

微透镜阵列衍射效应对夏克-哈特曼波前探测器的影响分析

朱沁雨 陈梅蕊 陆焕钧 樊丽娜 彭建涛 孙会娟 徐国定 毛红敏 曹召良

Analysis of influence of diffraction effect of microlens array on Shack-Hartmann wavefront sensor

ZHU Qin-yu, CHEN Mei-rui, LU Huan-jun, FAN Li-na, PENG Jian-tao, SUN Hui-juan, XU Guo-ding, MAO Hong-min, CAO Zhao-liang

引用本文:

朱沁雨, 陈梅蕊, 陆焕钧, 樊丽娜, 彭建涛, 孙会娟, 徐国定, 毛红敏, 曹召良. 微透镜阵列衍射效应对夏克-哈特曼波前探测器的影响分析[J]. *中国光学*, 2023, 16(1): 94-102. doi: 10.37188/CO.2022-0176

ZHU Qin-yu, CHEN Mei-rui, LU Huan-jun, FAN Li-na, PENG Jian-tao, SUN Hui-juan, XU Guo-ding, MAO Hong-min, CAO Zhao-liang. Analysis of influence of diffraction effect of microlens array on Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 94-102. doi: 10.37188/CO.2022-0176

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0176>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光学微透镜阵列模压成形研究进展与展望

Advances and prospects of molding for optical microlens array

中国光学 (中英文). 2017, 10(5): 603 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0603>

太阳辐射计的衍射效应修正

Diffraction effect correction of solar radiometer

中国光学 (中英文). 2018, 11(5): 851 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0851>

紫外增强硅基成像探测器进展

Silicon-based ultraviolet photodetection: progress and prospects

中国光学 (中英文). 2019, 12(1): 19 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0019>

点衍射干涉检测技术

Point diffraction in interference detection technology

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 391 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0391>

集成PIN光敏元的CMOS探测器光电响应特性研究

Study on the photo response of a CMOS sensor integrated with PIN photodiodes

中国光学 (中英文). 2019, 12(5): 1076 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1076>

横向收集结构锗硅半导体雪崩探测器的设计研究

Design and research of Ge/Si avalanche photodiode with a specific lateral carrier collection structure

中国光学 (中英文). 2019, 12(4): 833 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0833>

文章编号 2097-1842(2023)01-0094-09

微透镜阵列衍射效应对夏克—哈特曼波前探测器的影响分析

朱沁雨^{1,2}, 陈梅蕊^{1,2}, 陆焕钧^{1,2}, 樊丽娜^{1,2}, 彭建涛³, 孙会娟⁴, 徐国定^{1,2}, 毛红敏^{1,2*}, 曹召良^{1,2*}

(1. 苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏苏州 215009;

2. 江苏省微纳热流技术与能源应用重点实验室, 江苏苏州 215009;

3. 中国航天科技集团公司上海卫星工程研究所, 上海 201109;

4. 北京联合大学数理部, 北京 100101)

摘要: 微透镜阵列的衍射效应会影响夏克—哈特曼波前探测器的探测精度。本文根据惠更斯-菲涅耳衍射理论建立二维微透镜阵列衍射模型, 模拟分析使用理想平行光入射微透镜阵列时在焦平面产生的二维衍射光斑阵列。然后, 通过计算衍射光斑偏移一个像素的过程中质心的误差, 确定最大质心计算误差。接着, 利用模式法进行波前重构, 获得波前探测误差。仿真结果显示: 在偏移 0.21 和 0.79 个像素, 即波面偏转 0.03° 和 0.13° 时, 衍射导致的波前误差最大为 0.125λ 。最后, 实验验证了该误差计算方法的有效性。该研究结果可为夏克—哈特曼波前探测器的设计提供理论依据。

关键词: 哈特曼波前探测器; 微透镜阵列; 衍射效应; 波前重构; 探测误差

中图分类号: O436.1 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0176

收稿日期: 2022-08-05; 修订日期: 2022-09-06

基金项目: “十四五”江苏省重点学科资助项目(No. 2021135); 中国航天科技集团公司第八研究院产学研合作基金资助项目(No. SAST2020-025); 北京联合大学科研项目资助(No. ZK70202007); 江苏省自然科学基金青年基金项目(No. BK20220640); 江苏省基础科学(自然科学)研究面上项目(No. 22KJB150011)

Supported by the Jiangsu Key Disciplines of the Fourteenth Five-Year Plan (No. 2021135); Industry-University-Institute Cooperation Foundation of the Eighth Research Institute of China Aerospace Science and Technology Corporation (No. SAST2020-025); Academic Research Projects of Beijing Union University (No. ZK70202007); the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20220640); the Natural Science Foundation of Jiangsu Higher Education Institutions (No. 22KJB150011)

Analysis of influence of diffraction effect of microlens array on Shack-Hartmann wavefront sensor

ZHU Qin-yu^{1,2}, CHEN Mei-rui^{1,2}, LU Huan-jun^{1,2}, FAN Li-na^{1,2}, PENG Jian-tao³, SUN Hui-juan⁴,
XU Guo-ding^{1,2}, MAO Hong-min^{1,2,*}, CAO Zhao-liang^{1,2,*}

(1. *Suzhou University of Science and Technology, School of Physical
Science and Technology, Suzhou 215009, China;*

