

基于空间像自适应降噪的投影物镜波像差检测方法

杨济硕^{1,2} 李思坤¹ 王向朝^{1,2} 闫观勇^{1,2} 徐东波¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种基于空间像自适应降噪的投影物镜波像差检测方法。通过对空间像进行统计分析, 获取空间像的噪声模型和噪声标准差模型。以噪声标准差为权重因子, 利用加权最小二乘法对空间像进行主成分分解, 可以实现对空间像的自适应、无损降噪, 从而得到更为精确的主成分系数和泽尼克系数。使用光刻仿真软件 PROLITH 的仿真结果表明, 在相同的噪声水平下, 0.1λ 像差幅值内, 与基于空间像主成分分析的波像差检测技术相比, 精度提高 30% 以上。在使用光刻实验平台测量 Z_8 调整量的实验中, 该方法的精度更高。

关键词 成像系统; 光刻机; 波像差检测; 加权最小二乘法; 空间像; 降噪

中图分类号 TN305.7 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0111003

Projection Lens Wave-Front Aberration Measurement Method Based on Adaptive Aerial Image Denoising

Yang Jishuo^{1,2} Li Sikun¹ Wang Xiangzhao^{1,2} Yan Guanyong^{1,2} Xu Dongbo¹

(¹ *Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*
² *University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)

Abstract A wave-front aberration measurement method of lithographic projection lens based on adaptive aerial image denoising is proposed. Principal component analysis (PCA) and multivariate linear regression analysis are used for model generation. Weighted least-square (WLSQ) method based PCA is used to get the principal component coefficients that are used for extracting the actual Zernike coefficients. Both the noise model of aerial images and the standard deviation model of noises are obtained by statistical analysis of actually measured aerial images. The standard deviation of the noise is used as weighting factors of the weighted least-square method. Accurate principal component coefficients and Zernike coefficients can be calculated because of the adaptive and lossless denoising ability of this method. Compared with wave-front aberration measurement techniques based on principal component analysis of aerial images (AMAI-PCA), the new method can provide more accurate results. Simulations show that AMAI-WLSQ can enhance the accuracy by more than 30% when the range of wavefront aberration is within 0.1λ . Experiments also show that AMAI-WLSQ can detect aberration shifts more accurately.

Key words imaging systems; microlithographic system; wave-front aberration measurement; weighted least square; aerial image; denoising

OCIS codes 110.3960; 120.3940; 220.1010

1 引言

光刻机是极大规模集成电路制造的核心设备之一。投影物镜作为光刻机成像系统最重要的组成部

分, 它的性能直接决定着光刻机的分辨率以及套刻精度^[1,2]。当投影物镜存在波像差时, (一般使用一组泽尼克系数表征波像差的大小), 光刻机的成像对

收稿日期: 2012-08-10; 收到修改稿日期: 2012-09-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60938003, 61205102, 61275207)资助课题。

作者简介: 杨济硕(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事高端光刻机投影物镜波像差检测技术方面的研究。

E-mail: yangjishuo_01@126.com

导师简介: 王向朝(1957—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电子技术方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn

比度会降低,工艺窗口会缩小,产品良率也将下降^[3]。投影物镜在实际使用过程中,波像差会因光源的加热和系统微震动等原因出现漂移,所以对波像差进行实时检测非常重要。多家光刻机研发单位分别开发了各自的波像差测量技术^[4~12]。目前常见的一类技术是基于空间像测量的波像差检测技术,典型的有 ASML 公司的 TAMIS 技术^[6,7]和 Nikon 公司的 Z37 AIS 技术^[8,9]。此类技术可以对集成在光刻机上的投影物镜的像质参数进行实时监测,在测量精度与速度上实现了较好的平衡,具有检测速度快和成本低等特点,适合实时检测投影物镜波像差。劳伦斯-伯克利美国国家实验室的 Miyakawa 等^[10]于 2012 年提出的基于空间像对比寻优的波像差检测技术可以应用于极紫外(EUV)光刻机的波像差测量。

2011 年, Duan 等^[11,12]提出了基于空间像主成分分析的光刻机投影物镜波像差原位检测技术(AMAI-PCA)。AMAI-PCA 通过主成分分析和线性回归分析的方法构建了空间像与泽尼克像差之间的线性关系模型,并根据该模型提取出表征投影物镜成像质量的泽尼克系数。相对于 TAMIS 技术和 Z37 AIS 技术,AMAI-PCA 在波像差的测量过程中不需要更换照明方式和掩模标记,可以更快速地测量波像差;此外,AMAI-PCA 利用空间像传感器(AIS)^[11]采集具有三维信息的空间像数据,不但包含检测标记空间像的位置移动信息,还包含空间像的形状改变信息,对波像差的灵敏度非常高,可以更高精度地测量波像差。AMAI-PCA 根据最小二乘法使用主成分对空间像进行拟合后计算得到主成分系数。最小二乘法(LSQ)是一种根据观测值估计真实值的数学优化算法。该算法应用的一个重要假定是^[13]:所建立的数学模型满足同方差性,即各观测值的随机误差都有相同的方差。如果所建立的数学模型不满足这一假定,则认为模型存在异方差性。用传统的最小二乘法估计存在异方差性的模型,得到的估计量不是有效估计量,甚至也不是渐近有效的估计量。由于 AMAI-PCA 采用 AIS 大面积地采集空间像光强,将会引入各类测量噪声,使得采集数据的随机噪声具有异方差性,所以,测量时需要降低空间像的噪声。常用的降噪方法是对空间像进行平滑滤波^[14],由于不同光刻机的噪声种类和强度不同,同一光刻机不同视场点的波像差种类和幅值也不同,不同视场点的空间像具有各自的细节,滤波器的平滑滤波算子等参数需要实时调整,增加了测量

