

基于 Ronchi 光栅 Talbot 效应的相位恢复

陈升^{1,2,3}, 李常伟^{1,2*}, 张思炯^{1,2}

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种基于 Ronchi 光栅 Talbot 效应的相位恢复方法。将 CCD 相机置于 Ronchi 光栅的 Talbot 距离处, 记录 Ronchi 光栅的自成像强度分布。通过随机并行梯度下降 (SPGD) 算法优化 Zernike 多项式系数, 恢复入射相位。数值模拟实验结果表明, 所提出的方法能够快速实现高精度的相位恢复, 具有收敛速度快、精度高、抗噪声等优点。

关键词 光栅; 光计算; 相位恢复; 随机并行梯度下降 (SPGD) 算法; Ronchi 光栅; Talbot 效应; Zernike 多项式

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0405001

Phase Retrieval Based on Talbot Effect of Ronchi Grating

Chen Sheng^{1,2,3}, Li Changwei^{1,2}, Zhang Sijiong^{1,2}

¹Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

²Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract One phase retrieval method based on the Talbot effect of Ronchi grating is proposed. A CCD camera is placed at the Talbot distance of Ronchi grating to record the self-image intensity distribution of Ronchi grating. By using the stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm, the coefficients of Zernike polynomials are optimized to retrieve the input phase. The numerical simulation results show that, the proposed method can quickly achieve a high-precision phase retrieval and possesses the advantages of fast convergence, high precision, and anti-noise and so on.

Key words gratings; optical computing; phase retrieval; stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm; Ronchi grating; Talbot effect; Zernike polynomials

OCIS codes 050.1950; 100.5070; 070.6760

1 引 言

目前, 电荷耦合器件 (CCD) 等光电探测器只能直接探测光场的强度分布信息, 进而间接获取光场的相位分布信息。相位恢复技术就是一种通过测得的光场强度信息恢复入射相位信息的技术, 由于其具有高精度和高灵敏度的特点, 因此在电子显微成像、相位测量、波前分析和图像加密等领域都有着广泛的应用。

相位恢复由 Gerchberg 于 1972 年首次提出, 目

的是为了解决电子显微镜成像问题^[1]。利用出瞳面和像平面这两个面的光场强度信息, 通过迭代恢复出瞳面光场的相位信息, 这就是相位恢复算法的雏形——GS 迭代算法。虽然 GS 算法具有很高的相位恢复精度, 但是存在收敛速度慢甚至不收敛、迭代次数多等问题。为了增强算法的收敛性能, 国内外学者展开大量研究, 基于 GS 算法的基本框架, 通过增加约束条件或改变入射波长, 提出了很多改进算法。

1981 年, 杨国桢等^[2]提出了一般变换系统中振

收稿日期: 2017-08-22; 收到修改稿日期: 2017-10-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (11373048, 11573047)、国家自然科学基金青年科学基金项目 (11403066)

作者简介: 陈升 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事自适应光学相关技术方面的研究。E-mail: schen@niaot.ac.cn

导师简介: 李常伟 (1983—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事自适应光学相关技术方面的研究。

E-mail: cwli@niaot.ac.cn (通信联系人)

幅-相位恢复的理论和算法,针对 GS 算法的收敛停滞问题作了很大改进,增强了算法适应性。1982 年, Fienup 等^[3]提出了一种混合输入输出(HIO)算法,该算法在 GS 算法的基础上增加了约束条件,提高了收敛速度,多用于相干衍射成像领域,取得了显著的收敛效果。有学者提出,利用三个或更多个面的光强信息来恢复相位^[4-5],可克服 GS 算法的不足。近年来,学者提出利用多波长光源采集衍射图进行相位恢复^[6-7],也取得了良好的收敛效果。

除此之外,学者们还结合了多种优化算法进行相位恢复,以提高相位恢复收敛的速度,如随机并行梯度下降(SPGD)算法^[8]、遗传算法^[9]等。1997 年, Vorontsov 等^[10]提出了一种 SPGD 算法,并将其运用于高分辨波前畸变校正中。自此,将 SPGD 算法运用到自适应光学系统中的研究^[11-12]也越来越多。相比传统的自适应波前校正技术,SPGD 算法直接优化系统性能指标,不依赖波前传感器,算法容易实现,所有控制回路并行计算,具有较好的收敛效果。SPGD 算法的这种多通道并行优化处理的特点使其极具应用潜力。

区别于上述迭代方法,同时期发展起来的另一种相位恢复方法还有直接法,又称为光强传输方程(TIE)法。与迭代方法一样,TIE 法也是一种非干涉型相位恢复方法,不同的是 TIE 法没有迭代过程,而是基于待求平面光强分布和光强轴向微分,通过数值求解 TIE 直接获取相位信息。TIE 法相比迭代法拥有更高的确定性,但是求解方法复杂,得出唯一解有一定的困难。文献^[13]中综述了 TIE 在光学成像领域的研究现状。