2. *Jiangsu Key Laboratory of Micro and Nano Heat Fluid Flow
Technology and Energy Application, Suzhou 215009, China;*

3. *Shanghai Institute of Satellite Engineering, China Aerospace Science and Technology
Corporation, Shanghai 201109, China;*

4. *Institute of Mathematics and Physics, Beijing Union University, Beijing 100101, China)*

* *Corresponding author, E-mail: hongminmao@mail.usts.edu.cn; caozl@usts.edu.cn*

Abstract: The diffraction effect of microlens array will affect the detection accuracy of Shack-Hartmann wavefront sensor. Based on Huygens-Fresnel diffraction theory, a two-dimensional microlens array diffraction model is established to simulate and analyze the two-dimensional diffraction spot array generated in the focal plane when the ideal parallel light is incident on the microlens array. First, the maximum centroid calculation error is determined by calculating the centroid error in the process of diffraction spot shifting by one pixel. Then the wavefront is reconstructed by using the modal method to obtain the wavefront detection error. The simulation results show that the maximum wavefront error caused by diffraction is 0.125λ at 0.21 and 0.79 pixels offset, that is, when the wavefront deflection is 0.03° and 0.13° . Finally, an experiment is performed to verify the effectiveness of the error calculation method. This work provides a theoretical basis for the design of shack-Hartmann wavefront detector.

Key words: shack-hartmann wavefront sensor; microlens array; diffraction effect; wavefront reconstruction; detection error

1 引 言

夏克—哈特曼波前探测器能够同时测量出光场的相位分布和强度分布^[1], 具有结构简单、光能利用率高、操作便捷等优点, 被广泛应用于激光光束诊断、人眼像差测量、大气扰动测量^[2-4]以及自适应光学^[5,6]等领域。

为了提高哈特曼探测器的波前探测精度, 研究者对优化质心算法、降低噪声影响、高精度提取质心做了深入的研究。目前常用的提高质心计算精度的方法主要有调整探测窗口和选取合适的阈值^[7]。例如: Prieto 等人提出了迭代缩小探测窗口尺寸的质心探测方法^[8]; 李晶等提出了结合图像抑噪、探测窗口和阈值选取的光斑质心探测方

法, 用于进行高精度质心探测, 可以满足低动态范围的高精度光学系统检测需要^[9]; 师亚萍、刘缠牢采用与光斑尺寸匹配的探测窗口及插值法提高了图像的分辨率, 并使用二阶矩算法计算质心位置, 从而提高了质心探测精度^[10]; 李旭旭等人提出了一种基于统计排序的局部自适应阈值分割方法, 能够更有效地分割出阵列光斑, 减小背景噪声对质心估计的影响, 降低波面复原误差^[11]。除此之外, Baik 等人提出了幂指数质心探测算法^[12], 将生成每个像素的灰度值进行乘方计算来代替原本灰度图本身, 以加大噪声与光斑的对比度, 从而更精确地求出质心坐标。

上述研究都是通过对图像做整体性的处理, 消除图像获取过程中杂散光、背景噪声以及其他随机噪声等, 从而提升波前探测精度。由于微透

镜的尺寸通常在百微米量级,存在明显的衍射效应。Patrick 等分析了衍射效应对微透镜焦距的影响^[13]。衍射效应不仅会改变微透镜的焦距,其还会改变焦平面的光强分布,从而影响质心计算精度和波前重构精度。为此,本文根据惠更斯-菲涅耳衍射理论建立二维微透镜阵列衍射模型,在此基础上,计算分析衍射效应对光斑质心位置和波前探测误差的影响,并进行实验验证。

2 哈特曼探测器的工作原理

哈特曼探测器主要由微透镜阵列和 CCD 构成,它通过计算入射波经过微透镜在焦面上形成的光斑质心和斜率来拟合波前,从而得到波前的相位信息^[14-15]。当入射光经过 $N \times N$ 的微透镜阵列时,被微透镜阵列分割成 $N \times N$ 个大小相同的子孔径,每个子孔径内的光波在焦面上各自的区域内成像,形成光斑分布图。当入射波为理想的平面波时,在焦面上各区域中心形成分布均匀的光斑,如果入射波为畸变波,在焦面上形成的光斑则会偏离中心位置^[16]。对于每个子孔径光斑偏移量的计算如下:首先,用平行光标定参考质心的坐标;再用待测波面入射计算光斑质心位置,根据质心偏移量即可计算出波前斜率;单个子孔径的光斑质心偏移情况如图 1 所示。

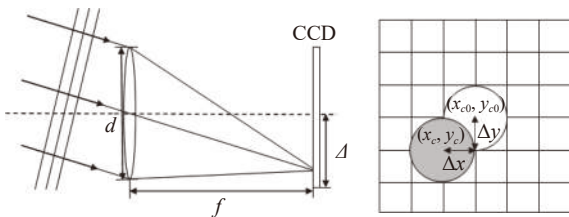


图 1 单个子孔径光斑质心计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single subaperture spot centroid calculation

单个子孔径对应局部波前 x 方向和 y 方向上的斜率分别为 s_x, s_y , 计算公式如下:

$$\begin{aligned} s_x &= \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\Delta x}{f} \\ s_y &= \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\Delta y}{f} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, Φ 为波前相位, f 为焦距, $\Delta x, \Delta y$ 分别为计算得到的光斑质心 (x_c, y_c) 与参考光斑质心 (x_{c0}, y_{c0}) 的偏移量, 即

