

文章编号: 0258-7025(2010)11-2813-08

基于离焦光栅的最小二乘波前复原算法

李 斐^{1,2,3} 饶长辉^{2,3}

¹国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073
²中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209
³中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

摘要 基于离焦光栅的波前传感器具有全光学测量、光路简单、使用方便和受机械振动影响小等优点,在波前传感领域有着巨大的应用潜力。然而传统基于离焦光栅的波前复原算法仅适用于点目标的场合,对扩展目标的波前无能为力。为了扩展该技术的应用领域,提出一种基于离焦光栅的最小二乘波前复原算法,该算法不仅适用于点目标的波前复原,而且适用于扩展目标的波前复原与目标像的重建。给出了波前复原过程的数值仿真,在理想情况下,复原结果的均方根误差为 0.18%。另外分析了影响复原精度的主要因素,并与传统算法进行对比分析。结果表明,新算法能够准确地对点目标和扩展目标进行波前复原。

关键词 光计算;波前复原;扩展目标;最小二乘算法;离焦光栅

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103711.2813

Least Square Phase Retrieval Algorithm Based on Defocusing Grating

Li Fei^{1,2,3} Rao Changhui^{2,3}

¹College of Opto-Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
²Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract The wavefront sensor based on defocusing grating has a great potential in the field of wavefront sensing, which attributes to many advantages such as fully optical measurement, simple configuration, ease to use, insensitivity to vibration and so on. However, traditional algorithms are suitable for point target and scarcely for extended object. To widen the application of this technology, a least square phase retrieval algorithm is proposed, which is suitable not only for point target but also for extended target, and the object can be restored simultaneously. Numerical simulations of phase retrieval using the proposed method demonstrate that the root mean square error is 0.18% without the consideration of noise. Additionally, the main factors which affect the retrieval accuracy are analyzed and some comparisons with traditional algorithms are carried out. Results show that the least square phase retrieval algorithm can accurately retrieve the wave-front of a point target or an extended target.

Key words optics in computing; phase retrieval; extended object; least square algorithm; defocus grating

1 引 言

大气湍流等因素会使入射光束的波前发生畸变,从而大大降低地基天文望远镜的成像质量。因此,如何准确地探测入射光束的波前畸变,成为一个重要的课题。目前,比较成熟的波前传感器种类很多,包括剪切干涉仪^[1~3]和哈特曼-夏克传感器^[4~6]

等。其中剪切干涉仪测量精度较高,但光路复杂;夏克-哈特曼传感器结构简单,光能利用率高,但空间分辨力低。

2000年,Blanchard等^[7]发明了基于离焦光栅的波前复原技术,该技术具有全光学测量、光路简单、受机械振动影响小、使用方便等优点。在国内,

收稿日期: 2010-02-01; 收到修改稿日期: 2010-04-23

作者简介: 李 斐(1983—),男,博士研究生,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: sdlifei2008@163.com

导师简介: 饶长辉(1971—),男,博士,研究员,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn

国防科学技术大学^[8,9]、中国科学院上海光学精密机械研究所^[10]和军械工程学院^[11,12]等也对基于离焦光栅的波前复原技术进行了研究,利用盖斯贝格-撒克斯通(G-S)算法或光强传递方程(ITE)算法求得波前分布,得了较好的效果。然而这两种算法均是在入射光强均匀的前提下实现的,只能用于点目标的波前复原。本文提出一种基于离焦光栅的最小二乘算法,以实现扩展目标的波前复原与目标像的重建,该方法不仅拥有传统算法的上述优势,同时也扩展了传统算法的应用范围。

