

参考面误差对平面子孔径拼接的影响

李萌阳, 曹庭分, 袁晓东*, 张尽力, 刘长春, 易聪之, 陈海平, 全旭松

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 参考面二阶项(离焦和像散)误差是导致拼接累积误差的主要因素,而参考面高阶误差会导致高频面形误差。分析由参考面误差二阶项和高阶项导致的拼接误差的规律。研究参考面误差导致任意两个子孔径拼接误差之间的关系。提出一种可以有效减小参考面高阶项误差对子孔径拼接结果影响的算法。该算法将拼接后的子孔径面形数据对应相减,分离出参考面高阶项误差的拼接误差。数据仿真和实验验证表明了该算法的正确性和有效性。

关键词 测量;干涉测量;子孔径拼接;参考面误差;拼接误差

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1204006

Effect of Reference Surface Error on Subaperture Stitching for Flat Optics

Li Mengyang, Cao Tingfen, Yuan Xiaodong*, Zhang Jinli, Liu Changchun,

Yi Congzhi, Chen Haiping, Quan Xusong

Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The second-order (defocusing and astigmatism) error of the reference surface is the major factor that results in accumulated stitching errors, whereas the higher-order errors of the reference surface will result in high-frequency shape errors. Subsequently, the law of stitching errors caused by the second- and higher-order errors of the reference surface is analyzed, and the relation between any two subaperture stitching errors that can be attributed to the reference surface error is studied. Further, an algorithm is proposed to effectively reduce the influences of the higher-order errors of the reference surface on the subaperture stitching results. The stitching errors of the higher-order errors of the reference surface are isolated using this algorithm to eliminate the stitched surface data of any two subapertures. Furthermore, the validity and effectiveness of this algorithm are verified using simulations and experiments.

Key words measurement; interferometry; subaperture stitching; reference surface error; stitching error

OCIS codes 120.3180; 120.6650; 120.6660

1 引言

随着科学技术的发展,大口径平面光学元件在天文学、空间光学、军事和能源等领域中的应用越来越广泛。目前对于大口径平面光学元件的高精度面形检测,研究人员普遍采用大口径干涉仪检测和子孔径拼接干涉测量 2 种方法。相比大口径干涉仪,子孔径拼接干涉测量不仅成本低,而且还保留了小口径干涉测量的高空间分辨率和高测量精度的优点,目前已经成为一种有效的大口径面形测量手段^[1]。

子孔径拼接干涉测量的基本思路是将被测面划分为多个子孔径,然后用小口径干涉仪按照事先规划的路径对子孔径进行扫描测量,通过子孔径拼接算法^[2]获得全口径的被测面面形。干涉仪的实际参考面为非理想平面,会使拼接过程中产生误差,降低拼接测量的精度。Bray^[3]在 2001 年指出,参考面的二阶项误差(包括离焦和像散)是影响拼接累积误差的主要因素。卢云君等^[4]在 2018 年通过对比研究发现,两两拼接算法与误差均化算法都无法控制参考面误差中二阶项误差在拼接过程中的累积放大。Burge 等^[5]在 2012 年给出了圆形子孔径拼接时参

收稿日期: 2019-07-19; 修回日期: 2019-08-14; 录用日期: 2019-08-29

* E-mail: yxd66my@163.com

考面像散项误差的累积规律。随后 2015 年,李永等^[6]推导了一维拼接时累积误差与参考面离焦误差的表达式。本文对圆形子孔径拼接测量大口径平面,以及参考面的二阶项误差和高阶项误差所对应的拼接误差情况进行研究。

要提高子孔径拼接干涉测量的精度,必须对参考面误差进行抑制。常用的抑制参考面误差的方法主要有两种:一种是用绝对测量法标定参考面误差^[7-9],然后将其从子孔径中扣除,再进行拼接计算;另一种是采用分离参考面误差的子孔径拼接算法^[5-6,10-13]。这些算法大多在拼接过程中引入参考面分离算法,增加了计算的数据量、复杂度和运行时间。通过研究参考面误差导致的各个子孔径拼接误差之间的关系,本文提出一种可以有效减小参考面高阶项误差对子孔径拼接结果中高频面形影响的算法,对拼接后的面形数据进行参考面误差分离。通过数据仿真和实验计算验证本方法的正确性和有效性。

