

基于非均匀采样的五棱镜阵列扫描测量大口径准直波前

刘威剑¹, 高志山¹, 马焱岑¹, 车啸宇¹, 雷李华², 傅云霞², 袁群^{1*}

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

²上海市计量测试技术研究院, 上海 201203

摘要 五棱镜扫描法通过沿扫描方向连续采集子孔径光束会聚点的坐标,由斜率反演波前分布,是检测大口径准直波前的常用方法。在传统的一维五棱镜扫描法的基础上,提出添加多个五棱镜,形成一组并联的五棱镜和一组串联的五棱镜,实现了一种基于非均匀采样的五棱镜阵列扫描测量大口径准直波前三维分布的方法。该方法通过三个平行于扫描方向的并联五棱镜同时测量准直波前 X 方向的斜率,三个垂直于扫描方向的串联五棱镜同时测量准直波前 Y 方向的斜率,采用 Zernike 多项式中 4~11 项的导函数拟合测量得到的斜率,继而获得用 Zernike 多项式表征的准直波前三维分布。该方法只需要一次扫描测量,就能同时获得待测波前三条线上的斜率,避免了传统方法测量全口径准直波前时需要在 X、Y 方向进行的多次扫描,优化了扫描机构,缩短了扫描检测时间,实现了全口径准直波前的快速检测。通过仿真验证了使用待测波前三条线上斜率复原待测波前的可行性与准确性。应用该方法对 1 m 口径准直波前进行了检测,并与干涉法检测结果进行了对比,两种方法得到的准直波前数值与分布形式基本一致,证明了该方法的可行性。

关键词 测量; 五棱镜扫描法; 波前检测; 非均匀采样; 波前复原

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL202249.2404001

1 引言

对于平行光管、干涉仪、相机镜头等光学系统而言,准直波前是衡量光学系统质量的重要指标。常用的准直波前检测方法有干涉检测法^[1-3]、哈特曼法^[4]、夏克-哈特曼法^[5-6]等。这些检测方法往往需要与待测准直波前口径相当的附加元件,检测成本较高。五棱镜扫描法通过测量准直波前斜率的变化,实现对大口径准直波前的扫描检测^[7-9]。五棱镜扫描法光学结构简单,成本低,对于准直波前中低阶像差的检测具有重要价值。

传统的五棱镜扫描法通过单个五棱镜扫描待测波前一条线上的斜率从而复原准直波前在该条线上的波前分布。刘兆栋等^[10]采用该方法对大口径近红外干涉仪的准直波前进行了检测,并对检测误差进行了详细分析。为了提高五棱镜扫描法的稳定性,减小五棱镜运动误差的影响,研究人员提出了差分五棱镜扫描法^[11]、双五棱镜扫描法^[12-13]等改进方法。这些方法极大地提高了五棱镜扫描法的检测精度,但是都只能测量准直波前一条线上的波前分布,无法得到待测波前

全口径的像差分布。为了获得全口径的三维波面分布,需要进行多次扫描,获得待测波前多条线上的斜率。这种多条线的扫描方式常被用于大口径平面光学元件的面形检测^[14-17],通过旋转待测光学元件,在极坐标下扫描测量面形多条线上的斜率,再通过 Zernike 多项式系数拟合的方式,实现对大口径平面光学元件全口径的三维面形检测。但旋转待测件的方式不适用于测量光学系统的准直波前。

若要测量全口径准直波前,一般需要 X、Y 两个方向的五棱镜扫描系统,扫描机构复杂,并且耗时长,易受环境扰动的影响。若能够只用一个 X 方向的扫描机构完成准直波前 X、Y 两个方向的斜率测量,则能简化扫描机构,缩短扫描时间。考虑 Y 方向斜率依靠多个五棱镜组合完成采样, X 方向仍依靠扫描完成采样,即可形成 X 方向和 Y 方向的非均匀采样。本文提出在扫描机构上用三个平行于扫描方向的并联五棱镜测量 X 方向的斜率,三个垂直于扫描方向的串联五棱镜测量 Y 方向的斜率,所有五棱镜随机扫描机构同时运动,只需要进行一次 X 方向的扫描测量就可以复原全口径的准直波前三维分

收稿日期: 2022-08-17; 修回日期: 2022-09-17; 录用日期: 2022-10-10

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2005500)、国家自然科学基金(62175107, U1931120)、江苏省六大人才高峰项目(RJFW-019)、中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室基金(KLOMT190201)、上海在线检测与控制技术重点实验室基金(A04202130002)

通信作者: *yuanqun@njut.edu.cn

布。该方法极大地减少了五棱镜扫描法检测全口径准直波前需要的扫描时间。

2 基本原理

2.1 五棱镜扫描法检测原理

五棱镜扫描法的原理如图 1 所示。准直波前沿 Z 轴正方向传播,经过五棱镜后偏折 90°,变成沿 X 轴正方向传播,经会聚透镜会聚在探测器靶面上。五棱镜由位置 1 移动到位置 2 时,由于待测波前在两个位置处 X 方向的斜率不同,会聚在探测器上的光斑位置也会发生改变,通过求解光斑质心在探测器上移动的距离,就可以计算出待测波前由位置 1 移动到位置 2 处的斜率变化量。

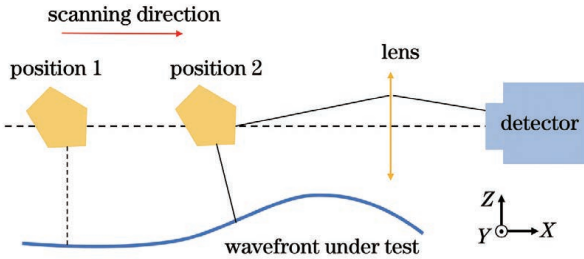


图 1 五棱镜扫描法原理

Fig. 1 Principle of pentaprism scanning method

五棱镜由位置 1 移动到位置 2,光斑在探测器上移动的距离为 Δc ,会聚透镜的焦距为 f ,则待测波前在位置 1 和位置 2 处 X 方向的斜率差 Δk_x 由下式可得:

$$\frac{\Delta c}{f} = \Delta k_x. \quad (1)$$

若五棱镜以位置 1 作为起始点沿 X 方向对待测波前上每个点进行扫描,则待测波前上每个位置处的斜率与位置 1 处的斜率之差都可以计算得到。

2.2 非均匀采样的五棱镜阵列原理

由 2.1 可知,单个五棱镜沿一个方向扫描只能获得待测波前一条线上的斜率变化,为了得到待测波前全口径的斜率分布,需要分别测量待测波前多条线上的 X 方向和 Y 方向斜率。本文提出一种非均匀采样的五棱镜阵列,Y 方向仅采样三个位置的斜率,X 方向通过扫描采样多个位置的斜率,一次扫描就可以同时获得待测波前三条线上的 X 方向和 Y 方向斜率。其原理如图 2(a)所示,通过三个并联的五棱镜即五棱镜 1、五棱镜 2、五棱镜 3 同时测量 X 方向的斜率,通过三个串联的五棱镜即五棱镜 4、分光五棱镜 1、分光五棱镜 2 同时测量 Y 方向的斜率。