2 算法的基本原理

2.1 最小二乘波前复原算法

基于离焦光栅的波前传感系统光路简单,易于

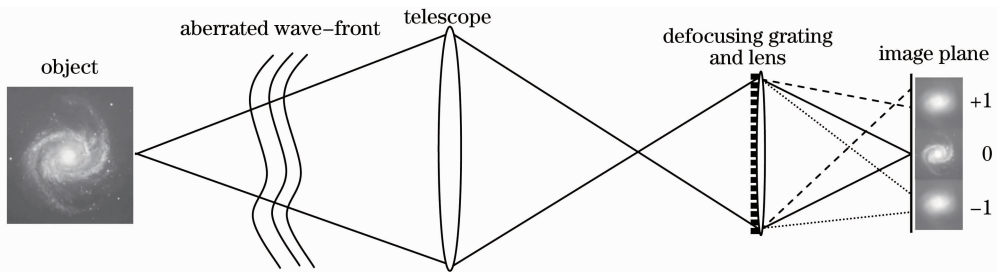


图1 基于离焦光栅的波前传感系统图像采集过程示意图

Fig. 1 Image-collection procedure of defocusing grating-based wave-front sensor

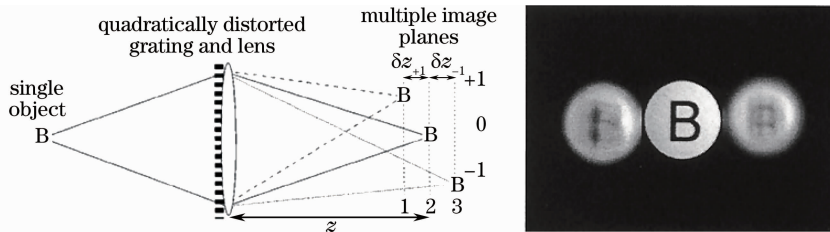


图2 离焦光栅的成像特性

Fig. 2 Imaging with a defocusing grating-lens combination

根据成像理论,当目标位于等晕区内时,由大气和望远镜组成的综合系统可以看作一个线性空不变系统,成像过程可以表示为目标与成像系统点扩展函数的卷积^[14~17]。当受加性噪声干扰时,探测器上光栅 ± 1 级衍射光的光强分布分别为

$$\begin{cases} d_{+1}(x, y) = o(x, y) * h_{+1}(x, y) + n_{+1}(x, y) \\ d_{-1}(x, y) = o(x, y) * h_{-1}(x, y) + n_{-1}(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $o(x, y)$ 是目标的光强分布函数, $n_{+1}(x, y)$, $n_{-1}(x, y)$ 分别是两个光学通道的噪声分布, $h_{+1}(x, y)$, $h_{-1}(x, y)$ 分别是 ± 1 级两个光学通道的点扩展函数,可表示为

$$h_{+1}(x, y) = |\mathcal{F}^{-1}\{P_{+1}(u, v)\}|^2,$$

实现。在传统的望远镜系统中加入一个离焦光栅和一个短焦透镜即可,如图1所示。

用于波前复原的离焦光栅实质上是一个离轴的二元相位菲涅耳波带片,一方面,它具有普通光栅的分光作用,将入射光在光栅的不同衍射级上分束;另一方面,它具有菲涅耳波带片的透镜作用,在不同的衍射级上引入不同的透镜效应。该光栅与短焦距透镜密接使用时,短焦距透镜提供主要的聚焦能力,在 ± 1 级衍射光轴上,离焦光栅对透镜聚焦能力进行微调,使得 ± 1 级衍射光有不同的焦距,分别稍短于和稍长于透镜焦距。短焦距透镜的焦平面在 ± 1 级衍射光上的截面是前后对称的离焦面,因此离焦光栅能够使同一个物体成像在不同的像平面^[13],如图2所示。

$$h_{-1}(x, y) = |\mathcal{F}^{-1}\{P_{-1}(u, v)\}|^2, \quad (2)$$

式中 \mathcal{F}^{-1} 表示傅里叶逆变换, $P_{+1}(u, v)$ 和 $P_{-1}(u, v)$ 分别为两光学通道上的广义光瞳函数,可表示为

$$\begin{cases} P_{+1}(u, v) = A(u, v) \exp\{i[\varphi(u, v) + \varphi_{+1}(u, v)]\} \\ P_{-1}(u, v) = A(u, v) \exp\{i[\varphi(u, v) + \varphi_{-1}(u, v)]\} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\varphi(u, v)$ 是未知的波前畸变, $A(u, v)$ 为孔径函数。 $\varphi_{+1}(u, v)$, $\varphi_{-1}(u, v)$ 分别是 $+1$ 和 -1 级衍射光上的附加相位,可表示为

$$\begin{cases} \varphi_{+1}(u, v) = +\frac{2\pi W_{20}}{\lambda R^2}(u^2 + v^2) \\ \varphi_{-1}(u, v) = -\frac{2\pi W_{20}}{\lambda R^2}(u^2 + v^2) \end{cases}, \quad (4)$$

式中离焦参数 W_{20} 是表示光栅离焦能力的量, 等价于 +1 级衍射光上附加的光程。不同离焦水平的光栅如图 3 所示^[13], 当 W_{20} 增大时, 光栅狭缝的曲率也相应增加。 R 是光栅孔径的半径, d_0 是光栅的周期, λ 是入射光的波长。

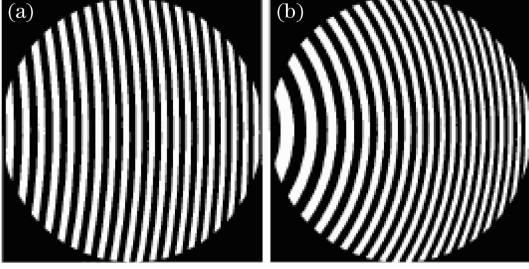


图 3 离焦光栅示意图 $R = 20d_0$, (a) $W_{20} = 1\lambda$,
(b) $W_{20} = 3\lambda$

Fig. 3 Defocusing gratings with $R = 20d_0$,

(a) $W_{20} = 1\lambda$, (b) $W_{20} = 3\lambda$

为确定探测器实测光强与估算光强逼近程度的最小二乘估计, 定义一个目标函数

$$E = \sum_{k=\pm 1} \sum_{x,y} |d_k(x,y) - \hat{o}(x,y) * \hat{h}_k(x,y)|^2, \quad (5)$$