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_c - x_{c0} \\ \Delta y &= y_c - y_{c0} \end{aligned} \quad (2)$$

根据每个子孔径计算出的斜率, 就可以利用 Zernike 多项式快速重构出波面。

3 衍射效应对质心计算精度的影响

3.1 二维微透镜阵列衍射模型

微透镜阵列的单个微透镜口径通常在百微米量级, 因此会产生明显的衍射效应, 如图 2 所示。理想平面波经过每个微透镜后成为会聚球面波, 在焦面上形成衍射光斑。根据惠更斯-菲涅耳原理^[17] 求微透镜阵列的衍射光强分布, 即空间上某一点 P 的振幅可由该波面上各点发出的子波在该点处叠加后的合振幅 $E(P)$ 来表示, 其积分公式为:

$$E(P) = E_Q \iint_{\Sigma} \frac{\exp(ikr)}{r} d\sigma \quad (3)$$

其中 E_Q 为球面波上任一点 Q 的复振幅, r 为 PQ 之间的距离, 在坐标 (x, y) 处的离散形式为:

$$E(P) = E_Q \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \frac{\exp(ikr)}{r} \quad (4)$$

该点光强可由 $I(P) = |E(P)|^2$ 表示。

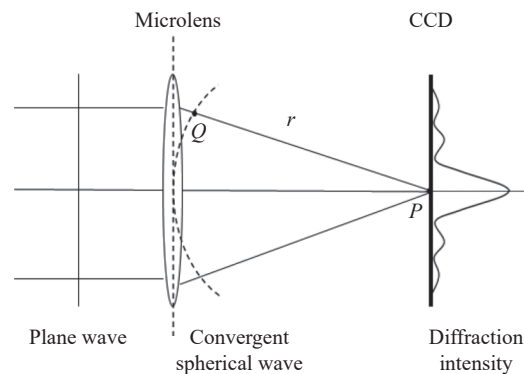


图 2 微透镜衍射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of microlens diffraction

模拟微透镜阵列时, 根据同样的原理, 设入射光为各点值相等的平面波, 计算出微透镜阵列上每个微透镜各点与焦面上对应子孔径内各位置的距离 r , 再用上述公式把光强在焦面上各点处进行叠加, 就能够计算整个微透镜阵列在焦面上的衍射光强分布, 具体结构示意图如图 3 所示。

以 F 数为 58 的微透镜阵列为例, 设微透镜阵

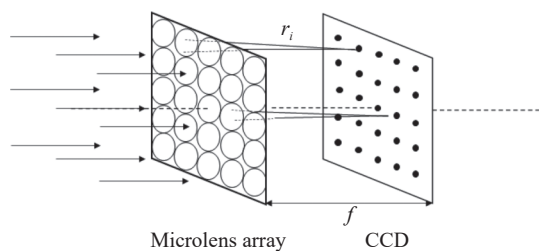


图 3 微透镜阵列衍射成像示意图

Fig. 3 Schematic diagram of microlens array diffraction imaging

列采用口径为 $288 \mu\text{m}$, 焦距为 16.7 mm , 入射波长为 635 nm 的理想平行光进行仿真, 在焦面上形成均匀分布的亮斑, 每个亮斑位于子孔径区域的中心。单个微透镜焦面中心的二维强度分布如图 4 (a) 所示。可以看出, 除了中心光强呈高斯分布以外, 还存在次级衍射峰, 其会影响质心计算精度, 从而产生重构波前误差。同时, 为了分析衍射效应对光斑质心计算产生的误差, 也给出仅保留高斯分布的光强分布信息, 以模拟无衍射效应的光斑, 如图 4(b) 所示。

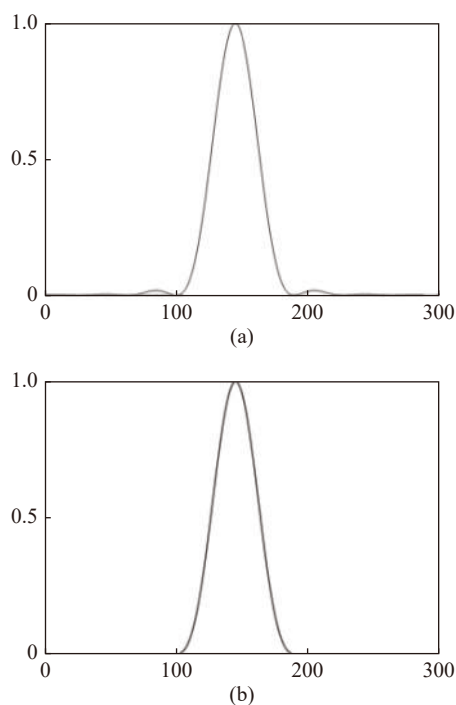


图 4 (a) 任一有衍射光斑中心及 (b) 任一无衍射光斑中心光强分布

Fig. 4 Central intensity distribution of (a) any diffraction spot and (b) any non diffraction spot