三个并联的五棱镜测量 X 方向斜率的原理如图 2(b)所示。待测波前的半口径为 R ,在待测波前中心高处放置五棱镜 2,并在中心高两侧距离中心高 $R/\sqrt{2}$ 的地方再分别放置五棱镜 1 和五棱镜 3,这三个五棱镜可以同时沿 X 正方向扫描,同时测量待测波前三条线上的 X 方向斜率变化量。其中,五棱镜

1 所在的待测波前 Y 方向坐标为 y_1 ,五棱镜 2 所在的 Y 方向位置为 y_0 ,五棱镜 3 所在的 Y 方向位置为 y_{-1} 。

三个串联的五棱镜测量 Y 方向斜率的原理如图 2(c)所示。通过在五棱镜上胶合一个楔形棱镜形成分光五棱镜,分光五棱镜既可以透射入射光又可以使入射光偏折 90°。分别在待测波前的 y_1 、 y_0 、 y_{-1} 位置处放置五棱镜 4、分光五棱镜 1、分光五棱镜 2,用于测量待测波前 Y 方向的斜率变化,五棱镜运动方向仍然沿 X 轴正方向。以五棱镜 4 为例,入射光沿 Z 轴正方向传播,经五棱镜 4 折转 90°,再透射分光五棱镜 1 和分光五棱镜 2 后,经反射镜反射,最终出射光沿 X 轴正方向传播,经会聚透镜成像在探测器 4 上。若五棱镜 4 存在一个较小的俯仰角误差 α ,即五棱镜 4 存在绕 Z 轴的旋转角 α ,则根据五棱镜的误差理论可知,经五棱镜 4 后的出射光线方向在 YZ 平面上不会有变化,在 YX 平面上会产生角度为 $\tan \alpha$ 的偏转。五棱镜 4 出射的光线经过反射镜反射,会聚透镜成像在探测器上(YZ 平面),光斑中心在探测器靶面 Y 方向会产生大小为 $f \tan \alpha$ 的位移。实验中通过调整串联的三个五棱镜的俯仰角大小,就可以实现三个光斑的分离,从而在探测器上同时采集三个五棱镜的光斑质心。同理,分光五棱镜 1 与分光五棱镜 2 使得待测波前同样会聚在探测器 4 上,如果待测波前在 y_1 、 y_0 、 y_{-1} 位置处的斜率不同,则最终成像在探测器 4 上的三个光斑质心位置在 Z 轴方向上会产生变化,通过计算光斑质心的变化量就可以求得待测波前 Y 方向斜率在 y_1 、 y_0 、 y_{-1} 位置处的斜率差。

2.3 复原准直波前三维分布的原理

准直波前 $W(x, y)$ 可以用 Zernike 多项式表征:

$$W(x, y) = \sum_{i=4}^n a_i \cdot Z_i(x, y), \quad (2)$$

式中: n 为 Zernike 多项式的项数; a_i 为多项式系数; $Z_i(x, y)$ 为 Zernike 多项式的第 i 项。

对于五棱镜扫描系统而言,其扫描方向可以表示为

$$i \cos \theta + j \sin \theta, \quad (3)$$

式中: θ 为极坐标系中的角度; i 和 j 分别为 X 方向和 Y 方向的单位向量。

因此,待测准直波前沿扫描方向的斜率 $g(x, y, \theta)$ 可以表征为

$$g(x, y, \theta) = \sum_{i=4}^N a_i \cdot \nabla Z_i(x, y) \cdot (i \cos \theta + j \sin \theta), \quad (4)$$