上述方法增加了系统复杂度和操作难度。本文提出了一种基于 Ronchi 光栅 Talbot 效应的相位恢复方法,该方法利用一个周期和占空比已知的 Ronchi 光栅对入射光场进行振幅调制,在 Ronchi 光栅的 Talbot 距离处获取光场的强度分布信息,利用 SPGD 迭代算法优化 Zernike 多项式系数,获得入射相位。该方法光路结构简单,易于实现;图像采集方便灵活,只需获取 Talbot 距离处一个平面的强度分布信息,即可快速实现高精度的相位恢复。该算法充分利用了 Ronchi 光栅的光场衍射特性,使得相位恢复具有较高的精度和灵敏度。

2 基本原理与数学模型

2.1 Ronchi 光栅 Talbot 效应的基本原理与数值模拟

当单色平面波垂直入射到具有周期性结构的物

体上时,周期性结构物体后方菲涅耳衍射区内的一些特定的距离上将会出现该周期性结构物体的像,这种不需要透镜即可对周期性物体成像的现象称为 Talbot 效应或 Talbot 自成像,该现象由 Talbot^[14]于 1836 年发现,后续出现了大量关于该效应的理论推导^[15-16]。

振幅均匀的单色平面波垂直入射到一维透射式振幅型平行狭缝光栅上,即光栅为 Ronchi 光栅(占空比为 0.5)时,在特定的传输距离处会得到 Ronchi 光栅的自成像,定义此时的传播距离为 Talbot 距离 $Z_T = \frac{2md^2}{\lambda}$,其中 m 取正整数, d 为 Ronchi 光栅周期, λ 为入射波波长,不难得出, Z_T 最小取 $\frac{2d^2}{\lambda}$ 。此外,当传播距离 z 取 $Z_T/2$ 时,会得到反相的负 Talbot 像;当 z 取 $Z_T/4$ 时,会得到强度比较均匀的倍频分数 Talbot 像,详细的推导过程请参阅参考文献^[16]。图 1 所示为 Talbot 效应示意图。

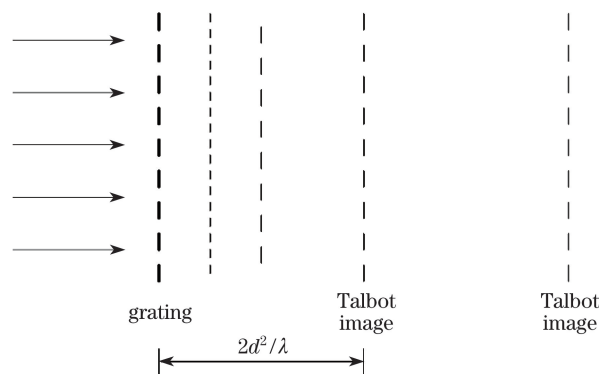


图 1 Talbot 效应示意图

Fig. 1 Schematic of Talbot effect

模拟实验中采集 Talbot 自成像的位置为一倍 Talbot 距离处,即 $2d^2/\lambda$,在这个距离处采集到的自成像具有最佳的信噪比。受有限大小的孔径衍射效应影响,随着衍射距离的增加,更远 Talbot 距离处的成像质量越来越差,信噪比下降严重,不利于后续的相位恢复。

需要说明的是,在 Talbot 效应的理论推导中,入射光采用了严格的单色平面波垂直入射。如果入射光是非平面波或者非垂直入射,即入射波前携带一定的像差,且为缓变相位,在 Talbot 距离处仍能获得类似 Ronchi 光栅结构的像,只是与单色平面波垂直入射获得的 Talbot 像相比,强度分布和条纹特征因入射相位的不同而呈现出一定的差异^[17-18]。

2.2 相位恢复的基本原理

首先,假设入射相位为 $\phi(x_0, y_0)$,即待恢复的

相位。对应光场的复振幅为

$$E(x_0, y_0) = A \exp[i\phi(x_0, y_0)], \quad (1)$$

式中 A 为振幅, $\phi(x_0, y_0)$ 为入射相位, x_0, y_0 为输入面坐标。入射相位可以表征为 Zernike 多项式的线性组合, 即

$$\phi(x_0, y_0) = \sum_{n=1}^N a_n Z_n(x_0, y_0), \quad (2)$$

式中 a_n 是 Zernike 多项式第 n 项 $Z_n(x_0, y_0)$ 的系数, 也是优化算法所要优化的变量; N 为 Zernike 多项式的最大项数。

入射相位传播一段距离 z 后到达 Ronchi 光栅前表面, 此时光场的复振幅可以通过角谱传播表示为

$$E_1(x, y) = U(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} E(x_0, y_0) \right] H(f_X, f_Y) \right\}, \quad (3)$$