过程的复杂性,同时平滑滤波存在卷积效果,造成空间像的膨胀和模糊,不利于高阶泽尼克系数的提取,使波像差检测精度降低。

为了消除空间像噪声对波像差测量的影响,本文提出了一种空间像自适应降噪的投影物镜波像差检测方法(AMAI-WLSQ),该方法以噪声标准差作为权重因子,采用加权最小二乘法(WLSQ)计算波像差,无需对原始空间像进行平滑滤波,可以实现空间像的自适应、无损降噪,从而提高了波像差检测的精度,降低了测量过程的复杂程度。

2 AMAI-WLSQ 原理

2.1 噪声模型

AMAI-WLSQ 方法使用空间像传感器 AIS 采集空间像。AIS 是一种点式光电探测器,每次只能采集一个像素大小的空间像光强(表示为空间像的一个像素)。AIS 嵌入在工件台中,通过移动工件台实现一幅空间像的扫描,其扫描路径如图 1(a)所示。

工件台的定位误差是空间像采集数据的主要误差来源之一。图 2 为图 1(b)在最佳焦面沿水平方向的光强分布。设光刻机工件台存在定位误差 ΔX ,使用 AIS 采集 X_0 位置空间像光强 $I(X_0)$ 时,得到的将是在 $X_0 - \Delta X$ 和 $X_0 + \Delta X$ 位置范围内光强的最小值 I_- 和最大值 I_+ 之间的随机光强。只要在待测位置 $X_0 \pm \Delta X$ 的范围内存在光强改变,该测量误差就存在,该区间内的光强变化量越大,测量误差的方差就越大。所以,在不同像素采集到的空间像的光强分布具有随机的测量误差,且该测量误差具有异方差性。

根据空间像采集误差的特点,建构了一种噪声模型公式:

$$\mathbf{I}' = \mathbf{I} + \mathbf{I}_{\text{noise}}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{I}' 为含有噪声的空间像光强分布, $\mathbf{I}_{\text{noise}}$ 为添加的噪声,该噪声符合 $\left[0, N_{\text{std}}\left(\mathbf{I}, \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial H}, \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial F}\right)\right]$ 高斯噪声的正态分布,其标准差与像素位置的光强以及光强梯度相关,噪声的期望为零; N_{std} 为噪声的标准差,由

$$N_{\text{std}}\left(\mathbf{I}, \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial H}, \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial F}\right) = a\mathbf{I} + b\left|\frac{\partial \mathbf{I}}{\partial H}\right| + c\left|\frac{\partial \mathbf{I}}{\partial F}\right| + \varepsilon. \quad (2)$$

定义,式中 \mathbf{I} 是不含噪声的理想空间像的光强; a , b 和 c 分别是 \mathbf{I} 的系数、 \mathbf{I} 对 H 方向偏导的系数以及 \mathbf{I} 对 F 方向偏导的系数,统称为噪声标准差的拟合系

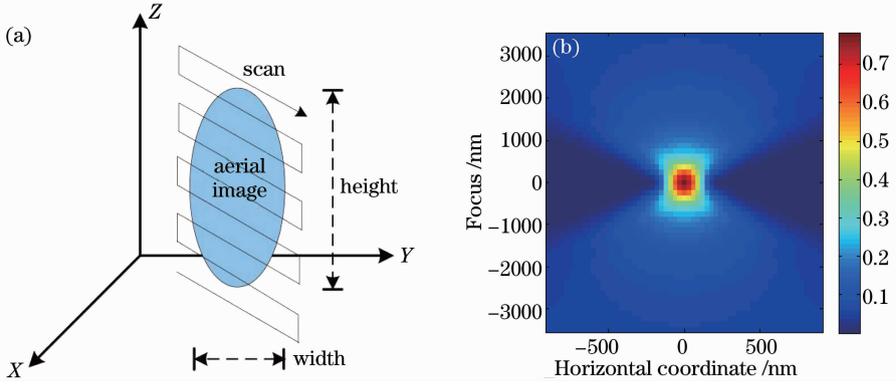


图 1 (a) AIS 扫描路径; (b) 理想空间像

Fig. 1 (a) Scanning path of AIS; (b) ideal aerial image

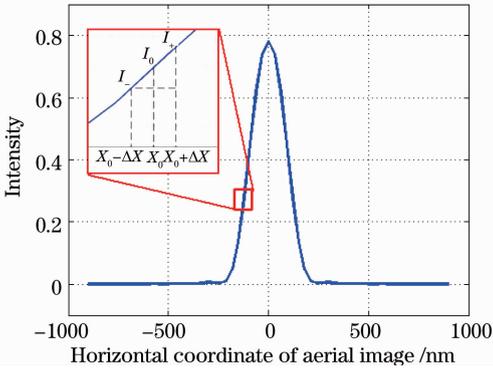


图 2 理想空间像在最佳焦面沿水平方向的光强分布

Fig. 2 Cross section along horizontal direction of ideal aerial image

数; $|\cdot|$ 算符是对其内各元素取正后得到的新矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是模型残差。

2.2 WLSQ 原理

AMAI-WLSQ 方法与 AMAI-PCA 方法^[11] 一样, 都是通过空间像的光强分布与泽尼克系数之间的线性关系测量波像差, 也都需要借助主成分分析的方法实现从空间像的光强分布到泽尼克系数之间的转换。空间像被分解为 m 阶主成分按照一定权重线性叠加的形式:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{P}_1 \quad \mathbf{P}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{P}_m] \begin{bmatrix} C_{P1} \\ C_{P2} \\ \vdots \\ C_{Pm} \end{bmatrix} + \mathbf{E}_T + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{A} 为维度为 n 的列向量, 表示空间像的光强分布, 其光强分布与泽尼克系数有关; \mathbf{P}_j 是维度为 n 的主成分列向量; C_{Pj} 为主成分系数, 表示主成分 \mathbf{P}_j 拟合空间像的权重, 它与泽尼克系数有关; \mathbf{E}_T 为舍位误差, 由于主成分是相互正交的, 空间像在各主成分上的投影结果: 主成分系数的测量不会受到舍位误差的影响; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是 n 维列向量, 表示空间像采集过程