式中: $\nabla Z_i(x, y)$ 为 Zernike 多项式第 i 项的一阶偏导数。

五棱镜扫描法获得的数据为离散扫描点与起始位置点波前斜率的差值,因此该离散点的数据可以表征为

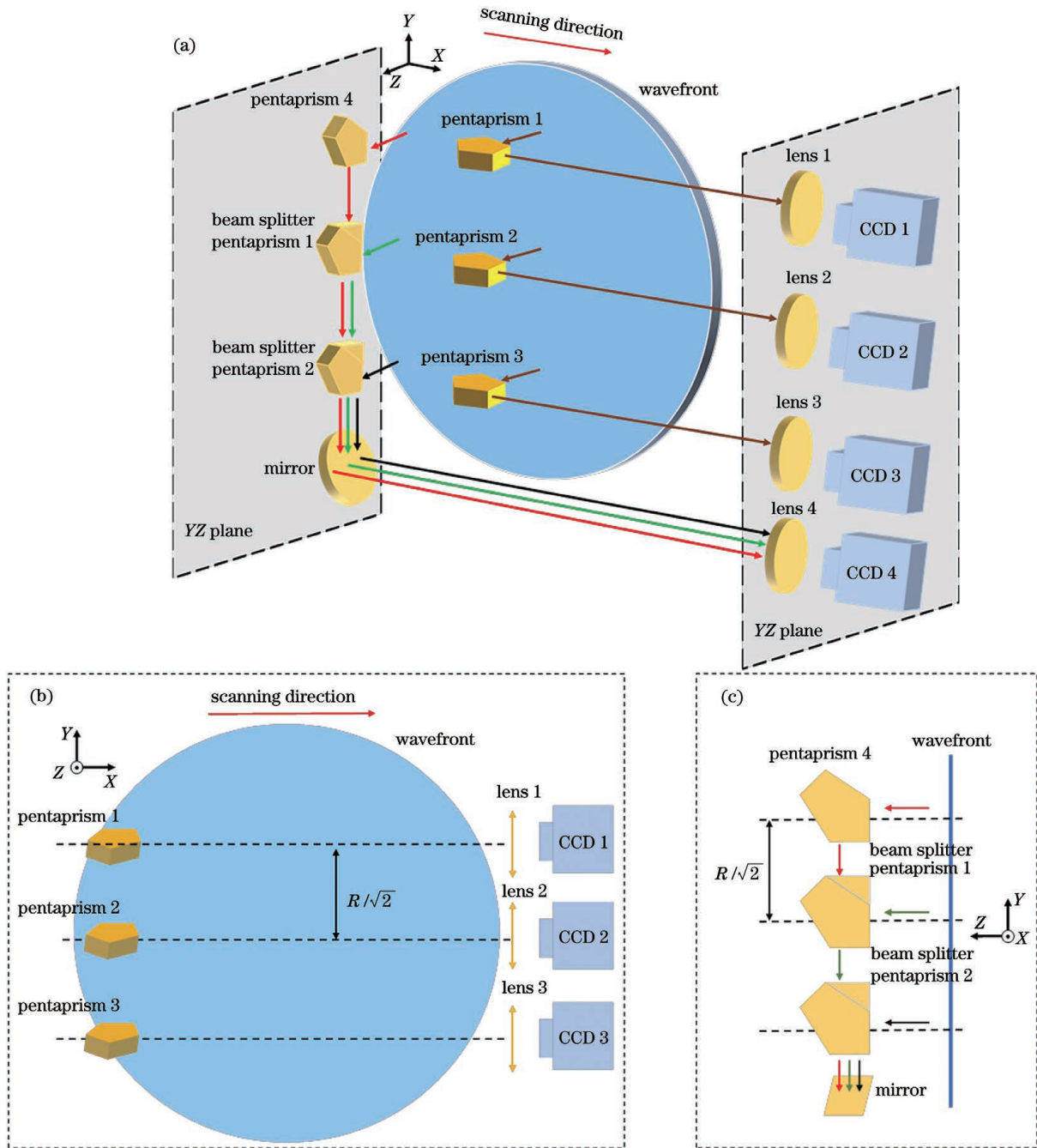


图 2 非均匀采样的五棱镜阵列原理图。(a)非均匀采样的五棱镜阵列原理三维示意图;(b)X 方向斜率测量原理;(c)Y 方向斜率测量原理

Fig. 2 Principle of nonuniform sampling pentaprism array. (a) Three-dimensional diagram of principle of nonuniform sampling pentaprism array; (b) principle of slope measurement in X direction; (c) principle of slope measurement in Y direction

$$\mathbf{A}\mathbf{a} = \mathbf{b}, \quad (5)$$

式中: \mathbf{a} 为 Zernike 多项式的系数; \mathbf{b} 为采样获得的波

前斜率变化量的离散数据; \mathbf{A} 为 Zernike 多项式一阶偏导数的矩阵,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \nabla Z_4(2) - \nabla Z_4(1) & \nabla Z_5(2) - \nabla Z_5(1) & \cdots & \nabla Z_n(2) - \nabla Z_n(1) \\ \nabla Z_4(3) - \nabla Z_4(1) & \nabla Z_5(3) - \nabla Z_5(1) & \cdots & \nabla Z_n(3) - \nabla Z_n(1) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \nabla Z_4(m) - \nabla Z_4(1) & \nabla Z_5(m) - \nabla Z_5(1) & \cdots & \nabla Z_n(m) - \nabla Z_n(1) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: m 为采样点个数。

式的系数:

可由最小二乘法计算获得式(5)中 Zernike 多项

$$\mathbf{a} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (7)$$

待测准直波前可由 Zernike 多项式系数利用式 (2) 计算得到。准直波前一般只需要考虑其低阶像差, 因此采用 Zernike 多项中的低阶像差项即 4~11 项即可。由于 45° 像散的 Zernike 多项式为 x_y , 待测波前上任意点的一阶偏导数与起始点的一阶偏导数作差之后等于 0, 因此该五棱镜阵列法在复原待测波前时无法求解其 45° 像散大小。考虑到大口径准直系统中, 像散一般是由于大口径的光学元件支撑或者光源偏心造成的, 多表现为 0° 像散与 45° 像散的叠加, 因此检测到 0° 像散后可以判断出系统的问题并指导装调。

3 仿真分析

实际检测系统的准直波前以低阶像差为主。为了验证非均匀采样的五棱镜阵列法复原准直波前三维分

布的可行性与准确性, 通过 Zernike 多项式的 4~11 项仿真一个待测的准直波前, 并按照图 2 的位置获得准直波前三条线上的 X 方向与 Y 方向的斜率。考虑到检测过程中环境扰动等影响因素, 本文在仿真准直波前时加入了峰-谷(PV)值 0.1 倍光波长 (0.1λ) 的随机误差, 其中 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。仿真采用了 1000×1000 的准直波前矩阵, 在三条线上沿 X 方向每隔 25 个点获得一个准直波前的斜率值。按照式 (6) 和式 (7) 计算准直波前的 Zernike 多项式系数, 并复原准直波前的三维分布。仿真的待测准直波前如图 3(a) 所示, 其中随机误差如图 3(b) 所示。采用五棱镜阵列法复原得到的准直波前如图 3(c) 所示, 复原的准直波前与仿真的准直波前低阶像差的误差如图 3(d) 所示, 复原的 Zernike 多项式各项系数与仿真的系数如图 3(e) 所示。