式中 $H(f_X, f_Y)$ 为传播因子, \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 分别为傅里叶变换和傅里叶逆变换, U 为输入光场振幅, f_X, f_Y 为空间频率, X, Y 为频域坐标。(3) 式中传播距离 z 以一倍 Talbot 距离为宜, 过大或过小均会影响相位恢复效果。

紧贴 Ronchi 光栅后表面的光场分布为

$$E_2(x, y) = E_1(x, y)t(x, y), \quad (4)$$

式中 $t(x, y)$ 为光栅透过率函数, x, y 为光栅所在平面坐标。根据角谱传播理论, 在距离观察屏 $z = Z_T$ 处的复振幅分布为

$$U(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F}[E_2(x, y)] H(f_X, f_Y) \}. \quad (5)$$

相位恢复的评价函数 f_{EF} 定义为 CCD 获得的强度图像在每一像素点的强度值与计算获得的强度值差的平方和, 即

$$f_{EF} = \sum_{i,j} |I(x_i, y_j) - |U_k(x_i, y_j)|^2|^2, \quad (6)$$

式中 $I(x_i, y_j)$ 是 CCD 测得的自成像中像素点 (i, j) 的强度值, k 为迭代次数, x_i, y_j 为 CCD 所在平面坐标。 $I(x_i, y_i)$ 即 Talbot 效应中实测的 Talbot 自成像强度信息。至此, 入射波前相位恢复的问题就转化为优化 Zernike 多项式系数, 使评价函数取最小值问题, 本文采用 SPGD 算法来求解。

相位恢复流程如图 2 所示。Zernike 多项式系数的初始值均为 0, 经过 SPGD 算法更新之后, 产生新的 Zernike 多项式系数组合, 根据(5)式计算 CCD 记录平面的强度分布, 然后与 CCD 记录的强度分布对比, 判断是否满足条件。若满足条件, 则输出相位, 优化结束; 若不满足条件, 继续由 SPGD 算法更新 Zernike 多项式系数, 重新迭代, 直至满足判断条件。关于 SPGD 算法及其改进算法已有很多文献

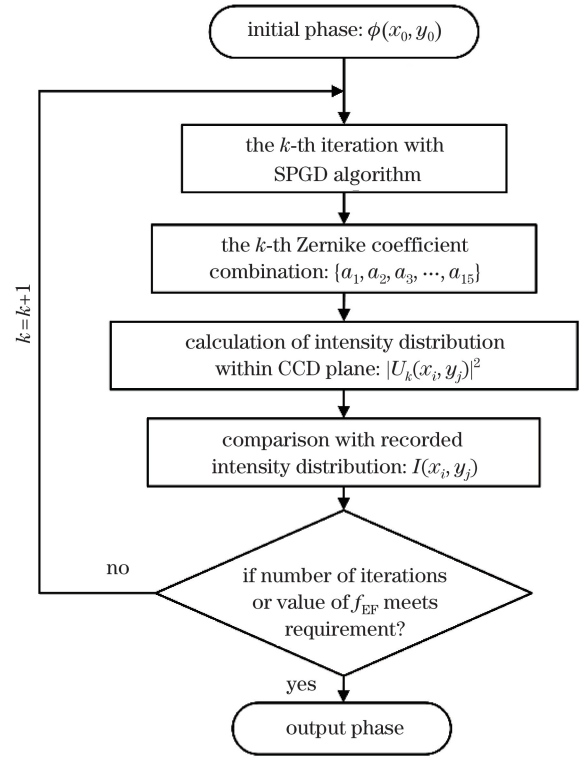


图 2 相位恢复流程图

Fig. 2 Flow chart of phase retrieval

报道, 详见文献[8, 11-12, 19-20], 这里不作赘述。

3 模拟与讨论

3.1 Ronchi 光栅建模及衍射成像模拟

在数字模拟实验中, Ronchi 光栅的光栅常数为 $160 \mu\text{m}$, 占空比为 0.5, CCD 相机的像素单元尺寸为 $10 \mu\text{m}$, 为了便于计算, 像素数设为 256×256 , 入射光的波长为 $0.633 \mu\text{m}$ 。将光栅透光部分赋值为 1, 不透光部分赋值为 0, 并加入光瞳以接近实际情形, 模拟实验装置示意图如图 3 所示。

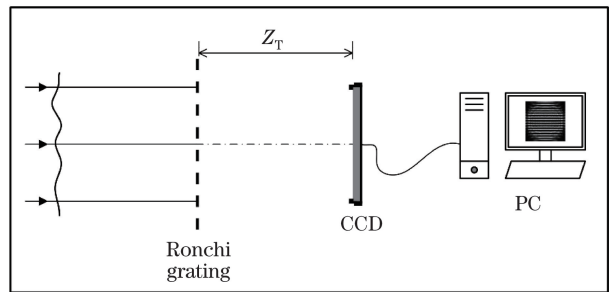


图 3 Ronchi 光栅 Talbot 效应模拟实验示意图

Fig. 3 Schematic of simulation experiment of Talbot effect of Ronchi grating

图 4 所示为 Ronchi 光栅及其 Talbot 自成像模拟结果。从图 4 可以看到, 光栅的 Talbot 自成像与光栅结构保持一致, 与上文的理论分析结果一致。