中的随机误差, 也是主成分系数的主要误差来源。

根据 2.1 节所述, 由于空间像各像素的随机误差具有异方差性:

$$\text{Var}(\boldsymbol{\varepsilon}) = \begin{bmatrix} a_1^2 \\ a_2^2 \\ \vdots \\ a_n^2 \end{bmatrix} \sigma^2, \quad a_i \neq a_j \quad (4)$$

式中 Var 表示方差运算, σ 为 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 各元素标准差的最大公约数, 所以基于最小二乘法的主成分分析已经不再适用^[13]。本文提出采用加权最小二乘法的主成分分析进行主成分系数的计算。对 (3) 式左乘一个权重因子 \mathbf{W} :

$$\mathbf{W} \cdot \mathbf{A} \cong \mathbf{W} [\mathbf{P}_1 \quad \mathbf{P}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{P}_m] \cdot \begin{bmatrix} C_{P1} \\ C_{P2} \\ \vdots \\ C_{Pm} \end{bmatrix} + \mathbf{W}\boldsymbol{\varepsilon}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{W} 为一个维度为 $n \times n$ 的方阵, 它与空间像采集的随机误差 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 有关。由于舍位误差不影响主成分系数 C_p 的求解, 所以 (5) 式省略了舍位误差。根据加权最小二乘法原理, $\mathbf{W}\boldsymbol{\varepsilon}$ 的方差的各个元素相等, 即

$$\text{Var}(\mathbf{W}\boldsymbol{\varepsilon}) = \mathbf{W}^2 \begin{bmatrix} a_1^2 \\ a_2^2 \\ \vdots \\ a_n^2 \end{bmatrix} \sigma^2 = \mathbf{C}, \quad a_i \neq a_j \quad (6)$$

式中 \mathbf{C} 是 n 维元素相等的列向量。由 (6) 式可得

$$\mathbf{W}^2 = \frac{\mathbf{C}}{\sigma^2} \begin{bmatrix} 1/a_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1/a_2^2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1/a_n^2 \end{bmatrix}_{n \times n}, \quad a_i \neq a_j \quad (7)$$

式中最简单的情况是令 \mathbf{C} 的各元素等于 1, 此时权

重因子 \mathbf{W} 等于 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的标准差的倒数。 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的标准差可以通过对空间像进行多次重复采集计算得到。假设对同一幅空间像进行 s 次重复采集,采集过程中光刻机的各参数设置保持不变。这样采集得到的空间像在相同像素位置的光强值具有相关性。将采集到的 s 幅空间像 $\mathbf{A}_{m1}, \mathbf{A}_{m2}, \mathbf{A}_{m3}, \dots, \mathbf{A}_{ms}$ 分别转化为列向量的形式 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \dots, \mathbf{a}_s$, 并计算其标准差 n_{std} :

$$\mathbf{A}_{mj} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1c} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2c} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{l1} & p_{l2} & \dots & p_{lc} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a}_j = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix}, \quad n = lc \quad (8)$$

将 n_{std} 转化为权重因子 \mathbf{W} , \mathbf{W} 是以列向量 n_{std} 各元素倒数组成的对角阵:

$$n_{\text{std}} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \sigma, \quad \mathbf{W} = \frac{1}{\sigma} \begin{bmatrix} 1/a_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/a_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1/a_n \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (9)$$

基于(9)式中的权重因子,利用加权最小二乘法计算主成分系数:

$$\mathbf{C}_{Pj} = (\mathbf{P}_j^T \mathbf{W} \mathbf{P}_j)^{-1} \cdot (\mathbf{P}_j^T \mathbf{W} \mathbf{a}), \quad (10)$$

式中 \mathbf{C}_{Pj} 为利用加权最小二乘法算得的空间像 \mathbf{a} 的第 j 个主成分 \mathbf{P}_j 的主成分系数。该主成分系数与泽尼克系数直接相关,两种系数之间的关系可以通过多元线性回归分析获得:

$$\begin{bmatrix} C_{P1} \\ C_{P2} \\ \vdots \\ C_{Pm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{R}_m \end{bmatrix} \mathbf{Z} + \mathbf{E}_R, \quad (11)$$

式中 \mathbf{Z} 是造成空间像的光强分布变化的泽尼克系数,表征投影物镜的成像质量; \mathbf{R}_j 为回归矩阵,表示主成分系数 C_{Pj} 与泽尼克系数 \mathbf{Z} 之间的线性关系; \mathbf{E}_R 为回归分析误差。

在建立空间像的光强分布与泽尼克系数之间线性关系模型的过程中^[11],通过 Box-Behnken 设计^[15]对泽尼克空间进行采样,利用光刻仿真软件 PROLITH^[16]生成空间像,然后对空间像进行主成分分析^[17],得到主成分 \mathbf{P} 和其主成分系数 \mathbf{C}_P ,再根据(11)式对主成分系数和泽尼克系数进行多元线性回归分析解得回归矩阵 \mathbf{R} 。在求解的过程中,利用提出的加权最小二乘主成分分析方法对实际采集的空间像进行分析得到主成分系数,再利用建模过程中得到的回归矩阵 \mathbf{R} 即可求解待测泽尼克系数。

3 数值仿真和实验

3.1 噪声模型参数标定

为标定噪声模型参数,并对噪声模型进行验证,设计了验证实验。在光刻实验平台(ArF,投影物镜的数值孔径等于 0.75)上采集空间像,并对空间像的噪声进行提取和分析。

对光刻机投影物镜视场中心位置的空间像进行 20 次重复采集。耗时约 3 min。可以认为在 3 min 内,投影物镜的波像差不会发生改变。如果空间像不含有噪声,那么 20 幅空间像基本一致,其标准差为零;如果含有噪声,则可计算得到噪声的标准差。测量结果如图 3 所示,噪声的标准差在空间像光强变化平缓的位置基本为零,光强变化迅速的位置,噪声的标准差也越大。