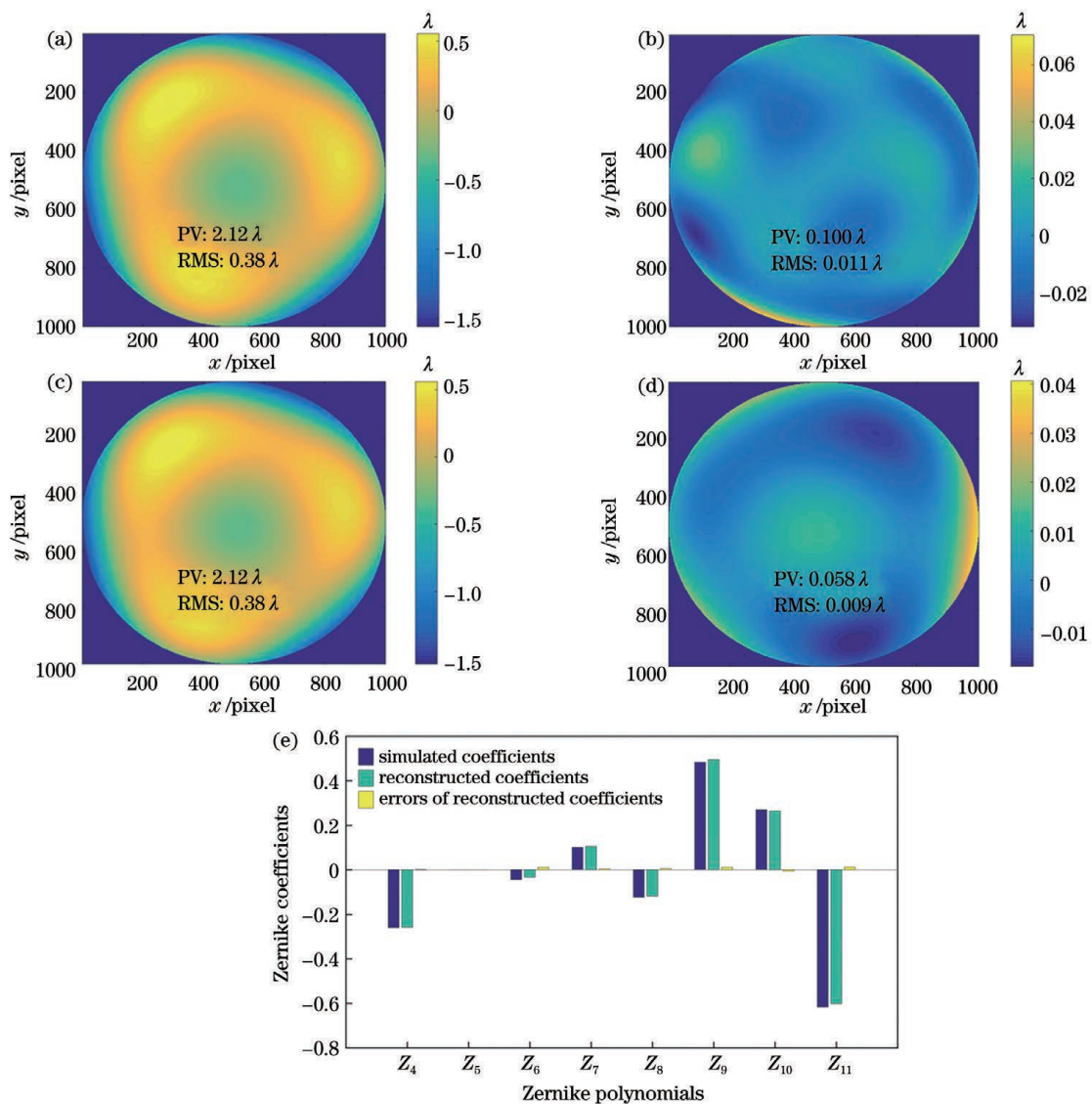


图 3 五棱镜阵列复原待测波前。(a) 仿真的准直波前;(b) 仿真的准直波前中的随机误差;(c) 复原的准直波前;(d) 准直波前复原误差;(e) 仿真的 Zernike 多项式系数与复原的 Zernike 多项式系数

Fig. 3 Reconstruction of wavefront with pentaprism array. (a) Simulated collimated wavefront; (b) random error in simulated collimated wavefront; (c) reconstructed collimated wavefront; (d) errors of reconstructed collimated wavefront; (e) simulated and reconstructed Zernike polynomial coefficients

可以看出用待测波前三条线上斜率复原的准直波前与仿真的准直波前像差分布一致, Zernike 多项式系数也基本一致。仿真的准直波前 PV 值为 2.12λ , 均方根(RMS)值为 0.38λ , 复原的准直波前 PV 值为 2.10λ , RMS 值为 0.37λ 。将复原的准直波前与仿真的准直波前点对点相减后得到的复原误差 PV 值为 0.058λ , RMS 值为 0.009λ , 该方法复原的准直波前结果准确。为了证明该方法对任意准直波前都具有较高

的复原精度, 对其鲁棒性进行了仿真, 每次仿真随机给定待测波前的 Zernike 多项式 4~11 项的系数, 并且每次添加随机误差, 比较复原出的准直波前与仿真的准直波前误差的 PV 值与 RMS 值。仿真了 500 次准直波前的复原误差, 结果如图 4 所示。可以看出该方法的准直波前复原误差 PV 值在 95% 的情况下优于 0.12λ , RMS 值在 95% 的情况下优于 0.02λ , 因此该方法具有很好的鲁棒性。

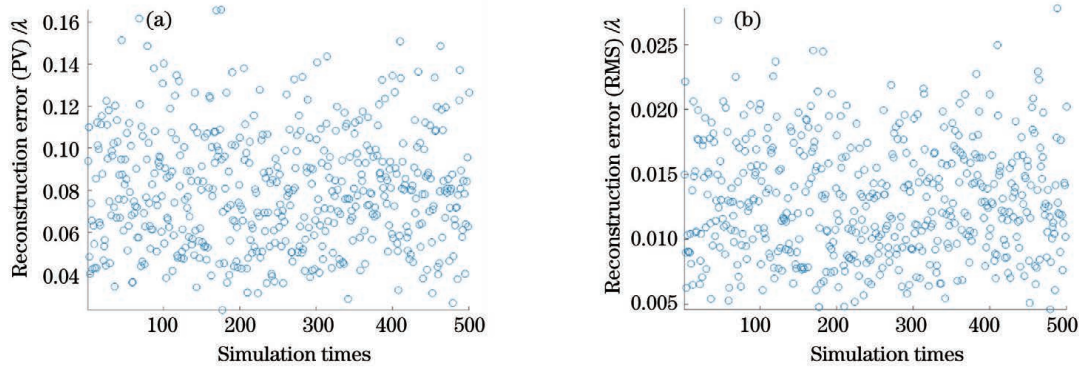


图 4 复原准直波前的鲁棒性。(a)误差 PV 值;(b)误差 RMS 值

Fig. 4 Robustness of reconstructing collimated wavefront. (a) PV values of errors; (b) RMS values of errors

4 实 验

4.1 五棱镜阵列扫描实验

为了验证本文方法的可行性, 对 1 m 口径的准直波前进行了实验测量, 准直波前波长为 632.8 nm 。实

验装置如图 5 所示。实验采用的电动导轨型号为 MTS324, 行程 1.2 m, 分辨率 $0.39 \mu\text{m}$, 重复定位精度 $4 \mu\text{m}$, 可以满足本文的实验需要; 采用的探测器型号为 IMPERX-B1410M, 像素大小为 $6.45 \mu\text{m}$; 会聚透镜焦距 300 mm; 五棱镜棱长 8 mm。