Talbot 自成像的强度呈现出由中心到边缘减弱的分布,并且边缘变得模糊,这是有限孔径的衍射效应造成的。

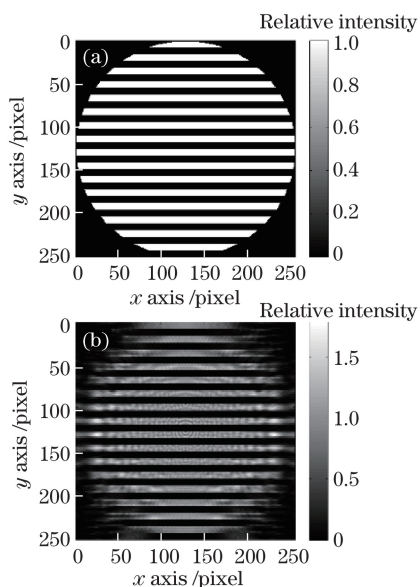


图 4 (a) Ronchi 光栅模拟结果;
(b) Ronchi 光栅的 Talbot 自成像

Fig. 4 (a) Simulation result of Ronchi grating;
(b) Talbot self-image of Ronchi grating

3.2 相位恢复的数值模拟结果与分析

采用 Matlab 软件进行数值模拟,在距离 Ronchi 光栅前表面一倍 Talbot 距离处引入相位信息,在 Talbot 平面获取光栅自成像强度信息,然后按照第 2 节所述的相位恢复原理,利用获取的强度信息恢复距离 Ronchi 光栅前表面一倍 Talbot 距离处的入射相位,对本方法进行数值验证。

首先,考察了对离焦像差的恢复情况,结果如图 5 所示。图 5(a)所示为输入相位,均方根(RMS)值为 0.1192λ ,峰谷(P-V)值为 0.4666λ 。图 5(b)所示为光栅自成像强度信息。图 5(c)所示为相位恢复结果,RMS 值为 0.1188λ ,P-V 值为 0.4661λ 。图 5(d)所示为相位残差,残差的 RMS 值为 0.0008λ ,P-V 值为 0.0020λ 。

其次,考察了对像散像差的恢复情况,结果如图 6 所示。图 6(a)所示为输入相位,RMS 值为 0.2386λ ,P-V 值为 1.3194λ 。图 6(b)所示为光栅自成像强度信息。图 6(c)所示为恢复的相位结果,RMS 值为 0.2387λ ,P-V 值为 1.3205λ 。图 6(d)所示为相位残差,RMS 值为 0.0003λ ,P-V 值为 0.0011λ 。

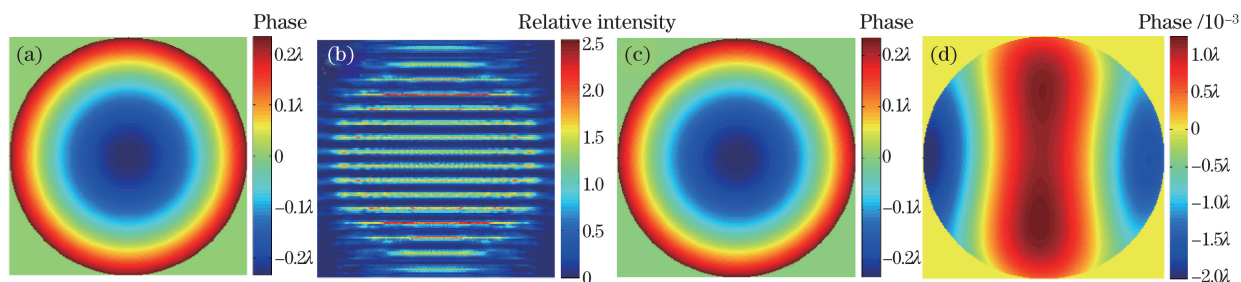


图 5 离焦像差恢复结果。(a)输入相位;(b)光栅自成像;(c)恢复相位;(d)相位残差

Fig. 5 Retrieved results of defocus aberration. (a) Input phase; (b) self-image of grating;
(c) retrieved phase; (d) residual phase