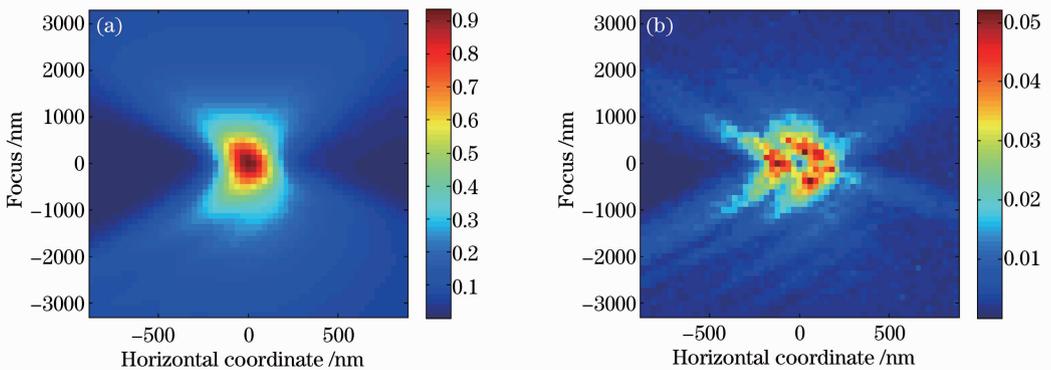


图 3 (a) 20 幅实测空间像的平均值;(b) 实测空间像的标准差
Fig. 3 (a) Average and (b) standard deviation of 20 actually measured aerial images

对噪声标准差进行进一步分析。图 4(a) 所示为最佳焦面 ($F=0$) 位置空间像横截面的光强分布。图 4(b) 所示为 $H=0$ 的空间像纵截面的光强分布。由图 4(a) 和图 4(b) 可知, 噪声标准差最大的位置在光强轮廓线的最陡处, 说明噪声与空间像光强的梯

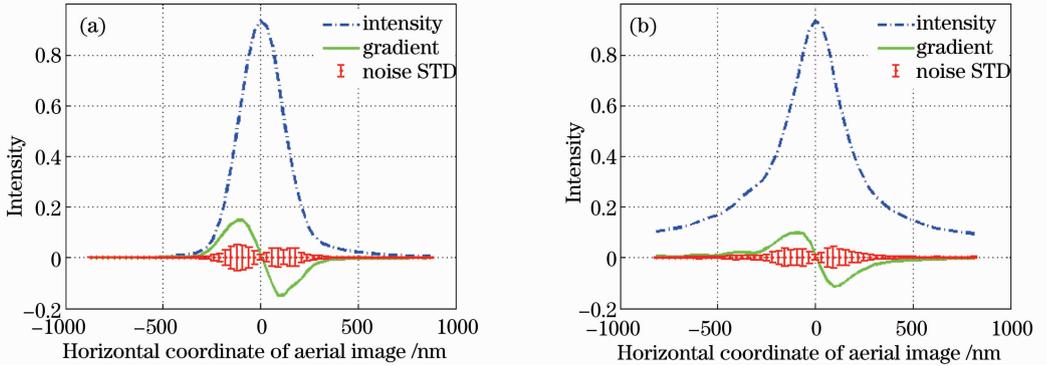


图 4 光强、光强梯度和噪声标准差曲线。(a) 水平方向光强分布; (b) 垂直方向光强分布

Fig. 4 Intensity, intensity gradient and noise standard deviation curve along (a) Horizontal coordinate; (b) focus coordinate of aerial image

为了标定实验平台的噪声标准差拟合系数, 利用实测空间像, 根据(2)式拟合噪声标准差。由于空间像光强分布所在各像素的噪声是随机的, 噪声的期望值为零。因此, 可以用 20 幅重复采集的空间像的平均值, 如图 3(a) 所示, 近似为理想的空间像 I 。根据(2)式拟合实测噪声标准差的结果, 如图 5 所示, 噪声标准差的拟合系数 $a=0.0071, b=0.2181, c=0.2473$ 。残差 ϵ_r 主要包含了空间像的光强分布

度有关。该结果与光刻机工件台的定位精度有关, 由于工件台存在 10 nm 左右的定位随机误差, 造成采集得到的光强不能准确对应 AIS 的相同像素位置, 这种现象在光强变化剧烈的位置尤其显著。该实验结果验证了前文关于噪声标准差模型的分析结果。

对坐标方向的高阶偏导以及 AIS 的散粒噪声和热噪声等, 其均方根值 (R_{MS}) 为 0.0015。实测噪声标准差 [如图 5(a) 所示] 和利用模型计算得到的噪声标准差 [如图 5(b) 所示] 的分布形状非常匹配, 相关系数达到 0.9797, 该结论验证了噪声标准差模型的正确性。在下面的数值仿真过程中, 将利用这里标定的噪声标准差拟合系数 a, b 和 c 进行噪声模拟。

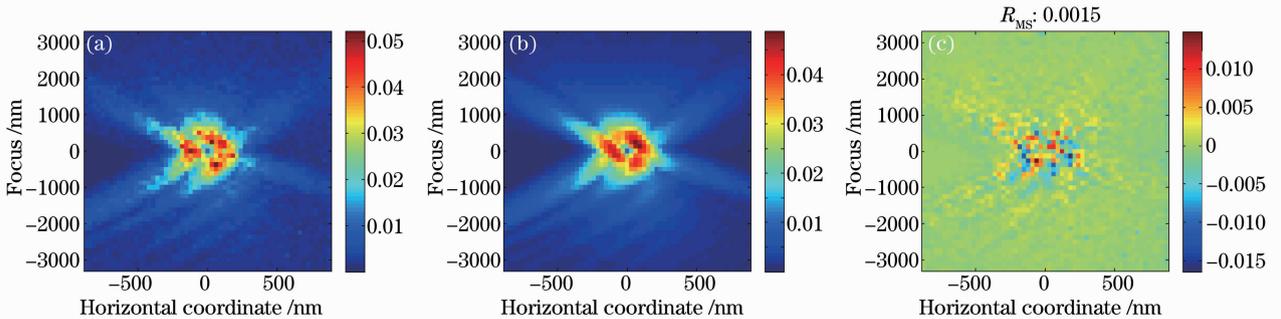


图 5 (a) 实测噪声标准差; (b) 利用噪声模型计算得到的标准差; (c) 残差 ϵ_r

Fig. 5 (a) Standard deviation of actually measured noise; (b) standard deviation of fitted noise; (c) residual ϵ_r