3.2 光斑质心计算误差

为了分析衍射效应对哈特曼波前探测的最大影响, 首先, 需要计算衍射效应造成的质心计算误

差, 再根据质心误差进行波前重构, 获得波前误差。在哈特曼探测器中, 相机的像素大小固定, 且分辨率有限^[18]。为了符合实际应用场景, 需要将光斑图进行离散化至常用分辨率。本文将每个微透镜区域划分为 6×6 个像素, 且光斑通常所占像素个数为 2×2 。图 5 为光斑图离散化后的结果。后续针对该强度分布进行质心计算和误差分析。

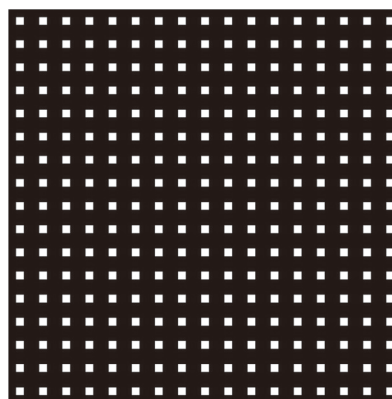


图 5 离散化后的仿真光斑图

Fig. 5 Simulated spot diagram after discretization

由于相机像素的周期结构分布, 令光斑从参考位置偏移一个像素, 便可求出哈特曼探测器质心计算误差的变化规律。为此, 将图 5 所示的光斑阵列从参考位置以 0.05 个像素为步长逐步偏移至一个像素, 且每偏移一次就进行一次图像离散化并计算质心位置。理论偏移量和计算的质心位置之差, 即为质心计算误差。同时, 为了分析仅由衍射造成的质心误差, 对无衍射效应的光斑阵列也采用类似的处理方法得到质心误差。模拟计算结果如图 6 所示。图 6(a)、图 6(b) 分别为无衍射与有衍射情况下, 光斑偏移 1 个像素过程中的质心计算误差曲线, 图 6(c) 是两者之差, 即单纯的衍射效应造成的质心计算误差。由图 6 可知, 质心误差按正弦函数规律变化, 且在起始位置、偏移 0.5 和 1 个像素处的值都为 0 。无论是无衍射还是有衍射, 都是在光斑沿 x 轴方向偏移 0.25 像素和 0.75 像素时, 质心计算误差最大。在无衍射的情况下, 质心计算误差最大为 4.4% 个像素; 在有衍射情况下, 质心计算误差最大约为 4.6% 个像素。单纯由衍射效应产生的质心误差, 在偏移 0.21 像素和 0.79 像素时最大, 为 0.2% 个像素。该参数微透镜阵列的衍射效应对质心计算结果会使波面重构造成误差, 会给一些精度要求较高的哈特曼探测器带来较大的影响。

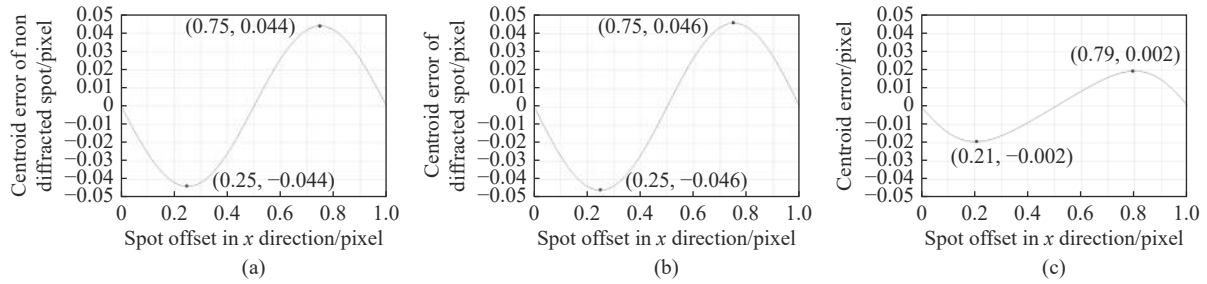


图 6 (a) 无衍射和 (b) 有衍射的光斑偏移 1 个像素过程中的质心计算误差; (c) 衍射效应造成的质心计算误差

Fig. 6 Centroid calculation error in the process of (a) diffraction free and (b) diffraction spot shifting by 1 pixel; (c) calculation error of centroid caused by diffraction effect

4 衍射效应对波前探测精度的影响

Zernike 多项式可以与光学像差直接对应, 并且波面拟合的收敛性好、精度高^[19], 因此利用基于 Zernike 多项式的模式法重构波前。重构波前 ϕ 可用多项式展开为:

$$\phi = \sum_{k=1}^K a_k Z_k(x, y) \quad (5)$$

式中 $Z_k(x, y)$ 为第 k 项 Zernike, a_k 为对应的 Zernike 系数, K 为 Zernike 项数。为了求得 K 项系数 a_1, a_2, \dots, a_k , 可将斜率和系数写成矩阵形式, 分别为 s 和 a :

$$s = \begin{bmatrix} s_{x1} \\ \vdots \\ s_{xM} \\ s_{y1} \\ \vdots \\ s_{yN} \end{bmatrix}, \quad a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: M, N 分别为 x, y 轴上测量值的个数, 两者的关系为 $S = Qa$, Q 中的元素为 Zernike 在波前探测器子孔径位置上的导数, 则系数矩阵 a 可由 Q 的