式中上标符号 $\hat{\cdot}$ 表示估计量。根据帕斯瓦尔定理和卷积定理, (5) 式可表示为

$$E = \sum_{k=\pm 1} \sum_{u,v} |D_k(u,v) - \hat{O}(u,v) \hat{H}_k(u,v)|^2, \quad (6)$$

式中 $D(u,v)$, $\hat{O}(u,v)$ 和 $\hat{H}(u,v)$ 分别是 $d(x,y)$, $\hat{o}(x,y)$ 和 $\hat{h}(x,y)$ 的离散傅里叶变换。

令 $\partial E / \partial \hat{O} = 0$, 得

$$\hat{O}(u,v) = \frac{D_{+1}(u,v) \hat{H}_{+1}^*(u,v) - D_{-1}(u,v) \hat{H}_{-1}^*(u,v)}{|\hat{H}_{+1}(u,v)|^2 + |\hat{H}_{-1}(u,v)|^2}. \quad (7)$$

代入(6)式得

$$E = \sum_{u,v} \frac{|D_{+1}(u,v) \hat{H}_{-1}(u,v) - D_{-1}(u,v) \hat{H}_{+1}(u,v)|^2}{|\hat{H}_{+1}(u,v)|^2 + |\hat{H}_{-1}(u,v)|^2}. \quad (8)$$

由(8)式可以看出, E 是一个只依赖于相位的函数, 它并不依赖于观测目标, 因此可用于扩展目标的波前复原。采用最优化算法寻找使目标函数最小化的解, 即可求得波前分布, 而且可利用(7)式重建目标像。

2.2 目标函数的求解

Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) 方法因为其稳定的数值效果和快速收敛性, 而被公认为是求解无约束优化问题中最为有效的方法之一。

后来, 人们又提出了有限内存 BFGS(L-BFGS) 方法^[18], 能够减少存储量、提高计算效率, 非常适合求解大规模无约束优化问题。因此利用 L-BFGS 方法寻找使目标函数最小化的解, 其步骤如下:

1) 给定初始相位 φ_0 (文中取 $\varphi_0 = 0$), 初始对称正定矩阵 \mathbf{H}_0 (文中取为 \mathbf{H}_0 为单位矩阵 \mathbf{I}), 非负整数 m , 误差限 $\varepsilon > 0, k = 0$;

2) 若 $\|\mathbf{g}_k\| \leq \varepsilon$, 则算法终止; 否则, 令 $\mathbf{d}_k = -\mathbf{H}_k \mathbf{g}_k$;

3) 利用一维搜索确定步长 $\alpha_k > 0$, 使之满足 Wolfe-Power 条件, 令 $\varphi_{k+1} = \varphi_k + \alpha_k \mathbf{d}_k$;

4) 令 $\hat{m} = \min\{k + 1, m\}$, 取 $\mathbf{H}_k^{(0)} = (\mathbf{s}_k^T \mathbf{y}_k / \|\mathbf{y}_k\|^2) \mathbf{I}$,

$$\mathbf{H}_{k+1} = (\mathbf{V}_k^T, \dots, \mathbf{V}_{k-\hat{m}}^T) \mathbf{H}_k^{(0)} (\mathbf{V}_{k-\hat{m}}, \dots, \mathbf{V}_k) + \sum_{j=0}^{\hat{m}} \rho_{k-\hat{m}+j} \left(\prod_{l=0}^{m-j-1} \mathbf{V}_{k+l}^T \right) \mathbf{s}_{k-\hat{m}+j} \mathbf{s}_{k-\hat{m}+j}^T \left(\prod_{l=0}^{m-j-1} \mathbf{V}_{k+l} \right);$$

5) $k = k + 1$, 转 2)。

其中 \mathbf{H}_k 表示 \mathbf{B}_k 的逆矩阵, \mathbf{B}_k 为正定矩阵, 且 $\mathbf{B}_k \approx \nabla^2 E(\varphi_k)$, $\mathbf{g}_k = \nabla E(\varphi_k)$, $\mathbf{s}_k = \varphi_{k+1} - \varphi_k$, $\mathbf{y}_k = \mathbf{g}_{k+1} - \mathbf{g}_k$, $\rho_k = 1/\mathbf{s}_k^T \mathbf{y}_k$, $\mathbf{V}_k = \mathbf{I} - \mathbf{s}_k^T \mathbf{y}_k$ 。Wolfe-Power 条件可表示为

$$E(\varphi_k + \alpha_k \mathbf{d}_k) \leq E(\varphi_k) + \mu \alpha_k \mathbf{g}_k^T \mathbf{d}_k, \quad (9)$$

$$\mathbf{g}_{k+1}^T \geq \delta \alpha_k \mathbf{g}_k^T \mathbf{d}_k, \quad (10)$$