2 子孔径拼接检测原理

2.1 基本原理

将全口径被测量面划分为 M 个子孔径,选择其中一个子孔径 $\phi_m(x, y)$ 为基准,则第 i 个子孔径 ($i = 1, \dots, m-1, m+1, \dots, M$) 相对于该基准孔径存在沿 x 轴和 y 轴方向的倾斜及沿光轴方向的位移,即

$$\phi_i(x, y) = \phi'_i(x - x_0, y - y_0) + a_i x + b_i y + c_i, \quad (1)$$

式中: $\phi_i(x, y)$ 为全局坐标系下第 i 个子孔径的相位真实值; $\phi'_i(x - x_0, y - y_0)$ 为第 i 个子孔径的相位值测量值; (x_0, y_0) 为第 i 个子孔径相对于基准子孔径的坐标平移量; a_i, b_i, c_i 为子孔径的面形调整系数。

子孔径误差均化拼接算法^[14]是一种常用的拼接算法,它根据相邻子孔径重叠区域相位数据的相关性,调整每个子孔径的倾斜和位移来恢复大尺寸被测面形。子孔径误差均化拼接算法不受子孔径拼接顺序的影响,使用最小二乘法,使第 i 个子孔径中所有的重叠区域内、相同位置处相位值差值的平方和最小,即使

$$S_i = \sum_{j=1}^M \left\{ \sum_{i \cap j} [(\phi'_i - \phi'_j) + (a_i - a_j)x + (b_i - b_j)y + (c_i - c_j)]^2 \right\} \rightarrow \min. \quad (2)$$

对所有的非基准子孔径 i 都应用(2)式进行计

算,其中 j 表示与子孔径 i 有重叠区域 $i \cap j$ 的子孔径。这样,就可求解出所有子孔径的调整系数。

2.2 参考面误差的影响

子孔径误差均化拼接算法虽然能减小全局误差和由拼接顺序导致的累积误差,但它无法抑制参考面的二阶项误差的累积扩大。当被测量面在测量时不存在旋转,该累积误差(离焦或像散)面形的 Zernike 系数 C_{accu} 与参考面对应误差的 Zernike 系数 C_{ref} 之间的关系为

$$C_{\text{accu}} = (D/d)^2 \times C_{\text{ref}}, \quad (3)$$

式中: D 为全口径圆形被测件的直径, d 为子孔径的直径。根据 Zernike 多项式的性质可知,(3)式也可看作参考面二阶项的累积误差与对应参考面二阶项误差的均方根(RMS)值之间的关系。(3)式针对的是圆形被测量面的测量,当被测量面是其他形状时,可先根据(3)式计算该被测量面的外接圆区域所对应的累积误差,然后根据被测量面与其外接圆之间的位置关系,求得该被测量面的累积误差。

参考面中的高阶项并不会引起误差累积扩大现象,此时拼接误差的 RMS 值与参考面高阶项误差的 RMS 值相差不大,但会存在明显的高频误差。本文的高阶项指比二阶项更高阶的 Zernike 像差项。

拼接前,各个子孔径具有相同的参考面误差;拼接后,参考面误差导致各个子孔径区域具有不同的拼接误差。无论是参考面二阶项误差或是高阶项误差,在第 i 和第 j 个子孔径区域内引入的拼接误差 $\Delta\phi''_i$ 和 $\Delta\phi''_j$ 之间的关系为

$$\Delta\phi''_i(x_s, y_s) - \Delta\phi''_j(x_s, y_s) = (a_s x_s + b_s y_s + c_s)_{i \cap j}, \quad (4)$$

式中: (x_s, y_s) 为子孔径坐标系下的坐标; a_s, b_s, c_s 为在子孔径坐标系下,第 i 和第 j 个子孔径有交集的数据区域内的拼接误差的相对倾斜和平移系数。

2.3 抑制参考面误差的算法

根据(4)式的规律,本文提出一种抑制参考面误差的算法。子孔径拼接完成后,子孔径坐标系下的两个子孔径的面形差为

$$\phi''_i(x_s, y_s) - \phi''_j(x_s, y_s) = \sum_{k=1}^K [Z_k(x, y)_i - Z_k(x, y)_j] C_k + (a_s x_s + b_s y_s + c_s), \quad (5)$$

