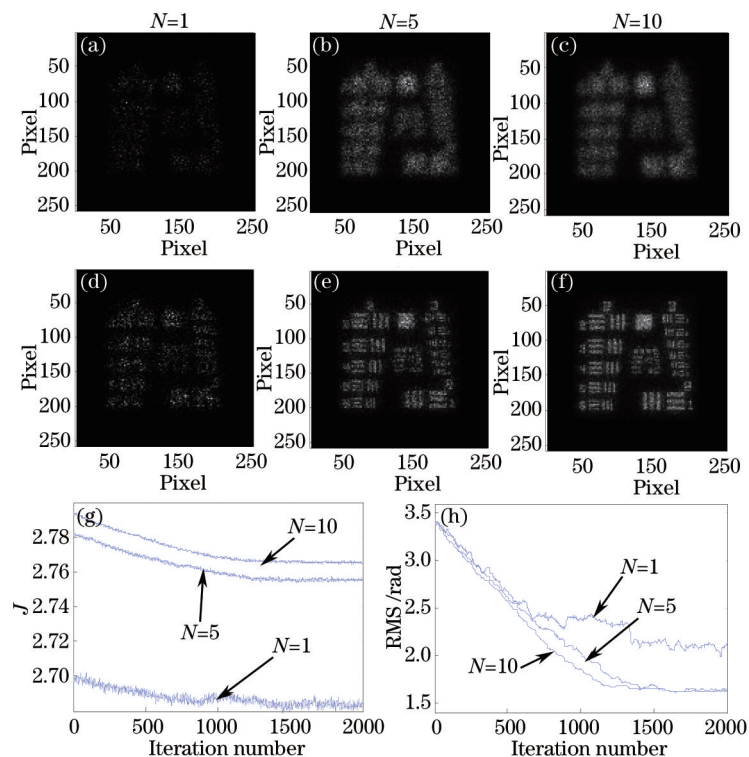


图8 $D/r_0 = 10$ 时的闭环校正结果。(a)~(c) 校正前目标图像;(d)~(f) 校正后的目标图像;
(g)和(h) J 和参与波前 RMS 的迭代曲线

Fig.8 Results of close-loop correction when $D/r_0 = 10$. (a)~(c) Images before correction; (d)~(f) images after correction;
(g) and (h) curves of J and residual wavefront RMS

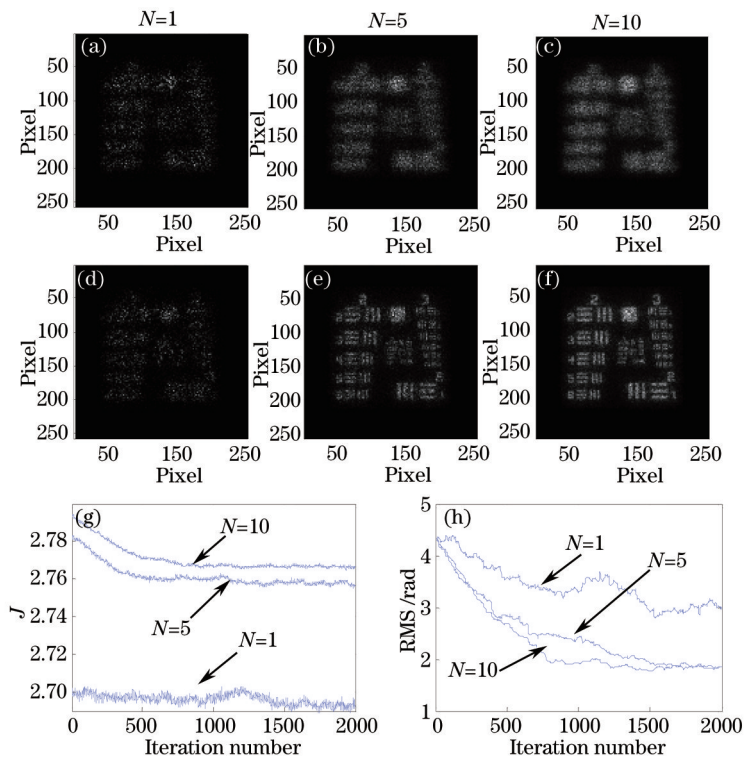
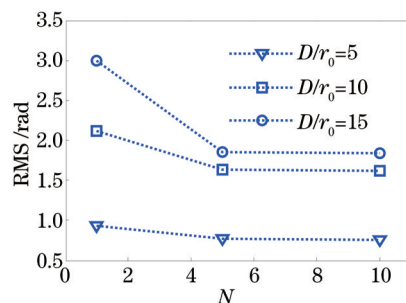