式中常数 $\mu \in (0, 0.5)$, $\delta \in (\mu, 1)$ 。

在上述计算过程中, 只需存储 $m + 1$ 个向量 $\{\mathbf{s}_i, \mathbf{y}_i\}_{i=k-m}^k$, 就可以计算矩阵 \mathbf{H}_{k+1} , 在实际计算中, 可以根据问题规模的大小以及机器容许的内存, 通过选择适当的 m 来控制所需的存储量。通常情况下, m 的取值为 $3 \sim 20$ ^[19], 这里选取 $m = 10$ 。

3 仿真结果与分析

3.1 算法仿真

当曝光时间小于大气相干时间时, 大气湍流近似为“冻结”^[17]。因此, 在研究大气湍流对望远镜成像的影响时, 可以使用一个或多个放置于望远镜光瞳上的随机相位屏来模拟等晕区内的大气湍流效应。由于大气湍流主要由低频成分构成, 高频成分所占比例很小^[20, 21], 使用前 65 项泽尔尼克多项式来模拟满足柯尔莫哥洛夫谱的大气相位屏。设大气的相干长度 r_0 为 10 cm, 望远镜口径 D 为 1 m, 去掉波前整体倾斜后的大气相位屏如图 4 所示, 相应的峰谷(PV)值为 2λ , 均方根(RMS)值为 0.98λ 。

图 5 给出了模拟的目标图像。取入射光波长 $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$, 光栅离焦系数 $W_{20} = 2\lambda$, 光瞳中心处

的光栅周期 $d_0 = 0.15 \text{ mm}$, 光栅孔径的半径 $R = 10 \text{ mm}$, 短焦透镜的焦距 $f = 300 \text{ mm}$, 则所得的+1级和-1级衍射光在探测器上的光强分布分别如图6(a),(b)所示。

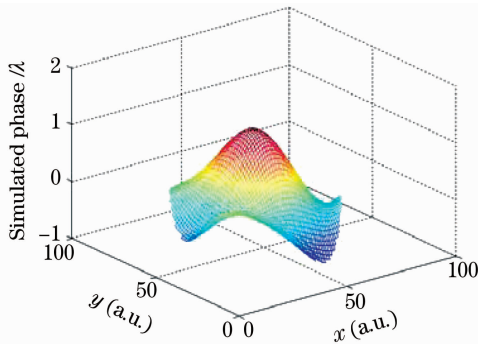


图4 模拟的随机相位屏

Fig. 4 Simulated random phase

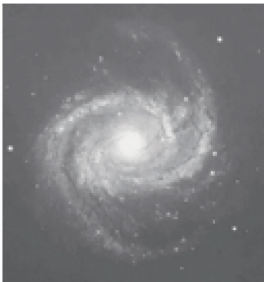


图5 模拟目标

Fig. 5 Simulated object

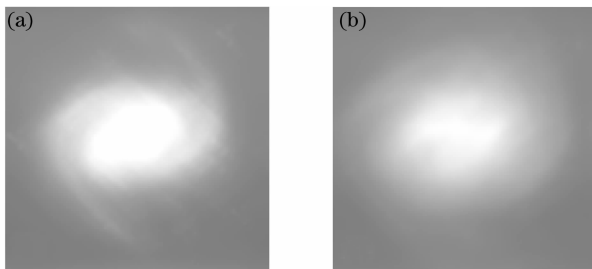


图6 (a)+1级,(b)-1级衍射光的光强分布

Fig. 6 Intensity distributions in the ± 1 diffraction orders. (a) +1, (b) -1

使用 L-BFGS 方法求解(8)式的最小值, 目标函数 E 随迭代次数的变化曲线如图7所示, 可以看出经过60次迭代后, 结果趋于稳定。图8,9分别给出了重建的目标图像和复原的波前, 图10给出了复原波前的残余误差, 相应的均方根差(RMSE, E_{RMSE})为 0.0018λ , 约为模拟波面的 0.18% 。 E_{RMSE} 常作为衡量波前复原精度的标准, 计算为^[22,23]

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{u,v} (\varphi(u,v) - \varphi_0(u,v))^2}{N_{\text{pupil}}}} \quad (11)$$

