

## 双光楔微扫描哈特曼-夏克波前探测技术

马辰昊,付跃刚,贺文俊,王加科,董亭亭

(长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022)

**摘要:**传统哈特曼-夏克传感器主要受微透镜尺寸与微透镜数量的限制,对待测波前采样不足,影响对波前的探测精度。通过对哈特曼-夏克传感器波前重构原理和双光楔微扫描原理进行分析讨论,提出了一种在哈特曼-夏克传感器之前加入双光楔微扫描结构的检测方法,弥补了传统哈特曼-夏克传感器对待测波前采样不足的缺点。利用 Zemax 和 Lighttools 软件模拟了加入双光楔微扫描结构哈特曼-夏克传感器的光斑分布情况。微扫描图像重建算法与波前重构算法结合给出原理性验证,对所模拟后大像差光学系统波前复原精度提高了 53.53%,该方法可以有效提高哈特曼-夏克传感器对波前探测的精度。

**关键词:**哈特曼-夏克传感器; 微扫描; 波前重构; 检测精度

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2813-06

## Hartmann-Shack sensor with dual-wedge micro-scanning in wavefront detection technology

Ma Chenhao, Fu Yuegang, He Wenjun, Wang Jiake, Dong Tingting

(School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The Hartmann-Shack sensor is mainly affected by the dimension and the number of lenticule. Thus the measured wavefront has been inadequate sampled and affected the precision of wavefront. The wavefront reproduction principle of Hartmann sensor and dual-wedges micro-scanning technology were analyzed and discussed. A new detected method was proposed, which added the structure of dual-wedges micro-scanning. The method can compensate the shortcoming of lacking sample with measured wavefront in the traditional Hartmann sensor. By utilizing Zemax and Lighttools software, spot distribution was simulated by Hartmann sensor of adding dual-wedge micro-scanning structure. Combined with micro-scanning image of reconfiguration algorithm with the wavefront reconstruction algorithm, the principle was verified. The wavefront reconstruction of large aberration by simulation was improved 53.53% in the optical system. Conclusions show that the method can effectively increase the accuracy of wavefront detection by Hartmann sensor with dual-wedge.

**Key words:** Hartmann-Shack sensor; micro-scanning; wavefront reproduction; detection precision

收稿日期:2015-01-05; 修订日期:2015-02-07

基金项目:国家自然科学基金(61108044)

作者简介:马辰昊(1988-),女,博士,主要从事光学检测方面的研究。Email:mch6567@163.com

通讯作者:付跃刚(1972-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事光学检测方面的研究。Email:fuyg@cust.edu.cn

## 0 引言

哈特曼-夏克波前传感器在实时测试光学及校准系统、激光光源、空间光通信以及自适应光学等方面都有着广泛的应用。由于其复原测量精度和动态范围限制了其应用<sup>[1]</sup>,在提高它的测量精度方面,研究人员在光斑质心识别、波前重构算法以及微透镜材料选取等方面做了很多创新性的改进,达到提高测量精度的目的,但是相应地增加了检测难度<sup>[2]</sup>。

国外方面,O.G. Oliveira 等人提出一种新型哈特曼-夏克波前传感器,其微透镜阵列是由特殊材料制作的,并且利用遗传算法减小波前重构误差<sup>[3]</sup>。Serge Meimon 等人提出一种利用线性焦平面技术(LIFT)获取每个子孔径的质心坐标,对每个子孔径进行相位恢复的哈特曼波前复原方法<sup>[4]</sup>。参考文献[3-4]虽然利用相应算法提高了波前复原精度,但是在计算上重复繁琐,实验结果产生一定强度的噪声。国内方面,段海峰等人提出分别对粗对准和精对准添加算法优化模型,减小探测背景带来的较大误差,从而影响传感器的探测精度<sup>[5]</sup>。余玉华等人提出通过在哈特曼-夏克传感器重构计算时增加反卷积计算过程,系统误差得到了下降<sup>[6]</sup>。林辉轮等人提出了一种先对噪声进行预处理再计算质心的方法,通过对比结果验证了该方法可以提高传感器波前重构精度<sup>[7]</sup>。参考文献[5-7]所提方法均是在软件上对哈特曼-夏克传感器的波前复原精度进行提高,其缺点在于无法弥补因微透镜尺寸限制引起的对待测波前采样不足的缺点,不能满足高精度检测的需求。而在硬件上通过减小哈特曼-夏克传感器微透镜的尺寸来达到高精度检测的难度较大,成本较高。