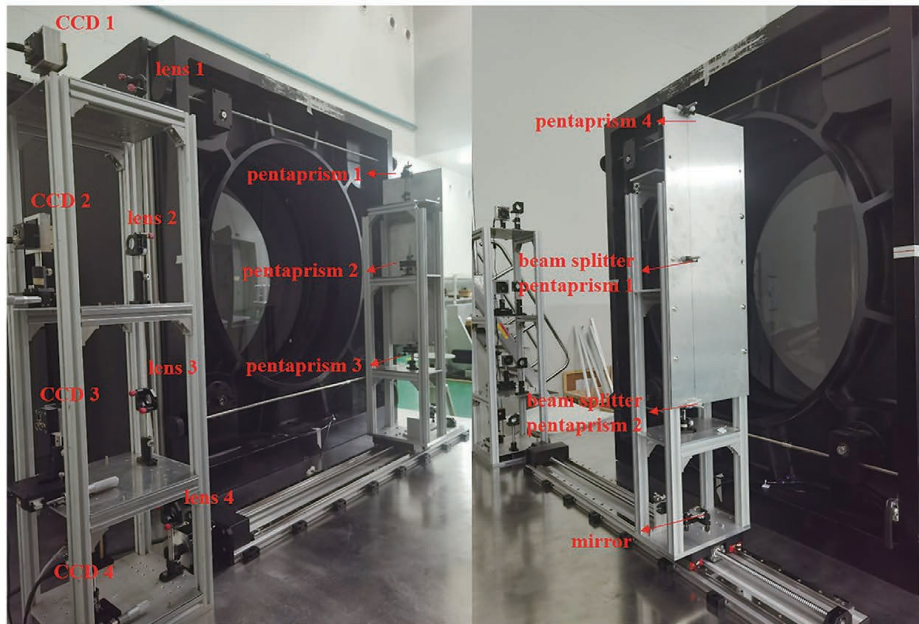


图 5 五棱镜阵列扫描装置

Fig. 5 Scanning mechanism with pentaprism array

实验中待测波前传播方向为 Z 轴正方向, 波前圆心为坐标原点, 沿待测波前 X 轴正方向扫描。待测波前半径为 500 mm, 则扫描待测波前三条线的 Y 坐标位置分别为 $y_1 = 354 \text{ mm}$, $y_0 = 0$, $y_{-1} = -354 \text{ mm}$ 。由于 y_1 与 y_{-1} 位置处的两条线上点的 X 方向坐标范

围为 $-354 \sim 354 \text{ mm}$, 因此实验中机械扫描范围为 X 方向坐标 $-354 \sim 354 \text{ mm}$, 每隔 25 mm 测量一次, 每次采集 5 幅图做平均之后用于计算光斑质心, 经过二值化与插值处理后再根据质心计算公式获得每个采样点的质心在 CCD 上的像素位置。将每个扫描点的质

心位置与起始位置的质心位置作差后得到质心的变化量。待测波前三条线上 X 方向测得的光斑质心移动量如图 6(a)所示。计算待测波前 Y 方向的斜率差时,

以每个扫描点处 y_0 位置的光斑质心为基准, y_1 位置与 y_{-1} 位置的光斑质心位置都与 y_0 位置的质心位置作差,结果如图 6(b)所示。

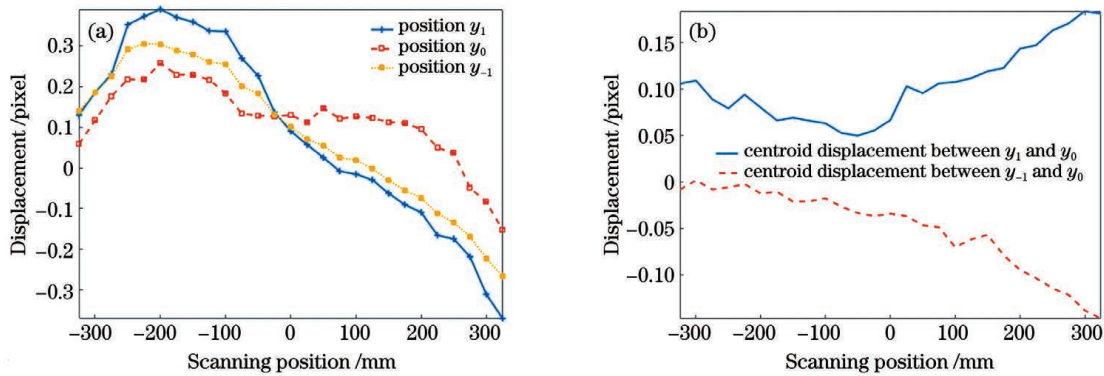


图 6 五棱镜阵列扫描测量的光斑质心移动量。(a)X 方向移动量;(b)Y 方向移动量

Fig. 6 Spot centroid displacement measured with pentaprism array scanning. (a) Spot centroid displacement in X direction; (b) spot centroid displacement in Y direction

该实验数据需要考虑扫描过程中机械导轨的俯仰倾斜以及偏摆角对光斑质心位置的影响。根据五棱镜扫描法的机械扫描误差分析可知^[18],在 X 方向斜率的扫描过程中,五棱镜测量精度只受到机械导轨的滚转角影响。当机械导轨存在一个滚转角 β 时,五棱镜测量的斜率误差为 $\tan \beta \sin \beta$,因此实验中需要将机械导轨在测量点处的滚转角测量出来。测量点处的导轨滚转角如图 7 所示。

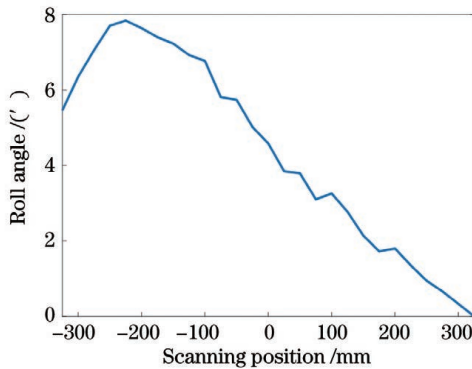


图 7 导轨滚转角

Fig. 7 Roll angle of rail

对于 Y 方向斜率测量的数据,由于计算的是每个测量点处上下两个五棱镜与中间五棱镜的光斑质心的偏差,导轨的俯仰、偏摆和滚转角作差之后抵消掉了,因此 Y 方向的测量数据不需要考虑导轨的影响。综上所述,在测量数据中, X 方向的斜率数据需要扣除导轨的滚转角误差。消除机械误差后的数据如图 8 所示。