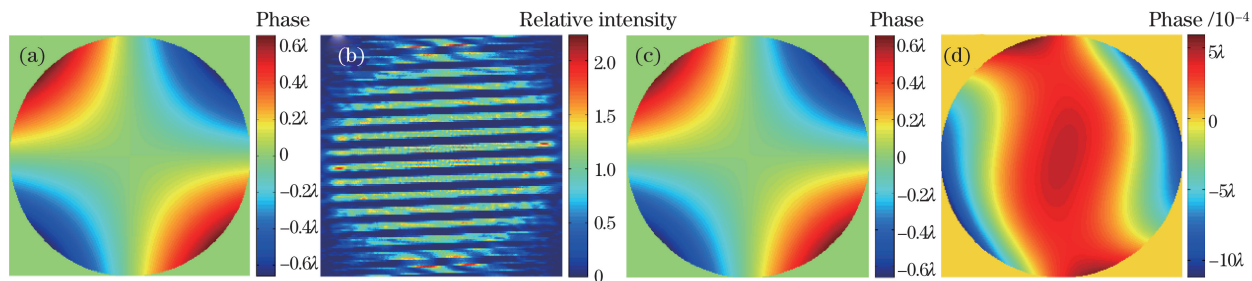


图 6 像散像差恢复结果。(a)输入相位;(b)光栅自成像;(c)恢复相位;(d)相位残差

Fig. 6 Retrieved results of astigmatism aberration. (a) Input phase; (b) self-image of grating;
(c) retrieved phase; (d) residual phase

图 5 和图 6 的恢复结果表明,对于低阶像差的初始相位,在一定的动态范围内,所提出的方法能以

较高精度恢复初始相位,精度达到了 $\lambda/10000$ 。

在实际应用中,待恢复的初始相位往往不局限

于低阶像差,还存在彗差、球差、二级像散等高阶像差,并且还存在噪声干扰,因此对低、高阶混合像差的恢复模拟很有必要。这里采用 Zernike 多项式前 15 项随机生成的组合像差,并在 CCD 记录的强度

分布中引入高斯白噪声,用所提方法进行恢复,结果如图 7 所示。图 7(a)所示为输入相位,7(b)~(d)所示为无噪声情况下的恢复结果,7(e)~(g)所示为其他条件不变,在信噪比为 5 的情况下的恢复结果。

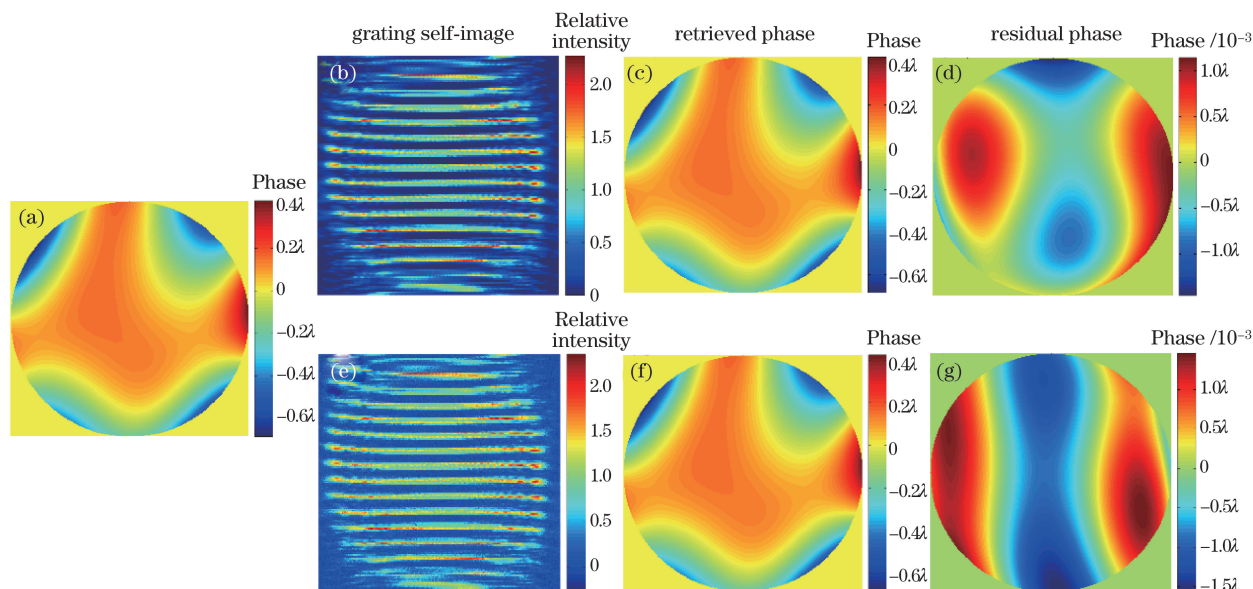


图 7 随机组合像差的恢复结果。(a)输入相位;(b)~(d)无噪声情形下;(e)~(g)信噪比为 5 的情况
Fig. 7 Retrieved results of random mixed aberration. (a) Input phase; (b)-(d) without noise;
(e)-(g) in the case with signal-to-noise ratio of 5