3.2 数值仿真

为了验证上述方法的准确性, 分步研究波像差的提取过程。比较分析主成分系数的测量精度, 然后比较分析泽尼克系数的测量精度。测试使用 0° 和 90° 两个方向的检测标记, 检测标记是线宽 250 nm, 周期 3000 nm 的孤立空, 使用部分相干因子为 0.65 的传统照明方式。

按照(4)式和(5)式建立空间像光强分布与泽尼

克系数之间的线性模型。图 6 所示是测试模型 0° 方向检测标记的前五阶主成分, 90° 方向检测标记的前五阶主成分与 0° 方向检测标记的前五阶主成分一致。主成分 P_1 是空间像光强分布的直流分量, 主成分 P_2 和 P_3 分别表示空间像的光强分布在水平和垂直方向上的偏导, 主成分 P_4 和 P_5 分别表示空间像的光强分布在水平和垂直方向上的二阶偏导^[15]。图 7 所示是两个方向检测标记前五阶主成分系数的

回归矩阵,可以看出,0°方向的 C_{P_2} 和 C_{P_4} 均与 Z_7 和 Z_{14} 相关,90°方向的 C_{P_2} 和 C_{P_4} 均与 Z_8 和 Z_{15} 相关,两个方向的 C_{P_3} 和 C_{P_5} 均与 Z_9 和 Z_{16} 相关。因此,如果

某项主成分系数的测量含有误差,将直接影响对应项的泽尼克系数的测量精度。

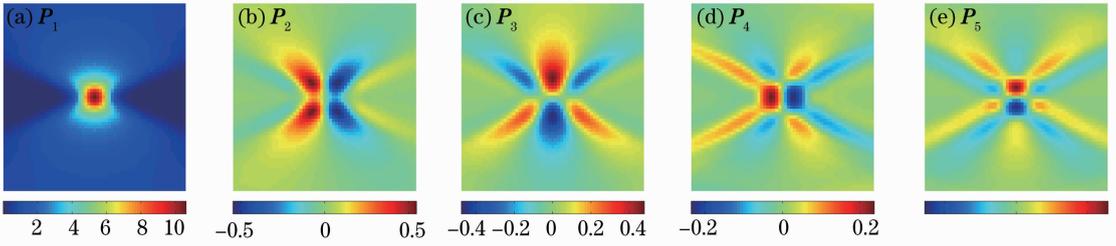


图 6 测试模型 0°方向检测标记的前五阶主成分

Fig. 6 The first 5 order principal components of 0° orientation mark of the tested model

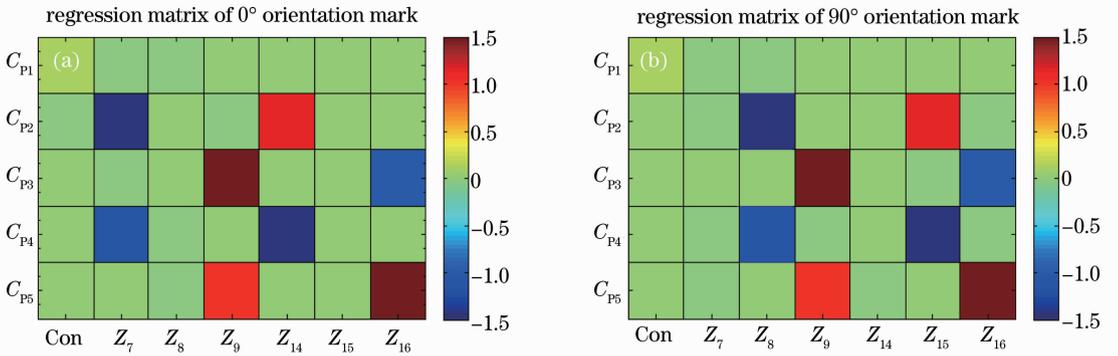


图 7 前 5 阶主成分系数的回归矩阵

Fig. 7 Regression matrix of the first 5 order principal-component coefficients

测试中,取幅值范围在 $\pm 0.1\lambda$ 内随机分布的低阶像差 $Z_7, Z_8, Z_9, Z_{14}, Z_{15}$ 和 Z_{16} 作为光瞳波像差的仿真输入,通过国际公认的光刻机仿真软件 PROLITH^[16],生成一组不含噪声的理想空间像。因为理想空间像得到的波像差精度非常高,所以可以将该理想空间像得到的主成分系数作为标准的主成分系数,再将 AMAI-PCA 计算的主成分系数和 AMAI-WLSQ 计算的主成分系数与之比较。

图 8 列举了 0°方向检测标记前 15 项主成分系数的计算结果。图 8(a)为 3 种算法求解的主成分系数值的比较,Ideal 表示使用图 6 中的主成分直接拟合理想空间像得到的主成分系数;LSQ 表示使用最小二乘法的 AMAI-PCA 计算含有噪声的空间像得到的主成分系数;WLSQ 表示使用加权最小二乘法的 AMAI-WLSQ 计算含有噪声的空间像得到的主成分系数。图 8(b)表示 LSQ 和 WLSQ 两种算法计算主成分系数的误差。可以看出,除第 11 和第 14 两项主成分数值 WLSQ 的误差略大于 LSQ 之外,WLSQ 对其余各项主成分系数的测量均取得