图9 $D/r_0 = 15$ 时的闭环校正结果。(a)~(c) 校正前目标图像;(d)~(f) 校正后的目标图像;
(g)和(h) J 和参与波前 RMS 的迭代曲线

Fig.9 Results of close-loop correction when $D/r_0 = 15$. (a)~(c) Images before correction; (d)~(f) images after correction;
(g) and (h) curves of J and residual wavefront RMS

图10 $D/r_0 = 5, 10, 15$ 时 2000 次迭代后的残余波前 RMS 值Fig.10 RMS of residual wavefront after 2000 iterations when $D/r_0 = 5, 10, 15$

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 Guo Huichao, Sun Huayan, Fan Youchen. Development status of range-gated laser active imaging technology under atmospheric condition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100004.
郭惠超, 孙华燕, 范有臣. 大气条件下距离选通激光主动成像技术发展现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 100004.
- 3 V I Polejaev, M A Vorontsov. Adaptive active imaging system based on radiation focusing for extended targets[C]. SPIE, 1997, 3126: 216-220.
- 4 R G Paxman, J C Marron. Aberration correction of speckled imagery with an image sharpness criterion[C]. SPIE, 1988, 0976: 37-47.
- 5 J R Fienup, J J Miller. Aberration correction by maximizing generalized sharpness metrics[J]. J Opt Soc Am A, 2003, 20(4): 609-620.
- 6 Joseph W Goodman. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications[M]. Greenwood Village: Roberts & Company Publisher, 2007.
- 7 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.
- 8 Dong Jihui, Hu Qiquan, Sun Dongsong. Techniques of depressing image noise in laser imaging tracking system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0109002.
董吉辉, 胡企铨, 孙东松. 空间激光成像跟踪系统中的图像噪声抑制技术[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0109002.
- 9 Joseph W Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. 3rd edition. Greenwood Village: Roberts & Company Publisher, 2005.
- 10 Cresside M Harding, Rachel A Johnston, Richard G Lane. Fast simulation of a Kolmogorov phase screen[J]. Appl Opt, 1999, 38(11): 2161-2170.
- 11 W H Jiang, N Ling, X J Rao, *et al.*. Fitting capability of deformable mirror[C]. SPIE, 1991, 1542: 130-137.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 Wang Canjin, Sun Tao, Wang Rui, *et al.*. Speckle noise suppression for laser active imaging based on spectrum-domain constrain in signal subspace[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1109001.
王灿进, 孙涛, 王锐, 等. 基于信号子空间谱域约束的激光主动成像散斑噪声去除[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1109001.
- 15 Chen Bo, Yang Huizhen, Zhang Jinbao, *et al.*. Performances index and convergence speed of parallel gradient descent algorithm in adaptive optics of point source[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1143-1148.
陈波, 杨慧珍, 张金宝, 等. 点目标成像自适应光学随机并行梯度下降算法性能指标与收敛速度[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1143-1148.
- 16 Cai Xiao'ou, Ni Xiaojing. Study on reduction of speckle noise in reconstructed image of digital hologram[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 050901.
蔡晓鸥, 倪小静. 数字全息再现像散斑噪声消除的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 050901.