式中 φ 是复原得到的波前, φ_0 是实际的波前, N_{pupil} 是成像系统孔径内的采样点数。

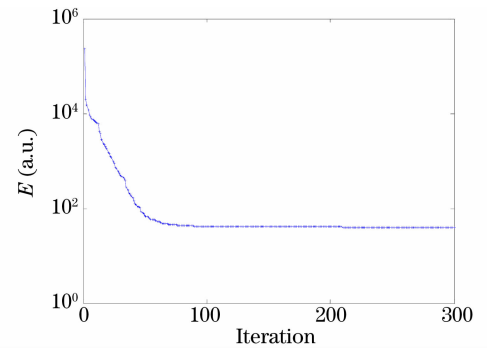


图7 目标函数随迭代次数的变化曲线

Fig. 7 Object function versus iteration number



图8 重建的目标图像

Fig. 8 Restored object image

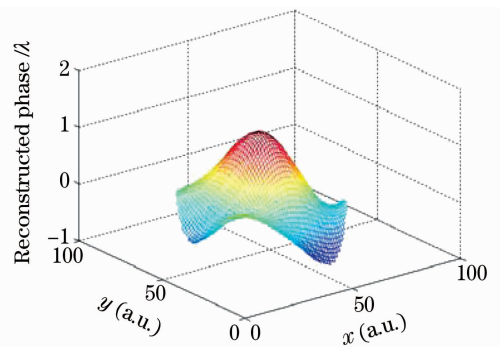


图9 复原的相位屏

Fig. 9 Retrieved phase

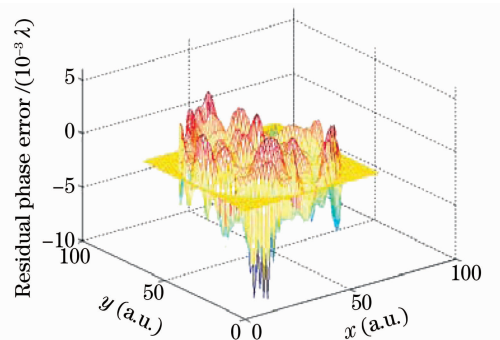


图10 模拟波前与复原波前的残余误差

Fig. 10 Residual phase error of simulated and retrieved phase wave front

3.2 影响复原精度的主要因素

在实际应用中,很多因素都会使波前复原的结果产生误差,影响着复原精度。这些因素主要包括: W_{20} 的大小选取不当、各衍射级之间光强的相互干扰、0级光的饱和串扰、硬件加工误差以及图像噪声等等。

在利用离焦光栅进行波前复原和目标重建时,参数 W_{20} 的选择十分重要,它决定着 ± 1 级衍射光上附加离焦像差的大小。如果 W_{20} 太小, ± 1 级图像就会由于过于相似而无法提供足够的信息来保证算法的收敛性和准确性;反之,如果 W_{20} 太大, ± 1 级图像就会由于离焦过大而变得严重模糊,无法精确地复原出波前信息。图 11 给出了图 4 所示波前复原结果的 E_{RMSE} 随 W_{20} 变化的曲线,可以看出,当 W_{20} 过小或过大时,复原的精度都会大大降低。

三个衍射级之间的光强相互干扰也会产生波前复原误差,因此,探测平面上 ± 1 级衍射光斑离开 0 级光斑的横向距离 η 应该足够大。但是由于探测器的靶面有限, η 太大时,使用一个探测器将无法同时探测 ± 1 级衍射光的光强分布,如图 12 所示。

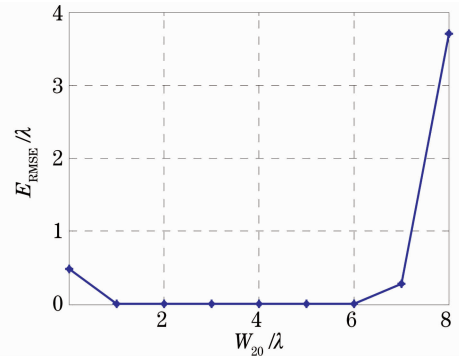


图 11 E_{RMSE} 随 W_{20} 的变化曲线

Fig. 11 Relation between E_{RMSE} and W_{20}

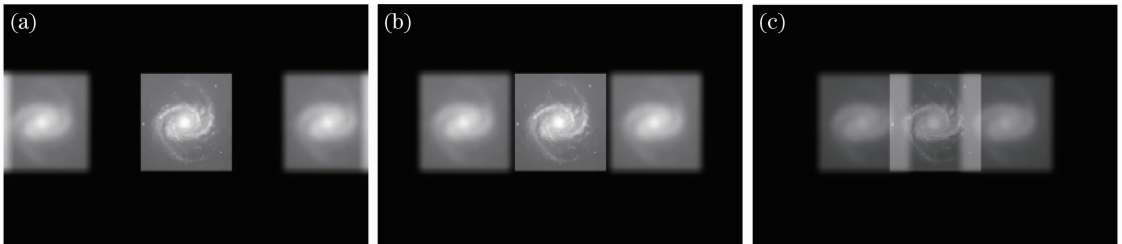


图 12 三种情况下 0 级和 ± 1 级的光强在探测器上的分布:(a)横向距离过大,(b)适中,(c)过小

Fig. 12 0 and ± 1 order-intensity distributions in the detector: when the horizontal distance is (a) too large, (b) moderate, and (c) too small