输入相位的 RMS 值为 0.1425λ , P-V 值为 1.1102λ 。在无噪声情况下,恢复相位的 RMS 值为 0.1424λ , P-V 值为 1.1109λ ,加入噪声后的恢复相位 RMS 值为 0.1423λ , P-V 值为 1.1084λ 。在无噪声情况下,相位残差的 RMS 值为 0.0005λ , P-V 值为 0.0015λ ,加入噪声后,相位残差的 RMS 值为 0.0008λ , P-V 值为 0.0016λ 。引入噪声前后,恢复结果中相位残差的 RMS 值仅相差 0.0003λ ,表明该方法具有较强的抗噪能力。

图 8 所示为加入噪声前后评价函数曲线,展示了两种情况下评价函数的收敛情况。从图 8 可以看

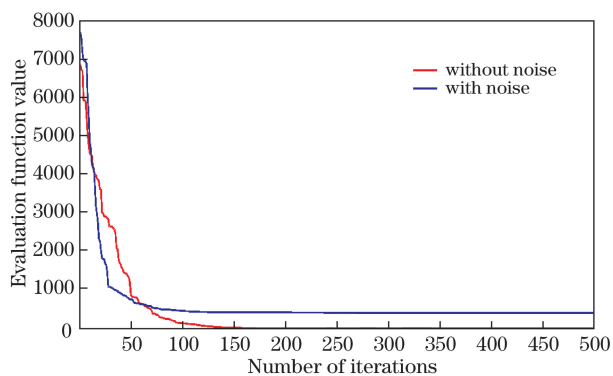


图 8 评价函数曲线

Fig. 8 Curves of evaluation function

出,加入噪声后,像差评价函数值(蓝色)比未加噪声的情况(红色)表现出了更快的收敛速度,用了较小的迭代次数就趋于稳定,但由于噪声的影响,评价函数趋于某一定值,而红色曲线趋近于 0。初步分析认为,所提方法的这种抗噪能力和评价函数的收敛规律很可能与 SPGD 算法的特点有关。

随机组合像差添加噪声前后,Zernike 系数恢复水平相差细微,结果如图 9 所示。恢复后的 Zernike 系数和输入相位的 Zernike 系数基本保持一致,平均偏差水平维持在 0.002 以内。

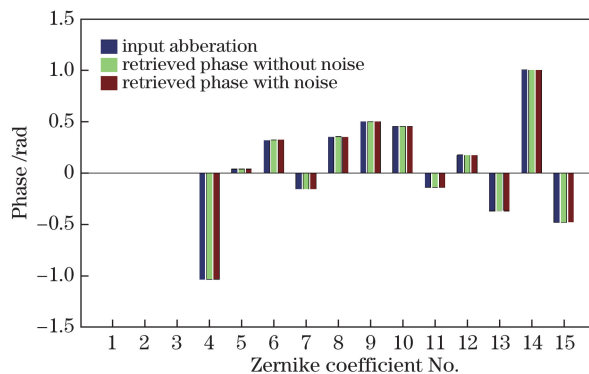


图 9 恢复相位与输入相位 Zernike 系数(前 15 项)对比

Fig. 9 Comparison of Zernike coefficients (the first 15 items) of retrieved phase and input phase

以上模拟实验中的输入相位均为 Zernike 模式下的相位,为了凸显所提方法的一般性,将输入相位改为非 Zernike 模式下基于 peaks 函数制作的自由曲面的相位。peaks 函数是 Matlab 软件中自带的一个典型的多元函数,本质上是一个二元高斯分布

的概率密度函数。上述基于 Zernike 多项式的缓变相位只需要前 15 项即可恢复,为了使 peaks 函数能够被充分分解,需要更多的 Zernike 项数,此次模拟中采用了前 190 项。由 peaks 函数构造的自由曲面的相位恢复结果如图 10 所示。

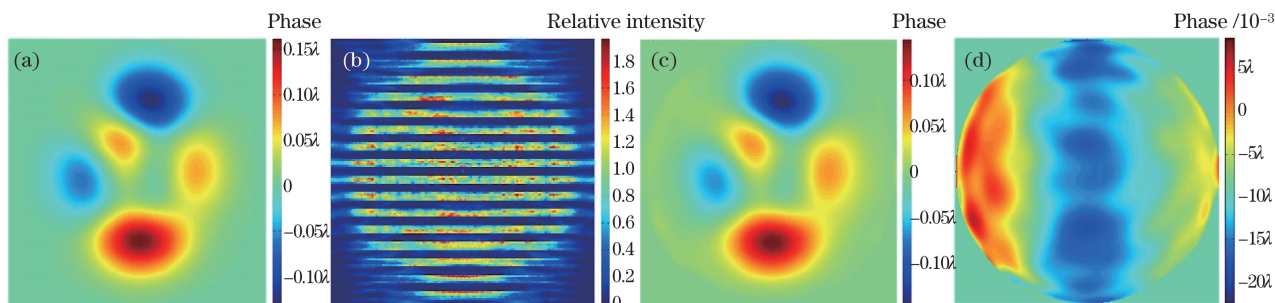


图 10 基于 peaks 函数的自由曲面的恢复结果。(a)输入相位;(b)光栅自成像;(c)恢复相位;(d)相位残差

Fig. 10 Retrieval results of free-form surface based on peaks function. (a) Input phase; (b) self-image of grating; (c) retrieved phase; (d) residual phase