鉴于此,文中提出了一种通过微扫描装置使被测波前产生微小位移,对不同位移的波前进行采样,通过微扫描图像重建、波前复原的方法来提高哈特曼-夏克传感器的分辨率。设计了 2×2 模式下双光楔微扫描哈特曼-夏克传感器,研究了多帧扫描图像的重构算法,通过模拟对比实验对该方法做了验证,利用微扫描技术可以使哈特曼-夏克波前传感器提高波前复原精度。

## 1 哈特曼-夏克传感器与双光楔微扫描分析

哈特曼-夏克波前传感器是一种对波前检测时

常用到的仪器,整个系统主要由匹配光学系统、微透镜阵列、CCD 光电探测器和上位机等组成。其中匹配光学系统的作用是调整被测光束直径,使其与哈特曼-夏克波前传感器孔径相适应。被测波前经过匹配光学系统缩束后照射到微透镜阵列上,由微透镜阵列将输入的波前分割成若干个子波面,经由微透镜会聚后聚焦到焦平面处的 CCD 探测器上,通过对 CCD 采集到的光斑分布图计算出光斑质心的偏离量,从而求出各子波面的波前斜率,最后复原出入射到微透镜阵列上的波前的形状<sup>[8]</sup>。

提高哈特曼-夏克波前传感器的测量精度与其微透镜阵列的性能密不可分,采用微扫描技术可以提高采样频率,得到高分辨率的图像。微扫描技术就是对一组具有微小位移差别的场景进行重复采样,得到多幅欠采样图像,通过对多幅欠采样图像按照采样时的顺序交叉像素点,重建出一幅更高采样率的图像。

### 1.1 哈特曼-夏克传感器原理

哈特曼-夏克波前传感器工作原理如图 1 所示,当入射波面是理想波前时,CCD 得到的光斑阵列是同微透镜阵列完全对应的规则光斑阵列,如图 1(a)所示;若入射波面含有波前畸变,则 CCD 上得到的光斑将偏离理想位置,形成不规则的光斑阵列,如图 1(b)所示。这些散乱光斑与理想位置的偏离量包含了波面的畸变信息,通过计算这些光斑质心偏离并运用波前重构算法可将入射波前重构出来<sup>[9]</sup>。

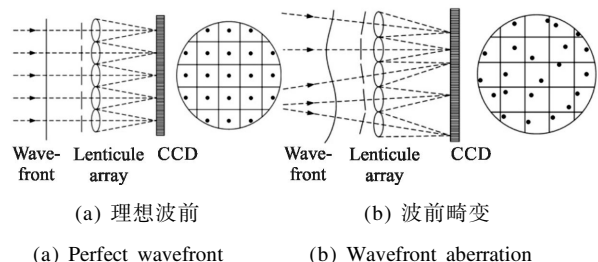


图 1 哈特曼-夏克波前传感器探测原理示意图

Fig.1 Principle of Hartmann-Shack wavefront sensor

### 1.2 双光楔微扫描原理

2×2 模式下微扫描空间分辨率提高原理如图 2 所示,微扫描图像在水平和垂直方向上(以右、下、左、上 4 个顺序)分别移动 1/2 像素间距,从而得到左边的 4 幅低分辨率图像,通过图像处理将 4 幅通过微扫描采集到的子图像合成为一幅右边的高分辨率

图像。在视场保持不变的前提下,重建后的图像分辨率就是原图像的 4 倍,在微扫描装置工作的过程中,微扫描图像的采样频率应与哈特曼-夏克传感器的工作频率相匹配。在 2×2 模式下,哈特曼-夏克传感器每采集一幅图像,双光楔透镜应与之相匹配地转过 90°。