用校正后的数据复原待测波前,结果如图 9(a)所示,测得的准直波前 PV 值为 2.495λ , RMS 值为 0.448λ 。为了验证该结果的准确性,在 1 m 口径准直波前的后方放上平面反射镜 2,形成准直波前的干涉检验光路,如图 9(b)所示。采用干涉法获得的准直波前如图 9(c)所示,准直波前 PV 值为 2.752λ ,RMS 值

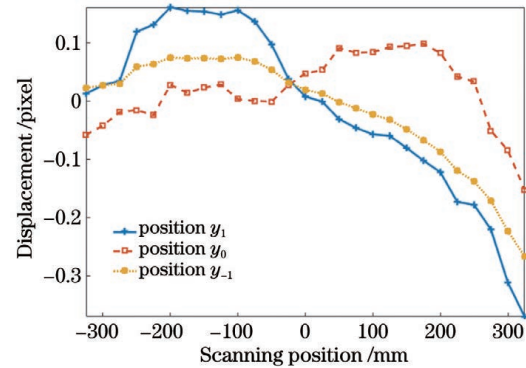


图 8 消除机械误差后的光斑质心移动量

Fig. 8 Spot centroid displacement with mechanical error eliminated

为 0.496λ 。可以看出五棱镜阵列法测量得到的准直波前与干涉法测量得到的准直波前低阶像差分布基本一致,主要是离焦、球差和 X 方向彗差。五棱镜阵列法拟合的低阶像差 Zernike 多项式系数与干涉法拟合得到的低阶像差 Zernike 多项式系数如图 9(d)所示,两种方法拟合的 Zernike 多项式系数也基本一致。两者存在偏差的主要原因是干涉检测中平面反射镜 2 的面形会对检测结果有影响,并且五棱镜阵列扫描法相比于干涉法而言检测时间长,更容易受到环境扰动的影响,因此两者检测结果会有一些偏差。综上所述,五棱镜阵列扫描法可以比较准确地测量出大口径准直波前的三维分布。

4.2 五棱镜阵列扫描法不确定度分析

首先分析光斑质心探测不确定度。本实验采用二值化与插值处理后再通过加权质心计算方法获得每个采样点的质心在 CCD 上的像素位置,该方法质心的探测不确定度为 $0.15 \text{ pixel}^{[12]}$ 。实验采用的 CCD 像素大小为 $6.45 \mu\text{m}$,会聚透镜焦距 300 mm,因此可以得到由光斑质心不确定度造成的波前斜率测量不确定度为

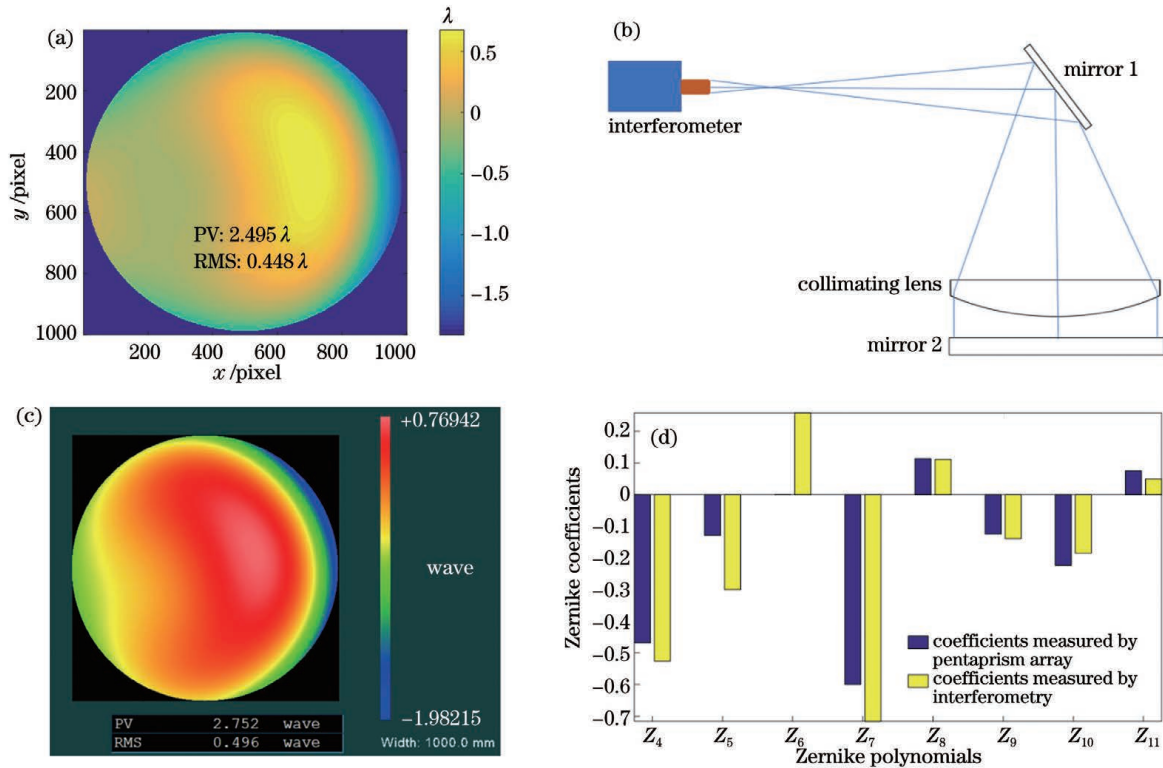


图 9 五棱镜阵列扫描测量结果与干涉法测量结果比较。(a)五棱镜阵列扫描测量结果;(b)干涉法检测光路;(c)干涉法测量结果;(d)两种方法测量结果的 Zernike 多项式系数

Fig. 9 Comparison between pentaprism array scanning measurement results and interferometric measurement results. (a) Pentaprism array scanning measurement results; (b) optical path of interferometric test; (c) interferometric measurement results; (d) Zernike polynomial coefficients of measurement results

$$\mu_{k1} = 0.15 \times 0.00645 \div 300 \approx 3.2 \times 10^{-6}. \quad (8)$$