由于 η 由短焦透镜的焦距 f 、入射波长 λ 和光栅中心处的周期 d_0 决定

$$\eta = \lambda f / d_0, \quad (12)$$

因此,在实际应用中, f 和 d_0 的选取应适当。

一般正弦振幅离焦光栅的 0 级光的衍射效率为 25%, ± 1 级光的衍射效率为 6.25%;黑白振幅型离焦光栅的 ± 1 级衍射光的衍射效率也较低,各有约 10.1%。这就使得 0 级光的光强远大于 ± 1 级衍射光的光强,对探测信号造成饱和串扰,使复原结果产生误差。国防科技大学的习锋杰等^[8]设计的相位型离焦光栅,很好地抑制了 0 级光的衍射效率,提高了 ± 1 级衍射光的光能利用率,消除了 0 级光的饱和串扰。而且可以在光线较弱的环境下的使用,非常适合波前传感。

在利用离焦光栅进行波前传感时,光栅 ± 1 级的衍射效率必须相等,否则就会引入系统误差。因此在用于波前传感之前,必须预先测量光栅 ± 1 级的衍射效率。这时就需要对(5)式进行一些修改:

$$E = \sum_{k=\pm 1} \sum_{x,y} |d_k(x,y) - t_k \delta(x,y) * \hat{h}_k(x,y)|^2, \quad (13)$$

式中 t_k 为第 k 个衍射级的衍射效率。

基于离焦光栅的波前传感技术需要 ± 1 级上的图像严格对准,否则就会引入系统误差,两个图像位置的变化对应波前的倾斜项,因此需要通过系统标定来消除由于图像未严格对准引入的误差。

当图像存在噪声时,最小二乘算法的迭代收敛性就会受到影响,从而导致复原精度降低,甚至无法复原出波前。当目标为明亮光源时,图像的噪声主要是探测器的读出噪声,服从高斯分布。将图像进行规一化处理,并且在其中分别添加标准差 σ 为 0.005,0.01,0.015,0.02 的高斯随机噪声,然后对图 4 所示波前进行复原,图 13 给出了不同噪声水平下目标函数的收敛曲线,图 14 给出了 E_{RMSE} 随 σ 的变化曲线。可见,最小二乘算法对噪声比较敏感,因而在实际应用中必须对采集到的图像进行去噪处理(例如高斯滤波等)。

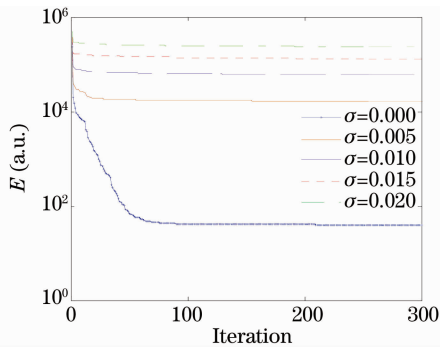
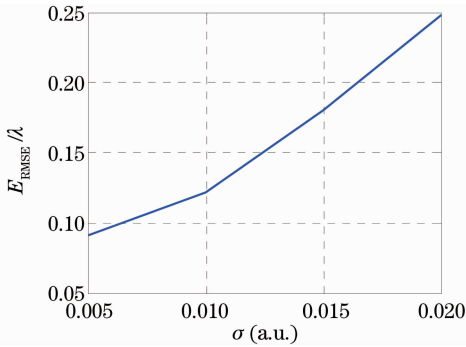


图 13 加噪后目标函数的迭代变化曲线

Fig. 13 Cost function versus iteration number with noise

图 14 E_{RMSE} 随 σ 的变化曲线Fig. 14 Curve of relation between E_{RMSE} and σ

此外,在实际情况中,系统中光学元件加工误差,零件的机械变形等因素都会在复原结果中引入误差。探测器的背景光、环境中的杂散光等都会对图像质量产生一定的影响,从而影响着复原的精度。

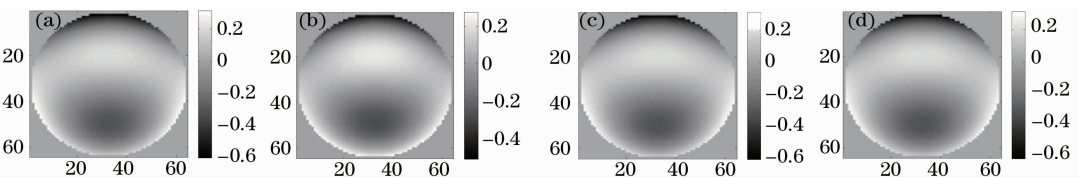
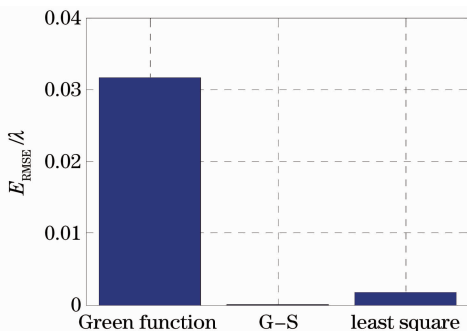