了更高的精度。

图 9 是使用前 15 阶主成分和主成分系数重构的空间像与 PROLITH 仿真的理想空间像的比较。其中,使用 LSQ 方法重构的空间像与理想空间像相比含有较大的残差,其残差均方根值为 0.0012;使用 WLSQ 方法重构的空间像与理想空间像相比残差较小,其残差均方根值为 0.0007。从图 9 中可以看出,使用 LSQ 方法重构空间像的残差分布形状与图 6 中的 P_2 和 P_4 主成分分布形状相似,说明该残差与空间像在水平方向的梯度分量相关,是由水平梯度方向的噪声造成的,该结论验证了前面关于噪声表征形式和噪声影响的分析。另外,按照主成分分析的原理^[17],阶次序号越小的主成分在样本空间中所占的权重越大,对应回归矩阵的拟合优度越高,因此当低阶主成分系数含有测量误差时,对泽尼克系数测量精度的影响更加明显。所以,从残差的分布形状可以预测使用 LSQ 方法计算与 C_{P_2} 和 C_{P_4} 相关的 Z_7 和 Z_{14} 时,误差将明显大于使用 WLSQ 方法计算的结果。

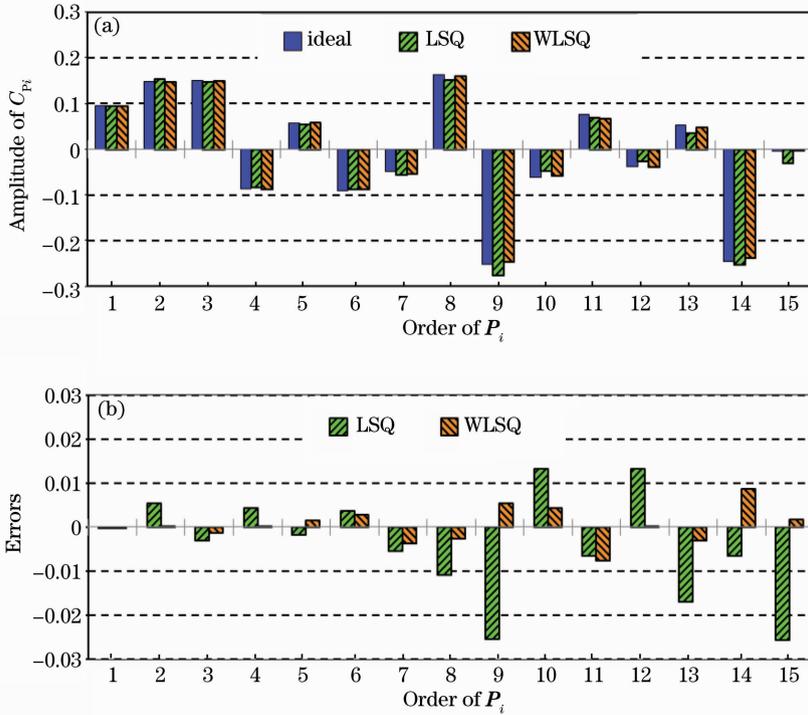


图 8 (a)主成分系数测量结果;(b)主成分系数测量误差

Fig. 8 (a) Principal component coefficients; (b) errors of principal component coefficients

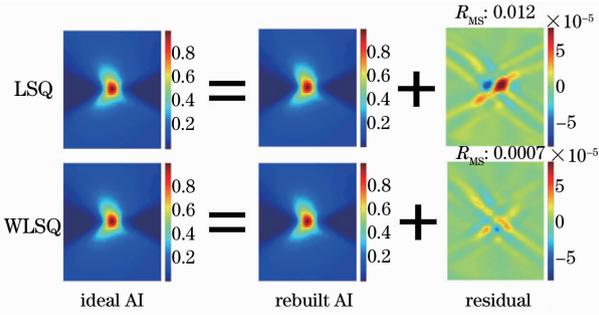


图 9 重构空间像对比

Fig. 9 Comparison of reconstructed aerial images

在上述工作的基础上,根据 LSQ 和 WLSQ 两种方法计算得到的主成分系数中提取泽尼克系数,计算结果如图 10 所示。图 10(a)为泽尼克系数的测量结果,图 10(b)为输入光刻仿真软件 PROLITH 光瞳面的波像差,其均方根值为 11.1 nm。LSQZ 表示使用最小二乘法的 AMAI-PCA 方法计算得到的泽尼克像差值,WLSQZ 表示使用加权最小二乘法的 AMAI-WLSQ 方法计算得到的泽尼克像差值。与输入值比较可以看出,使用 WLSQ 方法得到的测量误差除 Z_{15} 外,均小于使用 LSQ 方法得到的测量误差。其中 Z_7 和 Z_{14} 的测量精度在使用 WLSQ 方法后得到

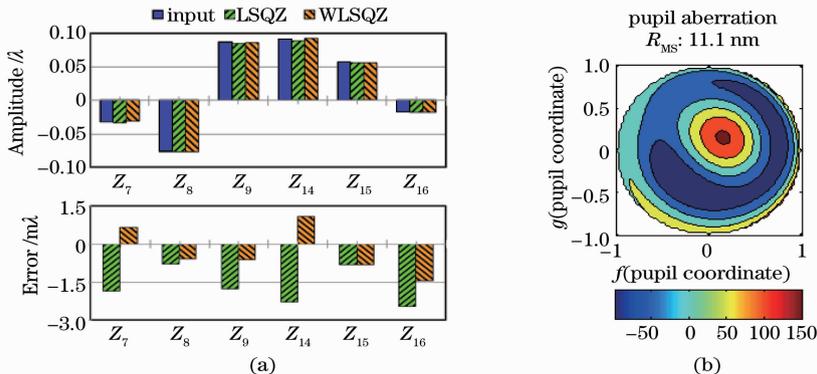


图 10 (a)泽尼克系数测量结果;(b)待测光瞳

Fig. 10 (a) Comparison of Zernike coefficients measurement results; (b) aberration pupil for testing

了明显改善,该结论验证了前文关于主成分系数测量结果的分析。两种方法计算得到最大的误差均发生在 Z_{16} ,使用LSQ方法计算的误差为 $-2.3 \text{ m}\lambda$,使用WLSQ方法计算的误差为 $-1.5 \text{ m}\lambda$,后者精度较前者提高 53%。