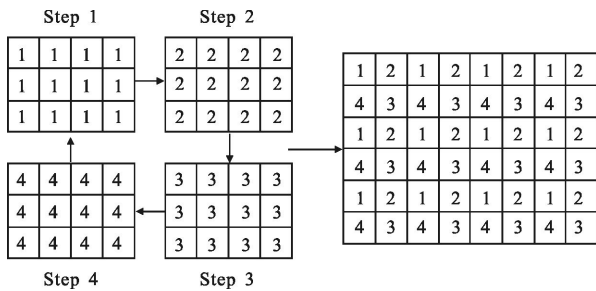


图 2 微扫描提高空间分辨率的原理示意图

Fig.2 Principle diagram of improving the spatial resolution on micro-scanning

该系统中采用的 2×2 微扫描装置的作用是为了提升哈特曼-夏克传感器微透镜阵列的采样率,所以微扫描图像应按照向右、向下、向左、向上这 4 个顺序分别移动微透镜尺寸一半的间距,对应选取的 4 个欠采样位置分别为双光楔旋转 45°、135°、225°和 315°的 4 个位置,该位置时波前偏移量 Δ 为:

$$\Delta = \frac{L}{4\sin 45^\circ} = \frac{\sqrt{2}L}{4} \quad (1)$$

微扫描时被测波前移动的步长为  $\sqrt{2} \Delta = L/2$ ,为微透镜尺寸的一半。对尺寸为  $L \times L$  的微透镜进行微扫描图像重建时,在像面上取尺寸为  $L \times L$  的图像作为一组像素,将欠采样图像分为  $n$  组像素组,将每组像素看作一个整体进行微扫描图像重建,其中  $n$  为所采用哈特曼-夏克传感器的透镜个数。如图 3 为光楔与微透镜阵列的位置关系示意图。

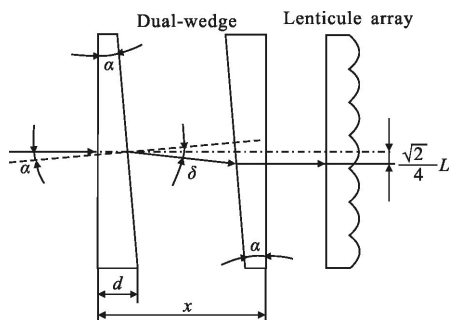


图 3 光楔与微透镜阵列的位置关系示意图

Fig.3 Diagram of position between wedge and lenticule array

由入射光线与出射光线间关系有:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \delta} \quad (2)$$

式中:  $n_1$  为光楔折射率;  $n_2$  为空气折射率;  $\alpha$  为光楔的楔角;  $\delta$  为出射光线与法线间夹角。

选用的双光楔材质为 K9 玻璃(折射率  $n_1=1.5163$ ),下底边厚度  $d=4.01 \text{ mm}$ ,光楔楔角  $\alpha=1^\circ$ 。

由哈特曼-夏克传感器微透镜尺寸(微透镜宽度  $L=0.13 \text{ mm}$ )确定两片光楔间距离  $x$ ,可表示为:

$$x = \frac{\sqrt{2}L}{4\tan(\delta-\alpha)} - \frac{\sqrt{2}L}{4} \cdot \tan \alpha + d = 9.11 \text{ mm} \quad (3)$$

### 1.3 双光楔微扫描哈特曼-夏克波前传感器

微扫描技术可以提高哈特曼-夏克传感器的空间分辨率并且降低系统噪声带来的影响<sup>[10]</sup>。在哈特曼-夏克传感器的匹配光学系统与微透镜阵列之间放置一个由伺服电机驱动旋转的双光楔装置,利用光楔对光线的折射作用使光线产生偏移进行微扫描。应用双光楔进行微扫描具有对折射光控制精确度高、结构简单、质量较轻、高速旋转时不易产生偏心、便于调校和控制等特点。经分析,所采用的双光楔微扫描哈特曼-夏克传感器结构形式如图 4 所示。

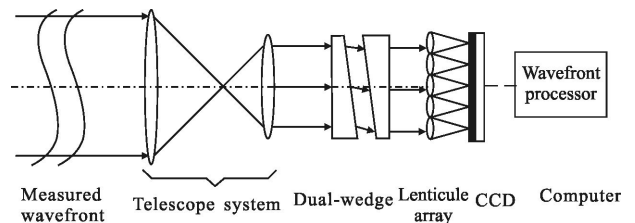


图 4 基于双光楔微扫描哈特曼-夏克波前传感器结构示意图

Fig.4 Structural diagram of dual-wedge micro-scanning based on Hartmann-Shack wavefront sensor