图 15 三种算法的波前复原结果。(a)模拟的波前,(b)Green 函数法,(c)G-S 算法,(d)最小二乘法

Fig. 15 Retrieved wavefront using different algorithms. (a) simulated wavefront, (b) Green function algorithm,

(c) G-S algorithm, (d) least square algorithm

图 16 三种算法复原结果的 E_{RMSE} Fig. 16 E_{RMSE} of three algorithms

应当注意的是,(1)式是在目标位于大气-望远镜综合系统等晕区内的条件下成立的,即图像上各点的点扩展函数都是一样的。当目标超出等晕区时,成像系统不能采用线性空不变模型,这时使用最小二乘法进行波前复原将会有很大的误差,这也是该算法的局限性所在。

3.3 各种算法的对比分析

目前,基于离焦光栅的波前传感器的常用算法有格林函数算法和 G-S 算法等。格林函数算法是利用格林函数求解 ITE 来复原波前,可以归结为两矩阵相乘,容易实现,计算速度快,可以做到实时复原。但是它要求波前和其斜率在光瞳面上处处连续,实质相当于一个线性空间滤波器,复原波前过程中损失了高频信息,只适用于低阶模式波前的复原;而且格林函数算法信息处理简单,复原精度相对较低。G-S 算法反复利用探测器上的光强信息和光瞳函数来重构波前分布,精度较高,可用于高阶模式波前复原。但是这两种方法都是以入射光强均匀为前提条件的,因而对扩展目标无能为力。最小二乘法则不依赖于光强的均匀性,可用于扩展目标的波前复原,但是计算量较大,还需在以后的工作中进一步提高它的计算速度。针对点目标情况,分别使用这三种算法对 PV 值为 0.95λ , RMS 值为 0.18λ 的波前进行复原,结果如图 15 所示,复原精度和计算时间分别如图 16,17 所示。表 1 给出了这三种算法的性能比较。

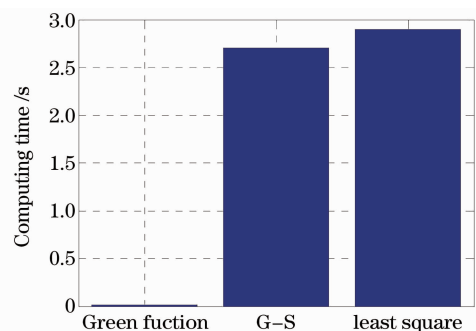


图 17 三种复原算法的计算时间

Fig. 17 Computing time of three algorithms

表 1 基于离焦光栅的波前复原算法的性能比较

Table 1 Comparison of algorithms for wavefront sensing based on defocusing grating

Algorithm	Performance		
	Condition	Speed	Precision
Green function algorithm	Point targets	High	Low
G-S algorithm	Point targets	Low	High
Least square algorithm	Point targets or extended targets	Low	High

4 结 论

对基于离焦光栅的波前复原技术进行了研究, 采用最小二乘算法成功实现了对扩展目标波前复原与目标像的重建。给出了数值仿真, 分析了影响复原结果的主要因素, 并与传统算法进行了对比分析。结果表明, 该算法可以准确地复原波前, 并可同时重建目标像, 在光栅型波前复原技术中将有着广阔的应用前景。必须指出, 当目标超出成像系统的等晕区时, 成像系统不能再采用线性空不变模型, 这时最小二乘算法就不能准确地复原波前, 如何解决这一问题将是今后研究的重点。