3.3 实验

为了进一步验证使用加权最小二乘法的 AMAI-WLSQ 方法的有效性,在光刻机实验平台 (ArF, $NA=0.75$) 上开展了像差漂移量检测实验。光刻机实验平台架构示意图如图 11 所示。实际光刻机中,可以通过调整可调透镜的位置参数,准确地

改变投影物镜某些波像差 (Z_5, Z_7, Z_8 和 Z_9) 值的大小。以 Z_8 为例进行波像差漂移量测量实验。实验中使 Z_8 在曝光视场内漂移 -5 nm ,并在调整前后分别采集 9 个视场点的空间像,每个视场点重复采集 20 次。分别采用使用加权最小二乘法的 AMAI-WLSQ 和使用最小二乘法的 AMAI-PCA 两种不同的方法对调整前后的 9 个视场点进行波像差检测。将调整前后的波像差相减就可以得到两种方法像差漂移量检测结果。

像差漂移量检测结果如图 12 所示。图 12(a)~(c) 分别为使用LSQ方法测量 Z_8 调整前后的像差

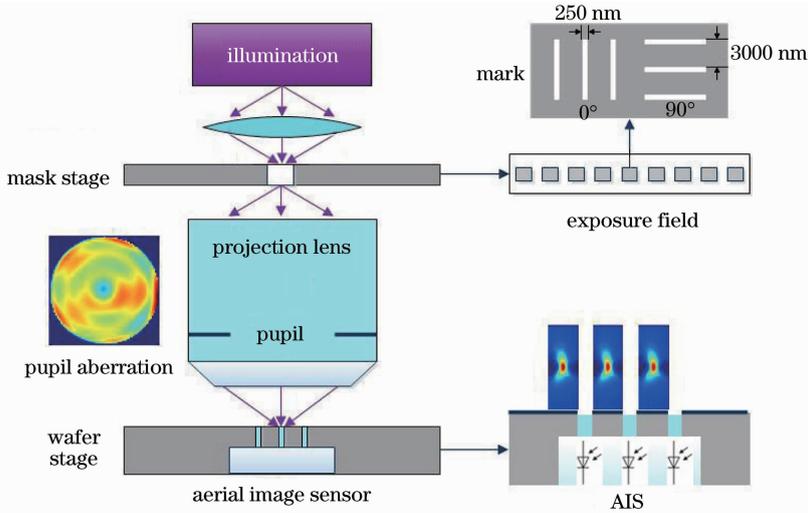


图 11 实验系统结构示意图

Fig. 11 Schematic diagram of aerial images measurement system

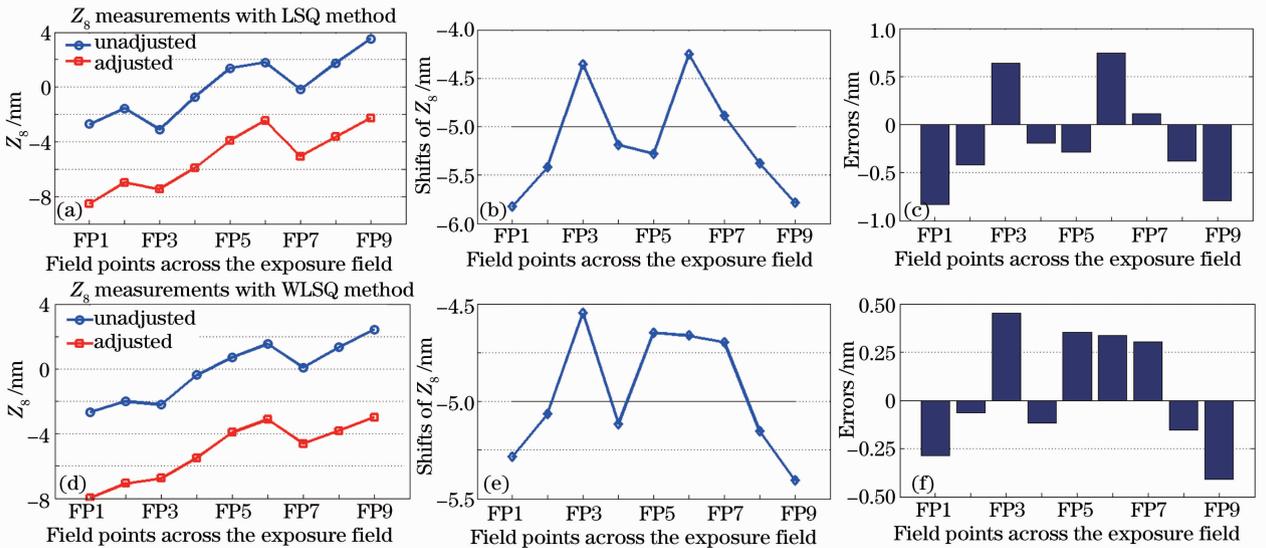


图 12 使用LSQ方法测量 Z_8 调整前后的(a)像差值; (b)像差漂移量; (c)测量误差值; 使用WLSQ方法测量 Z_8 调整前后的(d)像差值; (e)像差漂移量; (f)测量误差值

Fig. 12 (a) Aberrations, (b) aberration shifts and (c) errors measured with LSQ method; (d) aberrations, (e) aberration shifts; (f) errors measured with WLSQ method

值、像差漂移量和测量误差值,其中最大误差约为 0.76 nm,9 个视场点误差的均方根为 0.55 nm。图 12(d)~(f)分别为使用 WLSQ 方法测量 Z_8 调整前后的像差值、像差漂移量和测量误差值,其中最大误差不到 0.5 nm,9 个视场点误差的均方根为 0.34 nm,平

均测量精度提高 50%。此外,两种方法测量误差的分布形状很接近,但使用 WLSQ 方法测量结果误差的幅值更小,说明 WLSQ 方法抑制了噪声的影响。同时,从图 13 中可以看出,WLSQ 方法测量像差的重复性(1σ)优于 1.5 nm,相比使用 LSQ 方法提高 30%。