伪逆矩阵得到^[20]:

$$a = (Q^T Q)^{-1} Q^T S \quad (7)$$

将式(7)带入式(5), 即可求出波面信息 ϕ 。取 Zernike 的前 36 项^[21] 对上述微透镜阵列在焦面上的光斑图进行波前重构。在仿真中, 光斑为理想状态, 不存在其他像差, 因此重构波前仅存在倾斜误差。在光斑偏移 0.79 像素处重构波前如图 7(彩图见期刊电子版)所示。图 7(a) 和图 7(b) 分别为无衍射与有衍射光斑的倾斜波前图, 其倾斜量分别为 18.46λ 和 18.59λ , 而根据计算可得实际倾斜量应为 17.51λ , 因此无衍射和有衍射的倾斜误差分别为 0.95λ 和 1.08λ 。图 7(c) 是衍射效应产生的倾斜误差, 为 0.13λ 。在光斑整个偏移过程中的倾斜误差曲线如图 8 所示, 图 8(a)、图 8(b) 分别为无衍射与有衍射情况下在偏移过程中存在的倾斜误差, 都是在光斑沿 x 轴方向偏移 0.25 像素和 0.75 像素时, 波前误差最大, 分别是 0.910λ 和 1.004λ ; 图 8(c) 为衍射效应导致的倾斜误差。可以看出, 光斑在偏移 0.21 像素和 0.79 像素, 即光波偏转 0.03° 和 0.13° 时, 衍射造成

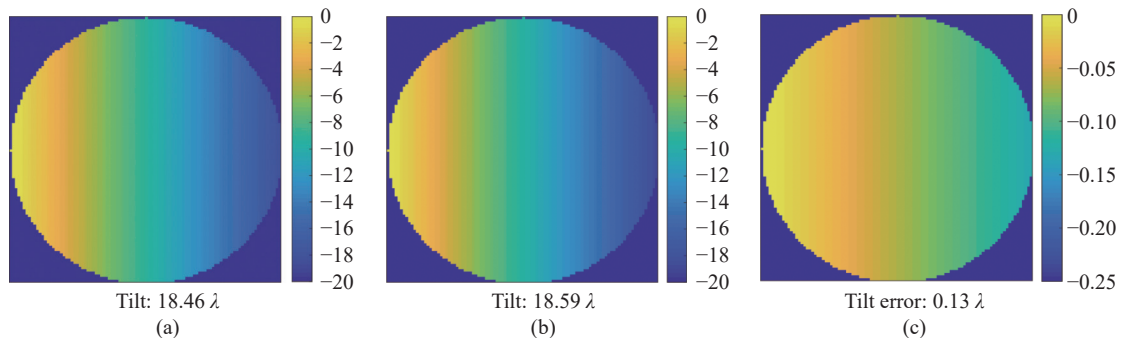


图 7 (a) 无衍射的光斑偏移 0.79 像素的重构波前; (b) 有衍射的光斑偏移 0.79 像素的重构波前; (c) 最大误差波前

Fig. 7 (a) Reconstructed wavefront with diffraction free spot offset of 0.79 pixels; (b) reconstructed wavefront with diffraction spot offset of 0.79 pixels; (c) maximum error wavefront

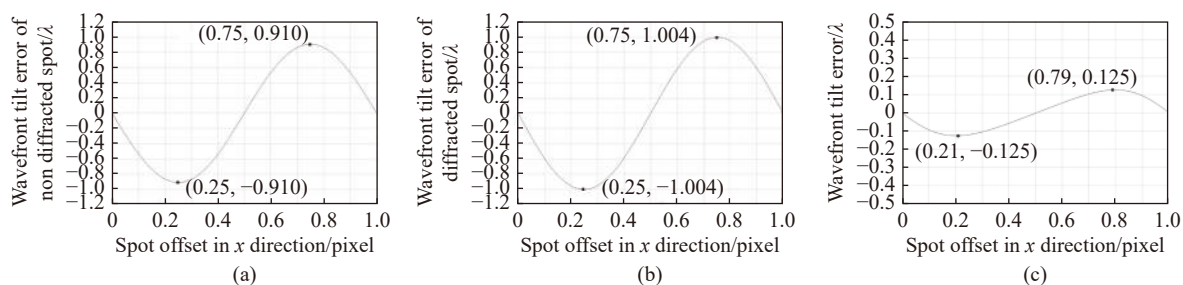


图 8 (a) 无衍射的光斑偏移 1 个像素过程中的波前倾斜误差; (b) 有衍射的光斑偏移 1 个像素过程中的波前倾斜误差; (c) 衍射效应造成的波前倾斜误差

Fig. 8 (a) Wavefront tilt error in the process of diffraction free spot shifting by 1 pixel; (b) wavefront tilt error in the process of diffraction spot shifting by 1 pixel; (c) wavefront tilt error caused by diffraction effect

的波前误差最大, 约为 0.125λ , 且占总误差的 12.45%。为了评价衍射波前误差对整体波前的影响程度, 将衍射波前误差除以对应的倾斜量得到相对误差, 结果如图 9 所示。可以看出, 相对误差和光斑的位置相关, 当光斑偏移至 0.5 个像素和 1 个像素时, 相对误差都为零。同时, 在波前幅度较小时, 相对误差较大, 且相对误差会随着波前幅度的增大而减小。