致谢 感谢国防科技大学的习锋杰博士对本文工作的大力支持和帮助。

参 考 文 献

- Kong Meimei, Gao Zhishan, Chen Lei *et al.*. Cyclic radial shearing interferometry based on polarization phase-shifting technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 127~131
- 孔梅梅, 高志山, 陈 磊等. 基于偏振移相的环路径向剪切干涉[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 127~131
- Wang Lijuan, Liu Liren, Luan Zhu *et al.*. Phase shifting Jamin lateral shearing interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1156~1159
- 王利娟, 刘立人, 栾 竹等. 相移雅满横向剪切干涉仪[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1156~1159
- Liu Dong, Yang Yongying, Tian Chao *et al.*. Study on phase retrieval from single close fringe pattern with high precision[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 531~536
- 刘 东, 杨甬英, 田 超等. 高精度单幅闭合条纹干涉图相位重构技术[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 531~536
- Rao Changhui, Jiang Wenhan, Ling Ning. Atmospheric parameters measurements for non-Kolmogorov turbulence with Hartmann-Shack wavefront Sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1201~1207
- 饶长辉, 姜文汉, 凌 宁. 应用哈特曼-夏克波前传感器测量大气湍流参数[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 1201~1207
- Zheng Hanqing, Rao Changhui, Rao Xuejun *et al.*. Wavefront stitching detection method based on Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3385~3390
- 郑翰清, 饶长辉, 饶学军等. 基于哈特曼-夏克波前传感器的波面拼接检测方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3385~3390
- Yuan Ke'e, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Simultaneous measurements on scintillation and phase fluctuation of light propagation through atmospheric turbulence by Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9):

- 1659~1663
- 苑克娥, 朱文越, 饶瑞中. Shack-Hartmann 波前传感器用于闪烁和相位起伏效应的同时测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1659~1663
- P. M. Blanchard, D. J. Fisher, S. C. Woods *et al.*. Phase-diversity wave-front sensing with a distorted diffraction grating [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(35): 6649~6655
- Xi Fengjie, Xu Xiaojun, Wang Tiezhi *et al.*. Wavefront curvature sensor with phase defocus grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 377~388
- 习锋杰, 许晓军, 王铁志等. 相位光栅型波前曲率传感器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 377~388
- Xi Fengjie, Jiang Zongfu, Xu Xiaojun. Influence of nonuniform intensity on wavefront curvature Sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1293~1296
- 习锋杰, 姜宗福, 许晓军. 光强非均匀分布对波前曲率传感器的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1293~1296
- Zhou Sumei, Zhou Changhe. Wavefront measurement by using quadratic grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 1~4
- 周素梅, 周常河. 二次光栅在波前测量中的应用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 1~4
- Shen Hongbin, Xu Xiaojun, Liu Zejin *et al.*. Theory and algorithm of phase retrieval for a new wavefront curvature sensor [J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2007, **19**(2): 33~36
- 沈洪斌, 许晓军, 刘泽金等. 光栅型波前曲率传感器原理与相位恢复研究[J]. *军械工程学院学报*, 2007, **19**(2): 33~36
- Shen Hongbin, Zhang Chu, Shen Xueju *et al.*. Real-time wavefront reconstruction based on diffraction grating wavefront curvature sensor[J]. *J. Appl. Opt.*, 2009, **30**(1): 50~55
- 沈洪斌, 张 雏, 沈学举等. 基于衍射光栅曲率波前传感器的实时波前重构研究[J]. *应用光学*, 2009, **30**(1): 50~55
- P. M. Blanchard, A. H. Greenaway. Simultaneous multiplane imaging with a distorted diffraction grating [J]. *App. Opt.*, 1999, **38**(32): 6692~6699
- Luo Lin, Liao Sheng, Fan Min *et al.*. Effects of large telescope aberrations on speckle imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1447~1451
- 罗 林, 廖 胜, 樊 敏等. 天文望远镜像差对斑点成像技术的影响[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1447~1451
- Qiu Yaohui, Liu Zhong, Lou Ke *et al.*. An experiment in astronomical high resolution image reconstruction with speckle holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(2): 151~154
- 邱耀辉, 刘 忠, 楼 柯等. 斑纹全息天文高分辨率像复原实验[J]. *光学学报*, 1999, **19**(2): 151~154
- Huang Jianming, Shen Mangzuo. Multiframe blind deconvolution restoration of atmospheric turbulence-degraded images based on noise characteristic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1686~1690
- 黄建明, 沈忙作. 基于噪声特性的大气湍流退化图像多帧盲反卷积复原[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1686~1690
- Jin Zhenyu, Liu Zhong, Qiu Yaohui. Improvement of iterative shift-and-add image reconstruction method [J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 2009, **29**(5): 1205~1210
- 金振宇, 刘 忠, 邱耀辉. 对迭代位移叠加像复原方法的改进[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1205~1210
- 18 J. Nocedal. Updating quasi-Newton matrices with limited storage [J]. *Mathematics of computation*, 1980, **35**(151): 773~782
- 19 D. C. Liu, J. Nocedal. On the limited memory BFGS method for large scale optimization[J]. *Mathematical Programming*, 1989, **45**(1): 503~528
- 20 R. J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1976, **66**(3): 207~211
- 21 N. Roddier. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials[J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(10): 1174~1180
- 23 R. T. Brigantic, M. C. Roggemann, K. W. Bauer *et al.*. Image-quality metrics for characterizing adaptive optics system performance[J]. *App. Opt.*, 1997, **36**(26): 6583~6593
- 23 A. Guirao, P. Artal. Corneal wave aberration from videokeratography: accuracy and limitations of the procedure[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(6): 955~965