被测波前经过匹配光学系统缩束调整后入射到双光楔微扫描镜片上,双光楔使被测波前产生了一个微小的偏移,由微透镜阵列将偏移后的被测波前分割成若干个子波面,经由微透镜会聚后聚焦到置于微透镜阵列焦平面处的 CCD 探测器上,得到被测波前的光斑分布图,由伺服电机驱动双光楔以  $\omega$  的角速度旋转。采用 2×2 模式微扫描,由哈特曼-夏克传感器的测量速率 50 Hz 可得  $\omega=25 \pi \text{ rad/s}$ 。通过 CCD 探测器对双光楔旋转 45°、135°、225°和 315°这 4 个位置采集到的 4 帧欠采样光斑分布图,对其进行 2×2 模式微扫描图像重建,得到 1 帧高分辨率光

斑分布图,由于视场保持不变,所以理论上空间分辨力可以提高到原来图像的 4 倍。通过计算出光斑质心的偏离量,求出重建后光斑对应的各子波面的波前斜率,最后复原出被测波前的形状,加入微扫描装置可以使哈特曼-夏克传感器在不增加微透镜数量的情况下得到更多采样点的图像,提高波前的复原精度。

## 2 仿真模拟与数据分析

选用 Zernike 模式法对波前进行重构,使用 Zemax 设计一个开普勒望远系统作为匹配光学系统,将该系统优化为小像差系统(记为系统 I),用来模拟一个平面波的波前,作为标准参考波前;在该系统的基础上增大像差,使其成为一个大像差系统(记为系统 II),用来模拟一个带有畸变的被测波前。这两个系统的波前用 Zernike 多项式的形式给出,相应的 Zernike 系数如表 1 所示。

表 1 模拟的两个望远系统 Zernike 系数

Tab.1 Zernike coefficient of two telescope system by simulation

Telescope system	Zernike coefficient
System I	$Z_1=1$
	$Z_4=-0.012\ 597\ 84$
	$Z_2=Z_3=Z_5=Z_6=Z_7=Z_8=Z_9=0$
System II	$Z_1'=1$
	$Z_4'=-2.5605931$
	$Z_2'=Z_3'=Z_5'=Z_6'=Z_7'=Z_8'=Z_9'=0$

通过 Zemax 软件仿真出哈特曼-夏克传感器的微透镜阵列,所选哈特曼-夏克传感器的微透镜材料为融石英、形状为方形的抛物面平凸透镜,单个微透镜尺寸为  $0.13\text{ mm}\times 0.13\text{ mm}$ ,透镜数为  $37\times 28$  个,可探测区域  $4.8\text{ mm}\times 3.6\text{ mm}$ ,有效焦距和实际焦距分别为  $14.2\text{ mm}$  和  $18.6\text{ mm}$ ,微透镜阵列波段为  $405\sim 1\ 064\text{ nm}$ ,测量速率为  $50\text{ Hz}$ 。用 Lighttools 软件在光路中模拟旋转角度为  $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $225^\circ$  和  $315^\circ$  的双光楔,将双光楔置于望远系统与微透镜阵列之间,分别模拟完美波前和有像差波前在这 4 种光学系统下的光斑分布。这 4 种位置的双光楔分别将被测波前向右上、右下、左下、左上 4 个方向偏移了  $\frac{\sqrt{2}}{4}L$  距离,得到了 4 幅欠采样的光斑分布图。对这 4 幅光斑分布图进行  $2\times 2$  模式微扫描图像重建计算,将重建后的光斑

分布图与模拟的传统不加入双光楔哈特曼-夏克传感器得到的光斑分布图分别进行波前重构计算。

Lighttools 软件模拟的添加双光楔微扫描哈特曼-夏克传感器系统如图 5 所示。

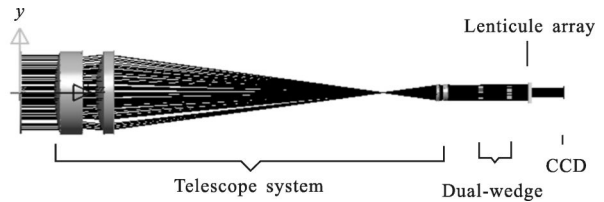


图 5 基于双光楔微扫描的哈特曼-夏克传感器系统 3 维模拟图  
Fig.5 Three dimensional simulation diagram of Hartmann-Shack sensor system based on dual-wedge micro-scanning