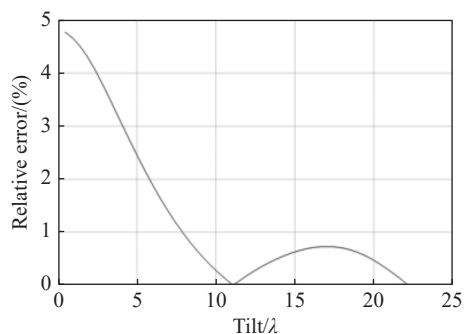


图 9 相对误差

Fig. 9 Relative error

5 实验验证

实验使用的微透镜阵列的口径为 $288\mu\text{m}$ 、焦距为 16.7mm 、微透镜数为 17×17 , 工作波长为 635nm , CCD 的像素尺寸为 $4.8\mu\text{m}$, 为了与仿真条件一致, 采用 10×10 binning 模式, 像素尺寸变为 $48\mu\text{m}$ 。此时, 微透镜占据 6×6 像素, 每个光斑所占像素数为 2×2 。搭建的实验光路如图 10 所示, 激光器的光源通过平行光管产生平面波, 哈特曼探测器置于电动转台上, 通过电机逐渐旋转哈特曼探测器, 改变光波入射时的倾斜角度, 电动转台的旋转精度为 0.001° , 满足实验所需的最小旋转角度。

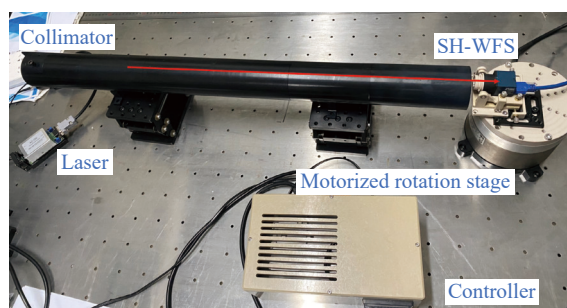


图 10 哈特曼波前探测实验装置图

Fig. 10 Experimental diagram of Hartmann wavefront detection device

实际情况中衍射效应不能避免, 因此实验无法得到无衍射效应的倾斜量。为此, 首先测量有衍射效应的倾斜量, 然后和相应的理论仿真值进行对比分析, 从而验证衍射效应的影响。

本实验中, 以电控转台为基准, 进行哈特曼探测器波前测量误差分析, 由于仅考虑波前水平方向上的倾斜误差, 因此只取 Zernike 的第一项。系统初始位置测量结果如图 11(彩图见期刊电子版)所示(单位: λ)。图 11(a) 为实验光斑阵列图, 图 11(b) 是初始波前。然后控制电动转台旋转, 直至光斑偏移一个像素, 此时电机旋转 0.14° , 此时波面如图 11(c) 所示。为了降低偏转误差, 实验中光波以 0.01° 间隔从 0.07° 偏转至 0.14° , 对应光斑的理论偏移为 0.5 至 1 个像素。得到相应倾斜量随波面旋转的曲线图, 同时模拟波面旋转过程中的倾斜量, 与实际波前倾斜量做对比, 得到误差曲线, 具体结果如图 12 所示。图 12(a) 为依据旋转台转动角度计算得到的倾斜量, 在忽略旋转台转动误差的情况下, 其代表光束的实际旋转角度和实际倾斜量。图 12(b) 为仿真的倾斜量, 其

参考光斑采用图 5 中的光斑图像。图 12(c) 为实验测量得到的倾斜量, 其参考光斑为图 11(a)。分别与实际倾斜量相比, 即可得到仿真和实验测量误差, 结果如图 12(d) 所示, 黑色实线代表仿真波前误差, 在旋转 0.105° 时误差最大, 约为 0.91λ , 点线图则是实验测量的波前误差, 在旋转 0.11° 时误差最大, 约为 1.01λ 。衍射效应导致的波前误差, 约有 0.1λ , 此时的实际偏移量为 14.8λ , 则相对误差为 0.68% , 略小于前文图 9 中的极大值结果 0.73% , 这主要由实验环境等其他因素影响。由于

实验中平行光管输出光波与理想平面波存在差距, 因此实验中采用的是相对测量的方法, 即光波每次偏转后记录的都是相对波前信息, 避免了实验光波的误差, 并且实验中使哈特曼探测器尽量贴近平行光管的出光口, 来减小湍流对哈特曼波前探测的影响。实验中对湍流进行多次测量, 取倾斜误差的平均值, 大约有 0.004λ , 而仿真中波前误差最大为 0.125λ , 因此湍流的影响可以忽略不计。此外, 微透镜阵列自身的像差信息已经包含在参考光斑的位置信息里, 而实验只测量光斑的相