其次分析导轨直线度不确定度。实验中针对导轨的直线度进行了测量,并在实验数据中扣除了导轨的直线度影响,因此,导轨的直线度不确定度取决于测量方法的不确定度。本文采用的导轨直线度测量方法不确定度为^[19-20]

$$\mu_{k2} = 0.15 \times 0.00645 \div 2 \div 300 \approx 1.6 \times 10^{-6}. \quad (9)$$

接下来讨论环境扰动不确定度。实验中为了减小环境扰动,使五棱镜扫描装置与被测系统尽可能贴近,且将它们放在同一个隔振平台上,环境温度控制为(20±0.2)℃。在 10 min 内,通过单个五棱镜在固定位置监测光斑质心在 CCD 上的漂移,质心位置漂移量最大 0.1 pixel。因此,环境扰动的不确定度为

$$\mu_{k3} = 0.1 \times 0.00645 \div 300 \approx 2.1 \times 10^{-6}. \quad (10)$$

最后仿真分析五棱镜阵列的不确定度。综合以上不确定度分析可以得到五棱镜阵列上单个五棱镜的合成不确定度。由于 Y 方向的三个五棱镜不含有导轨直线度的不确定度,因此, X 方向的五棱镜和 Y 方向的五棱镜合成不确定度分别为

$$\mu_x = \sqrt{\mu_{k1}^2 + \mu_{k2}^2 + \mu_{k3}^2} \approx 4.1 \times 10^{-6}, \quad (11)$$

$$\mu_y = \sqrt{\mu_{k1}^2 + \mu_{k3}^2} \approx 3.8 \times 10^{-6}. \quad (12)$$

按照第 3 节中的仿真方法,在采样的待测面形斜率数据上引入 X 方向和 Y 方向测量斜率的不确定度。

综合上述不确定度进行仿真,得到复原的波前误差 RMS 值作为五棱镜阵列的测量不确定度^[16]。仿真 100 次的最大波前误差结果值为 0.035λ,因此五棱镜阵列扫描法的不确定度为 0.035λ。

5 结 论

本文在传统的五棱镜扫描法基础上,提出了基于非均匀采样的五棱镜阵列扫描测量大口径准直波前的方法,解决了传统五棱镜扫描法检测大口径准直波前全口径三维像差分布时扫描机构复杂且时间冗长的问题。该方法通过三个并联的五棱镜测量准直波前 X 方向斜率,通过三个串联的五棱镜测量 Y 方向斜率,并通过 Zernike 多项式的一阶导数拟合出待测波前的低阶像差。对该方法进行了仿真分析,并检测了 1 m 口径的准直波前,检测结果与采用干涉法测量的结果进行了比较,两种方法测量的准直波前低阶像差分布与数值基本一致,证明了该方法的可行性与准确性。

参 考 文 献

[1] Prakash S, Rana S, Prakash S, et al. Automated collimation testing using a temporal phase shifting technique in Talbot interferometry[J]. Applied Optics, 2008, 47(31): 5938-5943.
 [2] Wang Y, Zhai H C, Jutamulia S, et al. Collimation test of a corrected laser diode beam using lateral shearing interferometer[J]. Optics Communications, 2007, 274(2): 412-416.
 [3] 冯鹏,唐锋,王向朝,等. 双孔点衍射干涉成像系统波像差检测

- 技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0904002.
- Feng P, Tang F, Wang X Z, et al. Dual-hole point diffraction interferometer for measuring the wavefront aberration of an imaging system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0904002.
- [4] Cordero-Davila A, Cornejo-Rodriguez A, Cardona-Nunez O. Null Hartmann and Ronchi-Hartmann tests[J]. Applied Optics, 1990, 29(31): 4618-4621.
- [5] 吴伟, 罗自荣, 于乃辉, 等. 基于夏克-哈特曼传感器的计算机辅助装调方法[J]. 光学学报, 2021, 41(20): 2022001.
- Wu W, Luo Z R, Yu N H, et al. Computer-aided alignment method based on Shack-Hartmann sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2022001.
- [6] 董玉磊, 韦承甫, 刘现魁, 等. 狭缝式自由旋涡气动窗口光学质量测量方法研究[J]. 中国激光, 2021, 48(23): 2304003.
- Dong Y L, Wei C F, Liu X K, et al. Measuring method of slit free-vortex aerodynamic window optical quality [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2304003.
- [7] 华志远, 徐晨. 五棱镜扫描法检测大口径平行光管光束平行性[J]. 光学技术, 2021, 47(5): 582-586.
- Hua Z Y, Xu C. The beam parallelism of large aperture collimator measured by scanning pentaprism method[J]. Optical Technique, 2021, 47(5): 582-586.
- [8] Yellowhair J, Burge J H. Analysis of a scanning pentaprism system for measurements of large flat mirrors [J]. Applied Optics, 2007, 46(35): 8466-8474.
- [9] Mohammadi K, Lee Y S, Jennewein T. Characterization of optical aberrations with scanning pentaprism for large collimators[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 15-20, 2022, San Jose, CA, USA. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2022: AT1D.6.
- [10] 刘兆栋, 于丽娜, 韩志刚, 等. 五棱镜扫描法检测大口径近红外干涉仪准直波前[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1082-1087.
- Liu Z D, Yu L N, Han Z G, et al. Measurement of the wavefront collimation of a large aperture near-infrared interferometer using a scanning pentaprism system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(4): 1082-1087.
- [11] 汤兆鑫, 黄玮, 许伟才, 等. 差分五棱镜扫描法在波前检测中的应用[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 1003-1011.
- Tang Z X, Huang W, Xu W C, et al. Application of differential pentaprism scanning in wavefront detection[J]. Chinese Optics, 2014, 7(6): 1003-1011.
- [12] Mallik P C V, Zhao C Y, Burge J H. Measurement of a 2-meter flat using a pentaprism scanning system[J]. Optical Engineering, 2007, 46(2): 023602.
- [13] Zhu X L, Wang D S, Nie F M, et al. Large-aperture real-time compensated collimating wavefront error detection method[J]. Applied Sciences, 2019, 9(11): 2370.
- [14] 戚二辉, 罗霄, 郑立功, 等. 大口径非圆形光学平面的五棱镜扫描检测技术研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(7): 1370-1375.
- Qi E H, Luo X, Zheng L G, et al. Optical testing of large optical flat mirror with non-circular pupil based on scanning pentaprism technology [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(7): 1370-1375.
- [15] 袁理, 张晓辉. 采用五棱镜扫描法检测大口径平面镜的面形[J]. 中国光学, 2019, 12(4): 921-932.
- Yuan L, Zhang X H. Surface shape measurement of large flat mirrors using a scanning pentaprism method [J]. Chinese Optics, 2019, 12(4): 921-932.
- [16] Qi E H, Hu H X, Luo X. Study on low-order aberration measurements of large-aperture flats based on scanning pentaprism technology[J]. Applied Optics, 2019, 58(4): 787-793.
- [17] 王孝坤, 戚二辉, 胡海翔, 等. 超大口径平面反射镜的光学检测(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 20210953.
- Wang X K, Qi E H, Hu H X, et al. Optical testing of the super-large plane mirror (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 20210953.
- [18] 常山, 曹益平, 陈永权. 五棱镜的运动误差对波前测量的影响[J]. 光学仪器, 2005, 27(3): 12-16.
- Chang S, Cao Y P, Chen Y Q. Kinematic error effect of pentagonal prism on wavefront measurement [J]. Optical Instruments, 2005, 27(3): 12-16.
- [19] Tenjimbayashi K. Straightness measurement of a moving table by using laser beams[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4093: 47-57.
- [20] Hsieh T H, Chen P Y, Jywe W Y, et al. A geometric error measurement system for linear guideway assembly and calibration[J]. Applied Sciences, 2019, 9(3): 574.