式中: $\phi''_i(x_s, y_s)$ 和 $\phi''_j(x_s, y_s)$ 分别为子孔径坐标系下,第 i 和 j 个子孔径拼接后的相位值; k 为 Zernike 项数; K 为用于数据拟合的 Zernike 的总项数; C 为全

口径被测面的 Zernike 系数; $Z_k(x, y)_i$ 为全局坐标系下, 第 i 个子孔径位置处的第 k 项 Zernike 值。

由于参考面误差对拼接结果的影响, 无法简单区分系数 a_s, b_s, c_s 与被测面系数的倾斜平移项, 因此使用(5)式无法准确得到被测面的倾斜和平移项系数, 而其他项系数则可通过最小二乘法进行拟合。为确保结果的准确性, 令 $i=m, j$ 从 1 到 M 进行变化且 $j \neq i$, 依次使用(5)式进行计算, 然后将所有结果同时使用最小二乘法进行计算, 最终得到全口径被测面的 Zernike 拟合系数, 进而重构出被测面面形。

3 参考面误差对拼接结果影响的仿真分析

模拟用直径为 100 mm 的子孔径对直径为 180 mm 的待测件进行子孔径拼接, 重叠率大于 30%, 子孔径和全口径的位置关系如图 1(a) 所示, 深色阴影部分是全口径位置。对子孔径的扫描测量顺序进行规划, 并设子孔径之间存在倾斜和沿光轴方向的平移误差, 如图 1(b) 所示。不考虑随机噪声的影响, 本课题组模拟子孔径中存在不同参考面误差时, 拼接结果包含的拼接累积和误差的情况。根据(3)式可预知, 拼接面形的二阶项累积误差是参考面形的二阶项误差的 3.24 倍。

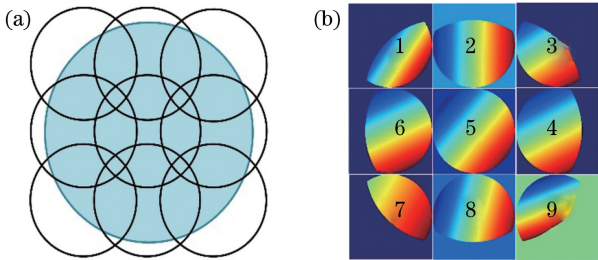


图 1 子孔径的位置及相关误差。(a)子孔径与全口径的位置分布;(b)含有相对倾斜、平移误差的子孔径

Fig. 1 Positions and correlation errors of subapertures.

(a) Position distributions of subapertures and full aperture; (b) subapertures with relative tilt and translation error

3.1 离焦项误差

在每个子孔径中都加入参考面离焦误差, 模拟子孔径的参考面误差只有 Zernike 离焦项 Z_4 时的拼接情况。图 2(a) 是 Z_4 项系数为 0.05λ 时的参考面误差。图 2(b) 是拼接计算后得到的参考面离焦项的累积误差。从图 2(a) 和图 2(b) 的结果可以得出, 拼接累积误差与对应的参考面离焦误差

之比约为 3.24。图 2(c) 是子孔径 4 与子孔径 5 在子孔径拼接完成后, 将它们的累积误差对应相减得到的结果, 该结果只含有倾斜量和平移量。

3.2 像散项误差

模拟参考面误差只有 Zernike 像散项 (Z_5 和 Z_6) 时的拼接情况。图 3(a) 是 Z_5, Z_6 项系数分别为 0.05λ 和 -0.05λ 时的参考面误差。图 3(b) 是拼接计算后得到的参考面像散项的累积误差。从图 3(a) 和图 3(b) 的结果可得, 拼接累积误差与对应的参考面像散误差之比约为 3.24。图 3(c) 是将拼接后的子孔径 4 与子孔径 5 的累积误差对应相减得到的结果, 该结果与图 2(c) 类似, 同样只含有倾斜量和平移量, 只是倾斜系数不同。

3.3 参考面高阶项误差

模拟参考面误差只有 Zernike 彗差项 (Z_7 和 Z_8) 时的拼接情况。图 4(a) 是 Z_7, Z_8 项系数都为 0.05λ 时的参考面误差。图 4(b) 是拼接计算后得到的参考面彗差项的累积误差。从图 4(a) 和图 4(b) 中可以发现, 拼接误差的峰谷 (PV) 值和 RMS 值在数值上与参考面误差相差不大, 但在每个子孔径区域内都有更高频的“拼接痕迹”, 对高频面形的测量结果有很大的影响。这一结论适用于包含比 Zernike 离焦项和像散项更高阶的参考面误差的拼接误差。图 4(c) 是子孔径 4 与子孔径 5 的拼接误差之差, 该结果中依然只含有倾斜量和平移量。