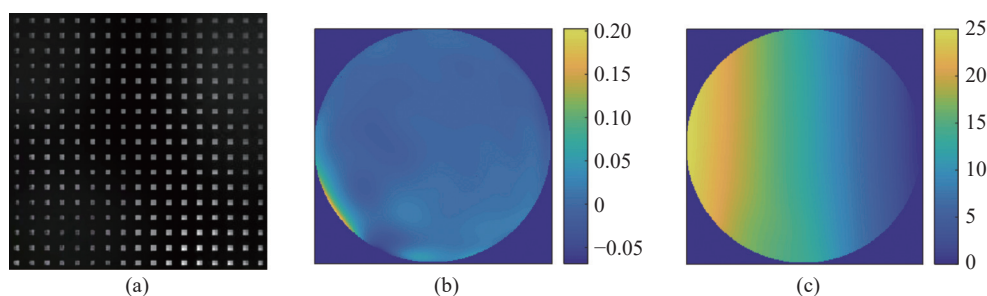


图 11 (a) 实验光斑图; (b) 初始波前; (c) 倾斜波前

Fig. 11 (a) Experimental spot diagram; (b) initial wavefront (c) inclined wavefront

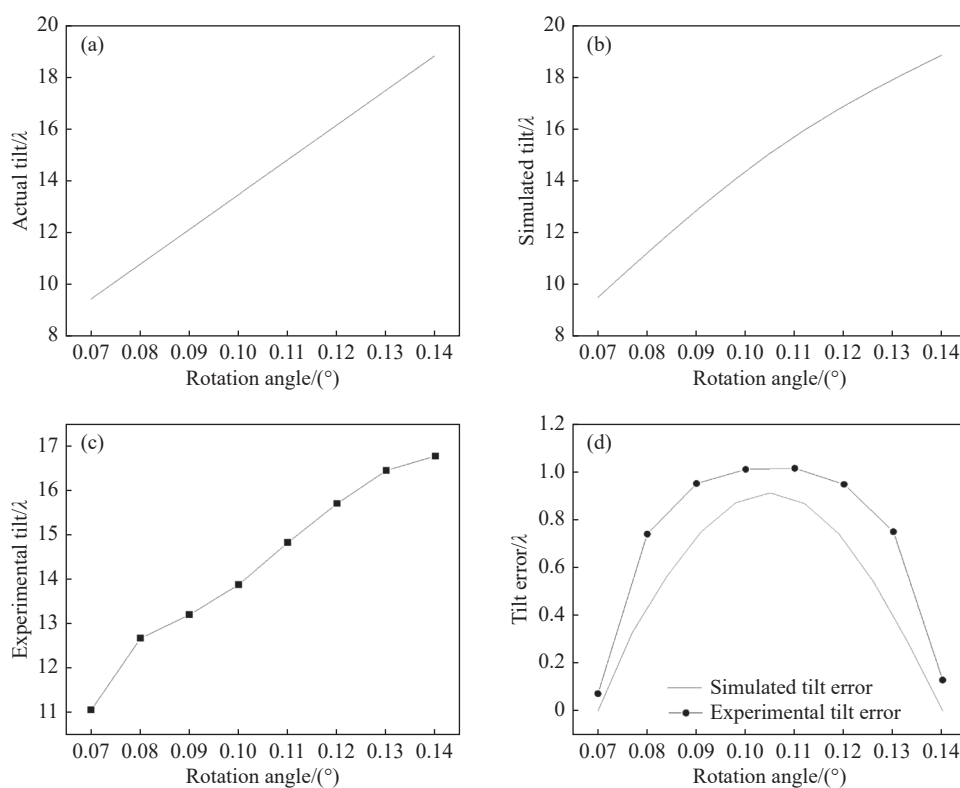


图 12 (a) 实际波前倾斜量与旋转角度的关系曲线; (b) 仿真波前倾斜量与旋转角度关系曲线; (c) 实验波前倾斜量与旋转角度关系曲线; (d) 波前倾斜误差曲线

Fig. 12 (a) Relation curve between actual wavefront tilt and rotation angle; (b) relationship curve between simulated wavefront tilt and rotation angle; (c) relation curve between experimental wavefront tilt and rotation angle; (d) wavefront tilt error curve

对偏移量,所以微透镜的像差不影响测量精度。

6 结 论

本文通过构建二维微透镜阵列衍射模型,提出了计算微透镜阵列衍射效应对哈特曼波前探测误差的方法,仿真有衍射和无衍射情况下光斑偏移1个像素过程中的质心计算误差,进行波前重构,得到在偏移0.21和0.79像素时,由衍射效应导致的波前探测倾斜误差最大,达到 0.13λ 。同时也实验验证了计算方法的可行性。

本文初步分析了微透镜阵列衍射对哈特曼探测器波前探测精度的影响。在实际应用中,微透

镜阵列的衍射不可避免。因此,须在波前探测尤其是高精度探测应用中把衍射的影响作为误差项进行分析,否则可能导致实验失败或效果与预期相差较大。为了降低微透镜阵列的衍射影响,后续将在以下两方面开展工作:一方面分析衍射效应的影响因素,例如微透镜的口径、焦距等,总结影响规律,从而找到影响最小的使用参数和条件;另一方面,根据其影响规律,建立补偿模型和算法,通过软件处理方法消除衍射的影响。

本文关于微透镜阵列的衍射效应对哈特曼波前探测器探测精度影响的分析模型,能够为研究者提供微透镜衍射效应的分析方法和哈特曼探测器设计的理论依据。

参考文献:

- [1] 姜文汉,鲜浩,杨泽平,等.哈特曼波前传感器的应用[J].量子电子学报,1998,15(2):228-235.
JIANG W H, XIAN H, YANG Z P, et al.. Applications of shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15(2): 228-235. (in Chinese)
- [2] ZAVALOVA V Y, KUDRYASHOV A V. Shack-Hartmann wavefront sensor for laser beam analyses[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4493: 277-284.
- [3] 程少园,曹召良,胡立发,等.用夏克-哈特曼探测器测量人眼波前像差[J].光学精密工程,2010,18(5):1060-1067.
CHENG SH Y, CAO ZH L, HU L F, et al.. Measurement of wavefront aberrations of human eyes with Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(5): 1060-1067. (in Chinese)
- [4] OGANE H, AKIYAMA M, OYA S, et al.. Atmospheric turbulence profiling with multi-aperture scintillation of a Shack-Hartmann sensor[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 503(4): 5778-5788.
- [5] XU L, WANG J, YAO K, et al.. Application of the Gaussian modeling algorithm to a Shack-Hartmann wavefront sensor for daylight adaptive optics[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(17): 4196-4199.
- [6] 苏鹏程,陈宇,张家铭,等.基于六边形紧密拼接结构的仿生复眼系统设计[J].红外与激光工程,2021,50(4):20200338.
SU P CH, CHEN Y, ZHANG J M, et al.. Design of bionic compound eye system based on hexagonal closely spliced structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(4): 20200338. (in Chinese)
- [7] 程利群,景文博,王晓曼.夏克-哈特曼波前传感器光斑质心探测方法比较与分析[J].长春理工大学学报(自然科学版),2014,37(3):23-26.
CHENG L Q, JING W B, WANG X M. Comparison and analysis of shack-Hartmann wave-front sensor spot centroid detection methods[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 37(3): 23-26. (in Chinese)
- [8] PRIETO P M, VARGAS-MARTÍN F, GOELZ S, et al.. Analysis of the performance of the Hartmann-Shack sensor in the human eye[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, 17(8): 1388-1398.
- [9] 李晶,巩岩,呼新荣,等.哈特曼-夏克波前传感器的高精度质心探测方法[J].中国激光,2014,41(3):0316002.
LI J, GONG Y, HU X R, et al.. A high-precision centroid detecting method for Hartmann-shack wavefront sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 0316002. (in Chinese)
- [10] 师亚萍,刘缠牢.提高夏克-哈特曼波前传感器光斑质心的定位精度[J].激光与光电子学进展,2017,54(8):081201.
SHI Y P, LIU CH L. Positioning accuracy improvement of spot centroid for shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 081201. (in Chinese)
- [11] 李旭旭,李新阳,王彩霞.哈特曼传感器子孔径光斑的局部自适应阈值分割方法[J].光电工程,2018,45(10):170699.
LI X X, LI X Y, WANG C X. Local adaptive threshold segmentation method for subaperture spots of shack-Hartmann

- sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(10): 170699. (in Chinese)
- [12] BAIK S H, PARK S K, KIM C J, *et al.*. A center detection algorithm for shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(2): 262-267.
- [13] RUFFIEUX P, SCHARF T, HERZIG H P, *et al.*. On the chromatic aberration of microlenses[J]. *Optics Express*, 2006, 14(11): 4687-4694.
- [14] 韩妍娜, 胡新奇, 董冰. 一种扩大夏克-哈特曼波前传感器动态范围的迭代外推法[J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1611004.
- HAN Y N, HU X Q, DONG B. Iterative extrapolation method to expand dynamic range of shack-Hartmann wavefront sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1611004. (in Chinese)
- [15] WANG K, XU K F. A review on wavefront reconstruction methods[C]. *2021 4th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education*, Association for Computing Machinery, 2021: 1528-1531.
- [16] PRIMOT J. Theoretical description of Shack-Hartmann wave-front sensor[J]. *Optics Communications*, 2003, 222(1-6): 81-92.
- [17] 刘逸天, 陈琦凯, 唐志远, 等. 超表面透镜的像差分析和成像技术研究[J]. *中国光学*, 2021, 14(4): 831-850.
- LIU Y T, CHEN Q K, TANG ZH Y, *et al.*. Research progress of aberration analysis and imaging technology based on metalens[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 831-850. (in Chinese)
- [18] 夏明亮. 高精度人眼像差哈特曼探测器的研制[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2011.
- XIA M L. The development of high precision Hartmann wavefront detector for eye aberration[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2011. (in Chinese)
- [19] JOHNSON T P, SASIAN J. Zernike monomials in wide field of view optical designs[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(22): G146-G153.
- [20] LAKSHMINARAYANAN V, FLECK A. Zernike polynomials: a guide[J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(7): 545-561.
- [21] 李建聪, 林宏安, 罗佳雄, 等. 空间引力波探测望远镜光学系统设计[J]. *中国光学*, 2022, 15(4): 761-769.
- LI J C, LIN H A, LUO J X, *et al.*. Optical design of space gravitational wave detection telescope[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 761-769. (in Chinese)

作者简介:



朱沁雨(1997—), 男, 江苏无锡人, 硕士研究生, 2019年于常熟理工学院获得学士学位, 主要研究方向为光电仪器与智能检测技术。E-mail: zhuqyxw@163.com



曹召良(1974—), 男, 河南济源人, 博士, 教授, 博士生导师, 2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事液晶自适应光学系统、光学设计、光学实验以及理论分析和模拟工作。E-mail: caozl@usts.edu.cn