Lighttools 对大像差光学系统光线追迹得到 5 组光斑分布图如图 6 所示。图 6(a)为无光楔时的光斑分布,图 6(b)~(e)分别为双光楔旋转  $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $225^\circ$  和  $315^\circ$  时的光斑分布。

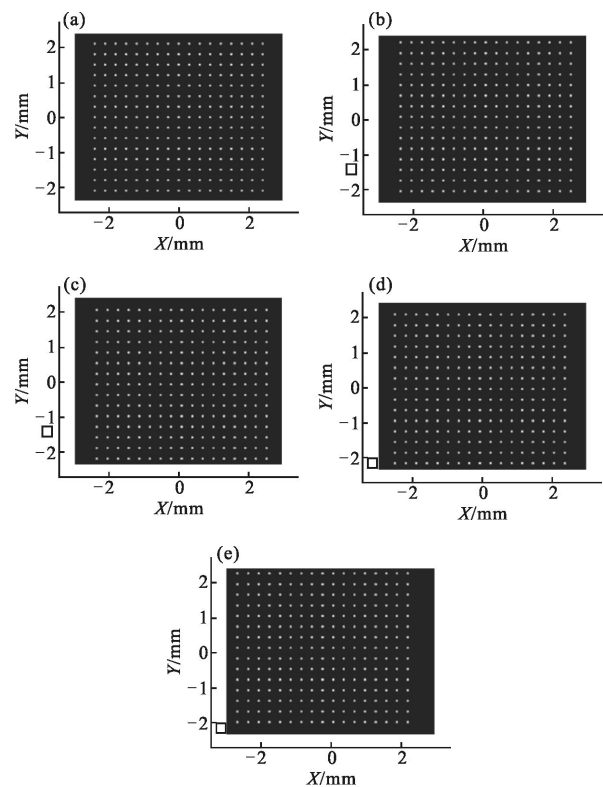


图 6 Lighttools 光线追迹得到的 5 组光斑分布图

Fig.6 Five groups spot distribution diagram of raytracing by Lighttools

对双光楔旋转  $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $225^\circ$  和  $315^\circ$  这 4 个位置的 4 帧光斑分布图利用  $2\times 2$  模式微扫描重建算法进行高分辨率图像重建,重建后的光斑分布图如图 7 所示。

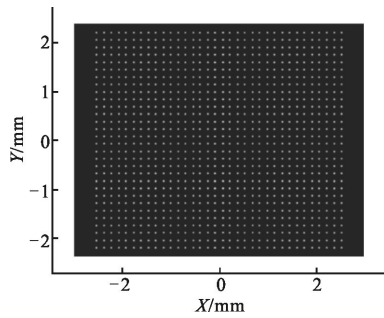


图 7 2x2 模式微扫描重建后的光斑分布图

Fig.7 Spot distribution diagram of micro-scanning reconstruction on 2x2

由图 6(a)和图 7 的光斑分布情况可以得出两个大像差系统中各个子光斑质心的偏移量  $\Delta x$  和  $\Delta y$ , 由此可以计算出各个子孔径在  $X$ 、 $Y$  方向上的平均波前斜率  $G_x$  和  $G_y$ :

$$G_x = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda f}, G_y = \frac{2\pi\Delta y}{\lambda f} \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为探测波长;  $f$  为微透镜的焦距。

可以用 Zernike 多项式的线性组合来表达圆域上一个带有畸变的完整波前  $\varphi(x, y)$ , 即:

$$\varphi(x, y) = \sum_{k=1}^{k \rightarrow n} a_k \cdot z_k(x, y) \quad (5)$$

式中:  $a_k$  代表第  $k$  阶 Zernike 多项式系数;  $z_k(x, y)$  代表第  $k$  阶 Zernike 多项式。

由公式(5)可以得到波前斜率:

$$G_x(x, y) = \sum_{k=1}^n a_k \frac{\partial z_k(x, y)}{\partial x} \quad (6)$$

$$G_y(x, y) = \sum_{k=1}^n a_k \frac{\partial z_k(x, y)}{\partial y} \quad (7)$$

第  $i$  个子孔径内的平均斜率:

$$G_x(x, y)_i = \sum_{k=1}^n \left( \frac{a_k}{S_i} \right) \iint_{S_i} \frac{\partial z_k(x, y)}{\partial x} dx dy = \sum_{k=1}^n a_k \cdot z_{sk(i)} \quad (8)$$

$$G_y(x, y)_i = \sum_{k=1}^n \left( \frac{a_k}{S_i} \right) \iint_{S_i} \frac{\partial z_k(x, y)}{\partial y} dx dy = \sum_{k=1}^n a_k \cdot z_{yk(i)} \quad (9)$$