表 1 列出了当参考面误差只含二阶项 ($Z_4 \sim Z_6$) 误差和高阶项 ($Z_7 \sim Z_{36}$) 误差时, 参考面误差 (RE)、拼接误差 (SE) 各自的 RMS 值以及两者的比值 R_{SE}/R_{RE} 。从表 1 中可知, 参考面二阶项误差导致的拼接累积误差约是二阶项误差的 3.24 倍, 参考面高阶项误差与其导致的拼接累积误差的 RMS 值之比约为 1。

研究表明, 全口径圆形被测件的直径与子孔径的直径不变时, 改变重叠率不影响参考面二阶项误差的累积误差结果; 而参考面高阶项误差的拼接误差结果会随重叠率的增加而减小, 如表 2 所示。参考面误差在经过子孔径拼接后, 在各个子孔径面形中导致的拼接误差不同, 将任意两个子孔径中来自于参考面误差的拼接误差相减, 都会得到倾斜面形。为了详细说明, 图 5 为 3 组子孔径的拼接误差之差的去倾斜结果, 可以看出这些拼接误差之差都只包含倾斜和常数项。此外, 理想仿真条件下, 参考面误差导致的拼接误差与被测平面光学元件的实际面形无关。

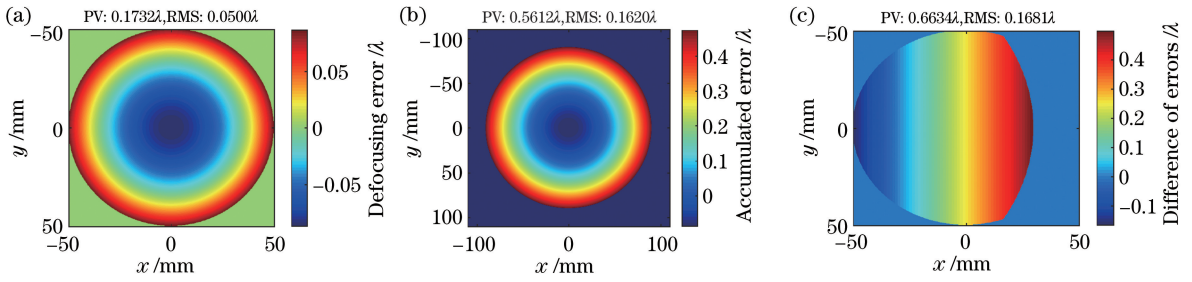


图2 子孔径的离焦项误差仿真。(a)参考面的离焦误差;(b)参考面的累积误差;(c)子孔径4与子孔径5的累积误差之差
Fig. 2 Simulation of defocusing errors of subaperture. (a) Defocusing error of reference surface; (b) accumulated error of reference surface; (c) difference between accumulated errors of subapertures 4 and 5

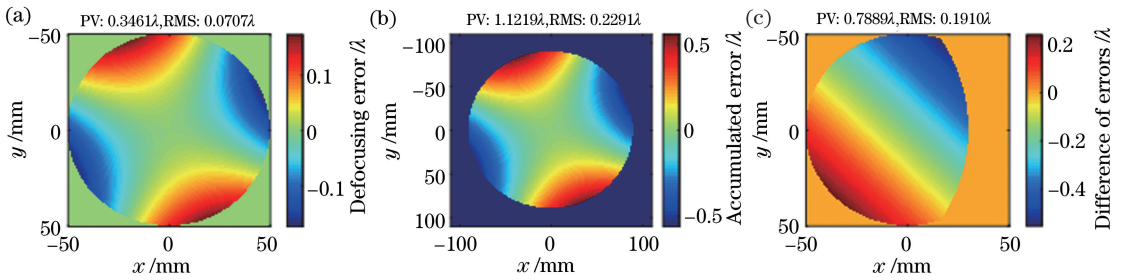


图3 子孔径的像散项误差仿真。(a)参考面的像散误差;(b)参考面的累积误差;(c)子孔径4与子孔径5的累积误差之差
Fig. 3 Simulation of astigmatic errors of subaperture. (a) Astigmatism error of reference surface; (b) accumulated error of reference surface; (c) difference between accumulated errors of subapertures 4 and 5