基于 peaks 函数的自由曲面的 RMS 值为 0.0424λ , P-V 值为 0.2916λ ;恢复相位的 RMS 值为 0.0417λ , P-V 值为 0.2915λ ;相位残差的 RMS 值为 0.0036λ , PV 值为 0.0175λ 。相比对 Zernike 模式下输入相位的恢复结果,基于 peaks 函数的自由曲面输入相位的恢复精度稍有减小,可能的原因是 peaks 函数并不能在 Zernike 模式下被完全分解,但相位残差的 RMS 值仍维持在 $\lambda/1000$ 水平,是可以接受的。

3.3 误差分析

在模拟实验中,假设入射光场振幅是均匀的(振幅为常数 1),但实际应用中入射光场不可能完全均匀,故所提方法对入射光场振幅均匀性要求较高,有一定的局限性。为定量分析入射光场振幅均匀性对相位恢复精度的影响,以 Zernike 多项式的第 4 项离焦像差为输入相位,用高斯分布函数对入射光场振幅进行处理,使入射光场振幅自中心向边缘呈高斯分布。在有效孔径内,用归一化的振幅 RMS 值代表其均匀性,在不同 RMS 值条件下分别进行相位恢复,结果如图 11 所示。

由图 11 可以看到,随着振幅 RMS 值的增大,相位恢复精度逐渐减小;当 RMS 值接近 3%(对应振幅 P-V 值为 0.2)时,相位残差的 RMS 值减小到 $\lambda/100$ 水平;如果振幅 RMS 值继续增大,将不能准确恢复入射相位。

误差的另一主要来源是 CCD 位置误差。模拟实验中 Talbot 距离的数据是精确无误的,但实际情况中 CCD 测量面容易偏离 Talbot 距离,这必然

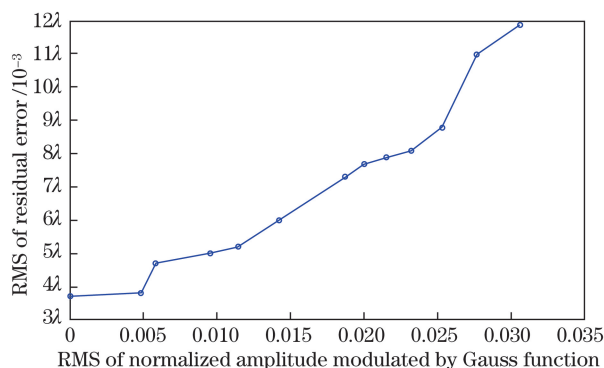


图 11 入射光场振幅分布均匀性对相位恢复精度的影响

Fig. 11 Effect of uniformity in amplitude distribution of incident field on phase retrieval precision

会引入误差,进而影响相位恢复的精度,这也是所提方法引入误差的主要原因,故对 CCD 位置误差的分析很有必要。

同样以 Zernike 多项式的第 4 项离焦像差作为输入相位,在 CCD 的准确测量距离即 Talbot 距离的基础上依次引入梯度为 0.01 mm 的偏移量,在偏移量不超过 0.1 mm 的情况下,相位恢复精度在 $\lambda/200$ 以内;当偏移量达到 0.1 mm 后,将梯度调整为 0.1 mm,在偏移量不超过 0.5 mm 的情况下,相位恢复精度在 $\lambda/100$ 以内;若偏移量大于 1 mm,相位恢复精度会随着偏移量的增大不断减小,如图 12 所示。

由图 12 可以看到, CCD 的实际位置相对于 Talbot 距离的偏差对相位恢复精度的影响是很大的。当偏移量小于 0.02 mm 时,可以将相位恢复误差控制在 $\lambda/1000$ 以内;当偏移量超过 0.5 mm 时,

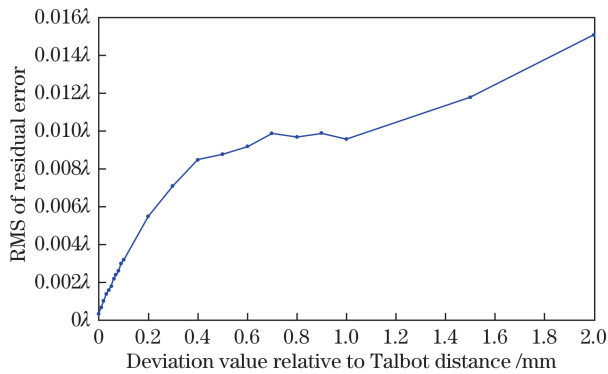


图 12 CCD 测量误差对相位恢复精度的影响

Fig. 12 Effect of CCD measurement error on phase retrieval precision

相位恢复精度减小到 $\lambda/100$ 的水平。因此在实际测量中, CCD 测量位置精度的控制是一个十分重要的环节, 只有将 CCD 测量位置相对 Talbot 距离的偏移量控制在一定范围内, 才能保证较高的相位恢复精度。