式中:  $S_i$  为第  $i$  个子孔径的归一化面积。

将公式(8)、(9)用矩阵形式表示为:

$$R \begin{bmatrix} G_{x(1)} \\ G_{y(1)} \\ G_{x(2)} \\ G_{y(2)} \\ \vdots \\ G_{x(m)} \\ G_{y(m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{x_1(1)} & Z_{x_2(1)} & \cdots & Z_{x_n(1)} \\ Z_{y_1(1)} & Z_{y_2(1)} & \cdots & Z_{y_n(1)} \\ Z_{x_1(2)} & Z_{x_2(2)} & \cdots & Z_{x_n(2)} \\ Z_{y_1(2)} & Z_{y_2(2)} & \cdots & Z_{y_n(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{x_1(m)} & Z_{x_2(m)} & \cdots & Z_{x_n(m)} \\ Z_{y_1(m)} & Z_{y_2(m)} & \cdots & Z_{y_n(m)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (10)$$

记为:

$$G = Z \cdot A \quad (11)$$

由矩阵性质可得

$$A = Z^+ \cdot G \quad (12)$$

式中:  $A$  为 Zernike 模式系数向量;  $Z^+$  为波前重构矩阵。

$Z^+$  是  $Z$  的广义逆矩阵, 矩阵  $Z$  由波前传感器的子孔径布局决定, 可依照波前传感器子孔径布局事先计算生成。所以, 当测得被测波前的一组斜率向量  $G$  后即可求得向量  $A$ 。

对模拟出的光斑分布数据进行编程计算, 得到模拟的双光楔微扫描哈特曼-夏克传感器与传统的哈特曼-夏克传感器波前复原数据, 如表 2 所示。

表 2 传统哈特曼-夏克传感器和采用微扫描哈特曼-夏克传感器经波前复原得到的 Zernike 系数

Tab2. Zernike coefficients of obtaining by wavefront recovery in traditional Hartmann-shack sensor and micro-scanning Hartmann-shack sensor

Zernike coefficient	Zernike coefficient without micro-scanning	Zernike coefficient after micro-scanning
$Z_1$	1	1
$Z_2$	-0.001 4	-0.000 9
$Z_3$	0.003 5	0.002 2
$Z_4$	-3.164 678 9	-2.987 657 3
$Z_5$	-4.619e-06	-3.178 8e-06
$Z_6$	1.589e-05	1.431e-05
$Z_7$	0.005	0.003 1
$Z_8$	-0.006 5	-0.015 1
$Z_9$	-0.002 4	-0.001 2
$Z_{10}$	0	0

从表 2 中的 Zernike 系数上可以看出采用 2x2 模式微扫描的哈特曼-夏克传感器对波前的复原精度要高于不采用微扫描的哈特曼-夏克传感器。为具体评价被测波前复原情况, 分别计算加入双光楔微扫描前后, 哈特曼-夏克传感器入射波前与复原波前的相位平均值  $\bar{\varphi}$  和方均根值 RMS:

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{b} \sum_{c=1}^b \varphi_c \quad (13)$$

$$RMS_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^b (x_i - \bar{x})^2}{b}} \quad (14)$$