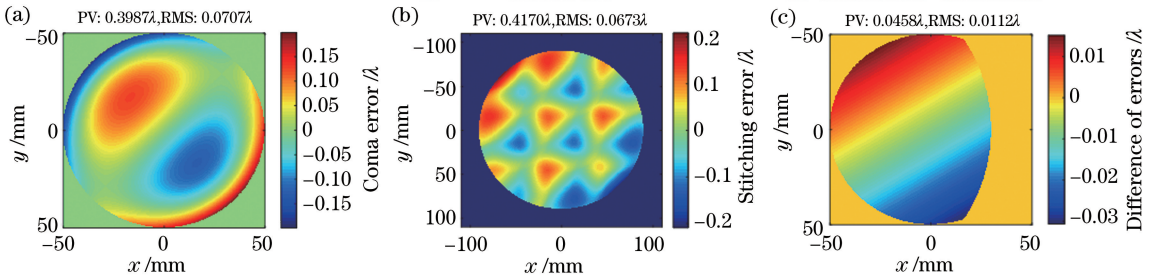


图4 子孔径的高阶项误差仿真。(a)参考面的彗差误差;(b)参考面的拼接误差;(c)子孔径4与子孔径5的拼接误差之差
Fig. 4 Simulation of higher-order errors of subaperture. (a) Coma error of reference surface; (b) stitching error of reference surface; (c) difference between stitching errors of subapertures 4 and 5

表1 参考面误差与拼接误差的RMS值对比

Table 1 Comparison of RMS of reference surface error and stitching error

RMS value		Second order error (Z4~Z6)				Higher order error (Z7~Z36)			
RE /λ	0.1223	0.1018	0.0539	0.0738	0.1011	0.0609	0.0852	0.0976	
SE /λ	0.3963	0.3297	0.1746	0.2390	0.0935	0.0677	0.0767	0.1111	
R _{SE} /R _{RE}	3.2404	3.2387	3.2393	3.2385	0.9248	1.1117	0.9002	1.1383	

表2 参考面高阶项误差导致的拼接误差与重叠率之间的关系

Table 2 Relationship between stitching error resulted from higher-order error of reference surface and overlapping ratio

Overlapping ratio /%	39.10	36.91	34.75	32.62	30.53	28.48
Stitching error / (10 ⁻² λ)	4.08	4.43	4.78	5.15	5.53	5.92

3.4 参考面误差的校正

模拟参考面只含有高阶项误差(选择 Z7~Z36项)时的情况。首先,随机产生一个图6(a)所示的被测面,将其划分为 3×3 个子孔径,每个子孔径中

含有图6(d)所示的高阶参考面误差以及随机的倾斜和平移误差。然后,使用误差均化拼接算法进行子孔径拼接,得到图6(b)所示的拼接结果,它与被测面之差为图6(e)所示的拼接误差。接着,使用本

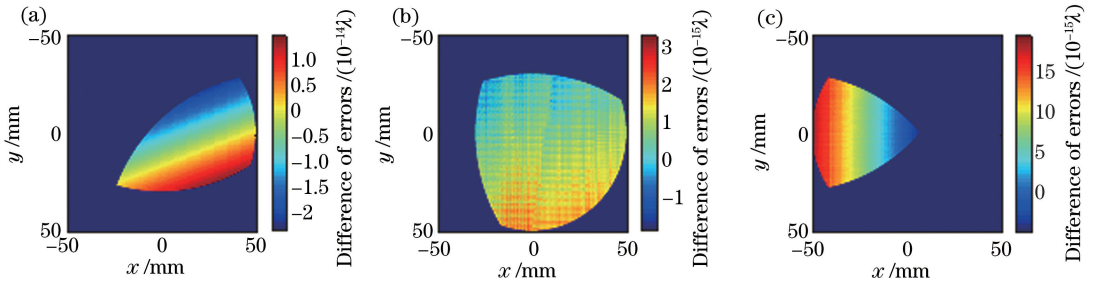


图 5 3 组子孔径拼接误差之差的去倾斜结果。(a)子孔径 1 与 8;(b)子孔径 2 与 6;(c)子孔径 3 与 9
Fig. 5 Results of difference among 3 sets of subaperture stitching errors after removing tilt. (a) Subapertures 1 and 8; (b) subapertures 2 and 6; (c) subapertures 3 and 9