4 总 结

提出了一种相位恢复方法, 利用 Ronchi 光栅 Talbot 效应产生的自成像强度信息, 通过 SPGD 优化算法恢复输入相位, 对单项像差、随机组合高阶像差以及由 peaks 函数构造的自由曲面都有很好的恢复结果。定量分析了入射光场振幅均匀性和 CCD 位置误差对相位恢复精度的影响。数值模拟得到的相位恢复结果的相对误差在 1% 以内, 所提方法具有结构简单、收敛速度快、精度高的特点。对噪声情况下的恢复结果表明, 所提方法具备较强的抗噪能力, 初步认为这种抗噪能力的来源有两个方面: 1) Talbot 自成像的特殊成像方式; 2) SPGD 算法的特性。下一步的研究工作将主要集中在该方法的实验验证上。

参 考 文 献

[1] Gerchberg R W. Phase determination from image and diffraction plane pictures in the electron microscope[J]. *Optik*, 1971, 34(3): 275-284.

[2] Gu B Y, Yang G Z, Dong B Z. Algorithms on the phase retrieval problems in optical and electronic microscopic systems[J]. *Progress in Physics*, 1988, 8(3): 365-382. 顾本源, 杨国桢, 董碧珍. 光学系统和电子显微系统中振幅和相位恢复问题的算法[J]. *物理学进展*, 1988, 8(3): 365-382.

[3] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(15): 2758-2769.

[4] Bruel L. Numerical phase retrieval from beam intensity measurements in three planes[C]. *SPIE*, 2003, 4932: 590-598.

[5] Ivanov V Y, Vorontsov M A, Sivokon V P. Phase retrieval from a set of intensity measurements: theory and experiment[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1992, 9(9): 1515-1524.

[6] Diao B B, Wang H, Deng L J. A multi-intensity measurement phase retrieval method based on spatial light modulator[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, 22(11): 1695-1698. 刁彬彬, 王辉, 邓丽军. 基于空间光调制器的多强度测量相位恢复方法[J]. *光电子 • 激光*, 2011, 22(11): 1695-1698.

[7] Zhao Y, Gao Z S, Dou J T, *et al.* A multi-wavelength gradient acceleration phase retrieval iterative algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0109001. 赵彦, 高志山, 窦健泰, 等. 一种多波长梯度加速相位恢复迭代算法[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0109001.

[8] Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(12): 907-909.

[9] Mukai R, Wilson K, Vilmrotter V. Application of genetic and gradient decent algorithms to wave-front compensation for the deep-space optical communications receiver[R]//*The Interplanetary Network Progress Report*, Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2005: 1-21.

[10] Vorontsov M A, Sivokon V P. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(10): 2745-2758.

[11] Vorontsov M A, Carhart G W, Cohen M, *et al.* Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, 17(8): 1440-1453.

[12] Yang H Z, Chen B, Li X Y, *et al.* Experimental demonstration of stochastic parallel gradient decent control algorithm for adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(2): 205-210. 杨慧珍, 陈波, 李新阳, 等. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法实验研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(2): 205-210.

[13] Zuo C, Chen Q, Sun J S, *et al.* Non-interferometric phase retrieval and quantitative phase microscopy based on transport of intensity equation: a review[J]. *Chinese*

- Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0609002.
- 左超, 陈钱, 孙佳嵩, 等. 基于光强传输方程的非干涉相位恢复与定量相位显微成像: 文献综述与最新进展[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0609002.
- [14] Talbot H F. Facts relating to optical science[J]. The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1836, 9(56): 401-407.
- [15] Jin G F, Yan Y B, Wu M X. Binary optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 145. 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 145.
- [16] Ibarra J, Ojeda-Castañeda J. Talbot interferometry: a new geometry[J]. Optics communications, 1993, 96(4/6): 294-301.
- [17] Schmidt J D. Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB[M]. Bellingham: SPIE, 2010.
- [18] Voelz D G. Computational Fourier optics: a MATLAB tutorial[M]. SPIE, 2011.
- [19] Wang S H, Liang Y H, Long X J, *et al.* Multilevel wavefront correction technique based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1091-1096. 王三宏, 梁永辉, 龙学军, 等. 基于随机并行梯度下降算法的多级波前校正技术[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1091-1096.
- [20] Song Y, Chen T, Wang J, *et al.* Optimization of stochastic parallel gradient descent algorithm via power spectrum method[J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2016, 10(1): 325-332.