式中:  $\varphi_c$  为第  $c$  个点的相位值;  $b$  为相位采样点的个数。

波前残差可表示为:

$$\delta D_c = \varphi_{r,c} - \varphi_{i,c} \quad (15)$$

式中:  $\varphi_{r,c}$  为第  $c$  个点的复原相位值;  $\varphi_{i,c}$  为第  $c$  个点的原始相位值。

将波前相位残差均方根  $RMS_D$  与原始波前相位均方根  $RMS_\varphi$  的比值定义为复原精度指标  $J$ , 与复原精度成反比。

$$J = RMS_D / RMS_\varphi \quad (16)$$

将初始数据(表 1)与两系统波前复原数据(表 2)代入公式(16), 得到不采用微扫描的哈特曼-夏克传感器波前复原精度评价指标  $J_0=0.0892$ , 采用双光楔微扫描的哈特曼-夏克传感器波前复原精度评价指标  $J_1=0.0581$ , 复原精度提高百分比为:

$$(J_0 - J_1) / J_1 = 53.53\% \quad (17)$$

上述结果验证了采用双光楔  $2 \times 2$  模式微扫描的哈特曼-夏克传感器对波前复原精度高于传统的哈特曼-夏克传感器对波前复原精度。

### 3 结 论

文中通过对哈特曼-夏克传感器波前重构原理以及双光楔微扫描原理进行分析讨论, 提出了一种将哈特曼-夏克传感器与微扫描技术二者相结合的波前探测方法, 结合多帧微扫描图像复原重构算法以及波前重构算法, 通过软件模拟和计算分析, 验证了所设计的双光楔微扫描哈特曼-夏克传感器可以提高波前复原精度, 对所模拟的波前复原精度提高了 53.53%。这种采用双光楔微扫描装置的哈特曼-夏克传感器在对波前探测领域有很好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] Neal D R, Copland J, Neal D. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy [C]//SPIE, 2002, 4779: 148-160.
- [2] Li Hongzhuang, Liu Xinyue, Wang Zhichen, et al. Develop of multi-application and modular Hartmann wavefront sensor [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(3): 362-365. (in Chinese)  
李宏壮, 刘欣悦, 王志臣, 等. 多用途、模块化哈特曼波前传感器的研制[J]. 光学技术, 2011, 37(3): 362-365.
- [3] Oliveira O G, Lima Monteiro D W, Costa R F O. Optimized microlens-array geometry for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 55: 155-161.
- [4] Meimon S, Fusco T, Michau V, et al. Sensing more modes with fewer sub-apertures: the LIFTed Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2835-2837.
- [5] Duan Haifeng, Yang Zeping, Zhang Yudong. Wave-front reconstruction algorithm of Shack-Hartmann sensor based on FFT algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23 (2): 240-244. (in Chinese)  
段海峰, 杨泽平, 张雨东. 快速傅里叶算法在哈特曼-夏克传感器波前重构算法中的应用 [J]. 光学学报, 2003, 23(2): 240-244.
- [6] Yu Yuhua, Dong Wende, Xu Zhihai, et al. Method for blurred image restoration based on Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 262-268. (in Chinese)  
余玉华, 董文德, 徐之海, 等. 基于哈特曼-夏克波前传感器的模糊图像复原方法 [J]. 光学学报, 2012, 32(8): 262-268.
- [7] Lin Huilun, Wang Chunhong, Jiang Wenhan. High accuracy centroid calculation for extended object with low SNR [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(8): 9-12. (in Chinese)  
林辉轮, 王春鸿, 姜文汉. 低信噪比下扩展目标质心的高精度计算方法 [J]. 光电工程, 2005, 32(8): 9-12.
- [8] Li Hui, Wu Yuntao, Pan Fan, et al. Study on electrically tunable Shack-Hartmann wavefront sensor based on liquid crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 290-297. (in Chinese)  
李晖, 吴云韬, 潘凡, 等. 基于液晶电控可调夏克-哈特曼波前传感器的研究 [J]. 光学学报, 2013, 33(12): 290-297.
- [9] Gu Naiting, Yang Zeping, Huang Linhai, et al. Measurement method of misalignment for Hartmann-Shack sensor and deformable mirror in adaptive optics system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 287-292. (in Chinese)  
顾乃庭, 杨泽平, 黄林海, 等. 自适应光学系统中哈特曼传感器与变形镜对准误差的测量方法 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 287-292.
- [10] Ma Xiaoyu, Fan Zhihua, Rao Changhui, et al. Application of Hartmann-Shack sensor in optical readout system of uncooled infrared imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29 (2): 490-495. (in Chinese)  
马晓燠, 樊志华, 饶长辉, 等. 基于哈特曼波前传感器的非制冷红外成像光学读出系统 [J]. 光学学报, 2009, 29(2): 490-495.