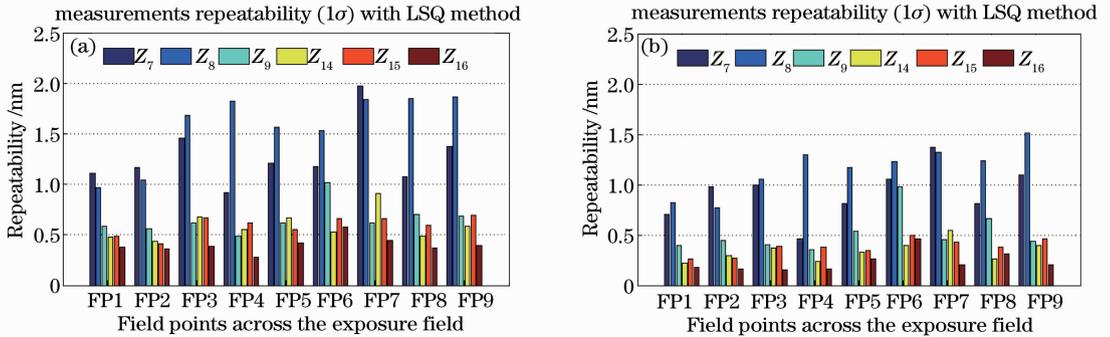


图 13 (a) LSQ 方法和(b) WLSQ 方法的重复性

Fig. 13 Repeatability with (a) LSQ method and (b) WLSQ method

AMAI-WLSQ 方法分为建模和测量两个过程,其中建模过程在该方法研发过程中已经完成,在波像差的实测过程中,模型可以无限次地被调用,可以不计为测量耗时;测量过程的主要耗时为光刻机的参数设置时间、空间像的采集时间以及波像差的提取时间,本研究中,单幅空间像的波像差平均提取时间约为 9 s,可以满足投影物镜波像差原位检测的需求。

4 结 论

提出了 AMAI-WLSQ 方法,建构了空间像的噪声模型。AMAI-WLSQ 方法可以实现对空间像的自适应、无损降噪,使泽尼克系数的测量精度得到较大程度的提高。PROLITH 的测试结果表明,在相同的噪声水平下,0.1λ 像差幅值内,与 AMAI-PCA 技术相比,AMAI-WLSQ 方法测量波像差的精度提高 30%以上。在使用光刻实验平台测量 Z_8 调整量的实验中,AMAI-WLSQ 方法测量调整量的精度更高。单幅空间像的波像差平均测量时间约为 9 s,可满足在线测量的要求。

参 考 文 献

- 1 A. Erdmann, M. Arnz. The impact of aberration averaging during step-and-scan on the photolithographic process [J]. *Microelectron. Eng.*, 1998, **41**(42): 117~120
- 2 Ma Mingying, Wang Xiangzhao, Wang Fan *et al.*. Novel method for measuring coma with fine overlay test marks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1037~1042
马明英, 王向朝, 王帆等. 基于套刻误差测试标记的彗差检测技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1037~1042
- 3 P. Graeupner, R. B. Garreis, A. Goehnermeier *et al.*. Impact of wavefront errors on low kl processes at extremely high NA

- [C]. *SPIE*, 2003, **5040**: 119~130
- 4 Wang Fan, Wang Xiangzhao, Ma Mingying *et al.*. On-site coma measurement technique based on linewidth asymmetry of the aerial image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 673~678
王帆, 王向朝, 马明英等. 基于双线空间像线宽不对称度的彗差测量技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 673~678
- 5 B. Peng, X. Wang, Z. Qiu *et al.*. Aberration-induced intensity imbalance of alternating phase-shifting mask in lithographic imaging[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(9): 1404~1406
- 6 H. van der Laan, M. Dierichs, H. van Greevenbroek *et al.*. Aerial image measurement methods for fast aberration set-up and illumination pupil verification[C]. *SPIE*, 2001, **4346**: 394~407
- 7 Z. Qiu, X. Wang, Q. Yuan *et al.*. Coma measurement by use of an alternating phase-shifting mask mark with a specific phase width[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(2): 261~269
- 8 T. Hagiwara, N. Kondo, I. Hiroshi *et al.*. Development of aerial image based aberration measurement technique[C]. *SPIE*, 2005, **5754**: 1659~1669
- 9 W. Liu, S. Liu, T. Zhou *et al.*. Aerial image based technique for measurement of lens aberrations up to 37th Zernike coefficient in lithographic tools under partial coherent illumination[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(21): 19278~19291
- 10 R. Miyakawa, P. Naulleau. Aerial image monitor for wavefront metrology of high-resolution EUV lithography tools[C]. *SPIE*, 2012, **8322**(18): 1~7
- 11 L. Duan, X. Wang, A. Bourov *et al.*. In situ aberration measurement technique based on principal component analysis of aerial image[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(19): 18080~18090
- 12 L. Duan, X. Wang, G. Yan *et al.*. Practical application of AMAI-PCA to measure wavefront aberration of lithographic lens [J]. *J. Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS (JM3)*, 2012, **11**(2): 023009
- 13 J. O. Rawlings, S. G. Pantula, D. A. Dickey. Applied Regression Analysis: A Research Tool [M]. New York: Springer-Verlag Press, 2nd ed. 1998. 411~417
- 14 R. C. Gonzalez, R. E. Woods. Digital Image Processing[M]. New Jersey: Prentice Hall Press, 3rd ed. 2008. 93~97
- 15 G. Box, D. Behnken. Some new three level designs for the study of quantitative variables[J]. *Technometrics*, 1960, **2**(4): 455~475
- 16 KLA-Tencor. Software package Prolith v8.0.3
- 17 I. T. Jolliffe. Principal Component Analysis[M]. New York: Springer Press, 2nd ed. 2002. 150~165