Scanning Measurement of Large Aperture Collimated Wavefront with Pentaprism Array Based on Nonuniform Sampling

Liu Weijian¹, Gao Zhishan¹, Ma Yicen¹, Che Xiaoyu¹, Lei Lihua², Fu Yunxia², Yuan Qun¹

¹ School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

² Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China

Abstract

Objective Collimated wavefront is an important parameter to estimate the quality of optical systems such as collimator, interferometer, and camera lens. Pentaprism scanning method is a conventional method to detect large aperture collimated wavefront by continuously collecting the coordinates of the focus of sub-aperture beams along the scanning direction and retrieving the wavefront distribution from the slope of the wavefront. The traditional pentaprism scanning method can only measure the wavefront distribution on one line of the collimated wavefront, and cannot obtain the full aperture aberration distribution of the wavefront. In order to obtain the full aperture aberration distribution of the wavefront, it is necessary to conduct multiple scans to obtain the slopes of multiple lines of the wavefront. This scanning method is often used for the surface shape detection of large aperture flat optical elements, through rotating the optical flat and measuring the slope of the surface in polar coordinates. However, the method is not suitable for measuring the collimated wavefront of the optical system. To measure the full aperture collimated wavefront, two pentaprism scanning systems in the X and Y directions, respectively, are generally required. The scanning mechanisms are complex, time-

consuming, and vulnerable to environmental disturbances. In this paper, pentaprism array is proposed to simplify the scanning mechanism, shorten the scanning detection time of the full aperture collimated wavefront, and realize the rapid detection of the collimated wavefront.

Methods Based on the traditional one-dimensional pentaprism scanning method, we propose to add multiple pentaprisms to form a group of parallel pentaprisms and a group of series pentaprisms, and realize a pentaprism array scanning based on nonuniform sampling to measure the three-dimensional distribution of large aperture collimated wavefront. Three parallel pentaprisms parallel to the scanning direction are used to measure the slope of the collimated wavefront in the X direction, and simultaneously three series pentaprisms perpendicular to the scanning direction are used to measure the slope of the collimated wavefront in the Y direction. All the pentaprisms move along the scanning direction simultaneously. Thus, this method only needs one scanning measurement process to obtain the slopes of the three lines of the wavefront simultaneously. It avoids the process of multiple scanning in the X and Y directions when measuring the full aperture collimated wavefront by the traditional method. The measured slope is fitted with the derivative function of the 4th–11th terms in the Zernike polynomials, and then the three-dimensional distribution of the collimated wavefront is represented by the Zernike polynomials. Only low order aberrations of the wavefront can be fitted since the low sampling rate in the Y direction.

Results and Discussions The feasibility and accuracy of using the slopes of the three lines of the wavefront to reconstruct the wavefront are verified by simulations, in which the reconstruction errors of the collimated wavefront with the pentaprism array are peak-to-valley (PV) value of 0.058λ and root-mean-square (RMS) value of 0.009λ (Fig. 3). The analysis for robustness of the proposed method is also given (Fig. 4). The proposed method is used to detect the collimated wavefront with the aperture of 1 m (Fig. 5). After correcting the mechanical scanning errors, the PV and RMS values of the measured wavefront are 2.495λ and 0.448λ , respectively. As a comparison, detection of the wavefront is also carried out with interferometry, with which the PV and RMS values of the measured wavefront are 2.752λ and 0.496λ , respectively. The retrieved collimated wavefront results obtained by the two methods are basically consistent, with nearly the same values and distribution form, which proves the feasibility of this method (Fig. 9). The uncertainty analysis of the pentaprism array scanning method is carried out, including uncertainty of spot centroid detection, uncertainty of the rail straightness and uncertainty of environmental disturbance. The combined uncertainty of the proposed method is 0.035λ .

Conclusions Based on the traditional pentaprism scanning method, in this paper we propose a pentaprism array scanning method based on nonuniform sampling to measure the large aperture collimated wavefront. It solves the problem of complex and time-consuming scanning mechanism for the traditional pentaprism scanning method to detect the full aperture three-dimensional aberration distribution of large aperture collimated wavefront. This method measures the slope of the collimated wavefront in the X direction through three pentaprisms in parallel and the slope in the Y direction through three pentaprisms in series, and fits the low order aberration of the wavefront through the derivative of Zernike polynomials. The proposed method is simulated and analyzed, and the collimated wavefront with the aperture of 1 m is detected. The detection results are compared with the collimated wavefront measured by interferometry. The low order aberration distributions of the collimated wavefront measured by the two methods are basically consistent with the numerical value, which proves the feasibility and accuracy of the proposed method. The uncertainty analysis of the pentaprism array scanning method is also carried out, which demonstrates the measurement accuracy of the proposed method.

Key words measurement; pentaprism scanning method; wavefront detection; nonuniform sampling; wavefront reconstruction