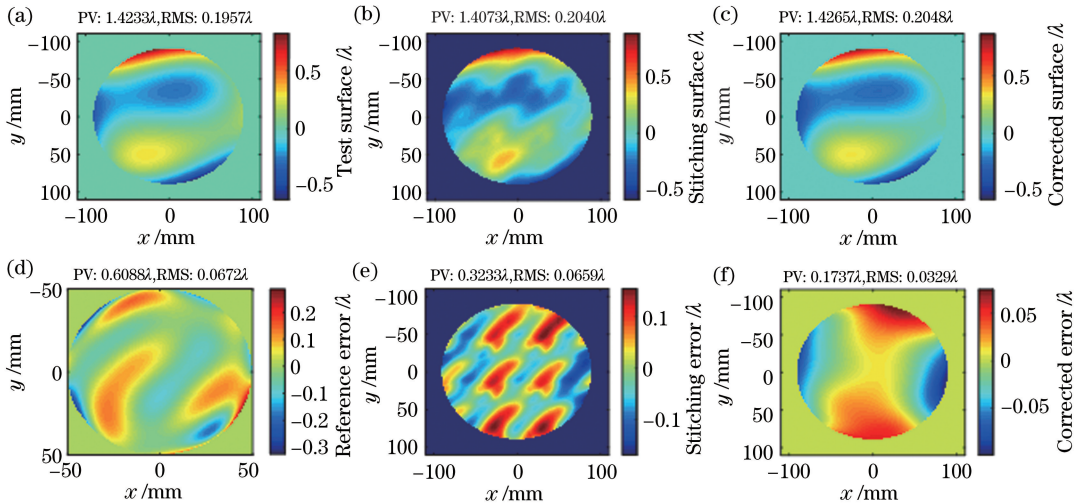


图 6 参考面误差校正模拟。(a)被测面;(b)拼接后的被测面;(c)算法校正后的被测面;
(d)参考面的误差;(e)拼接误差;(f)校正误差

Fig. 6 Simulation of reference surface error correction. (a) Test surface; (b) test surface after stitching; (c) test surface corrected by algorithm; (d) reference surface error; (e) stitching error; (f) corrected error

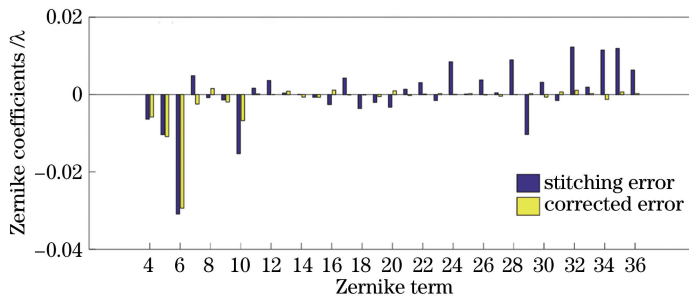


图 7 拼接误差与校正误差分别对应的 Zernike 系数

Fig. 7 Zernike coefficients corresponding to stitching and corrected errors

文算法对拼接结果进行校正,得到图 6(c)所示的校正面形,该面形与被测面形之差为图 6(f)所示的校正误差,该校正误差主要为第 6 项的 Zernike 像散项像差。对拼接误差和校正误差各自对应的 Zernike 拟合系数进行比较,结果如图 7 所示。通过图 6 和图 7 的结果可以发现,本文算法对参考面高阶项误差导致的高频拼接误差有很好的抑制作用,但对二阶项误差的抑制效果不明显。

4 实验

实验采用 4D 公司的 100 mm AccuFiz 动态干涉仪构建平面子孔径拼接干涉测量装置,对直径 150 mm 的平面镜进行子孔径拼接干涉测量。如图 1(a)所示,采用 3×3 个子孔径进行二维拼接扫描测量。参考了文献[8]中的方法,对参考面误差进行标定测量,得到参考面误差,如图 8(a)所示。

为方便比较面形和其 PV 和 RMS 数值,将面形数据导入 MetroPro 软件进行显示和分析。直接将子孔径测量结果进行拼接,得到如图 8(b)所示的结果。从图 8(b)的拼接结果中去除第 2~6 项(倾斜、离焦和像散项)Zernike 面形,得到如图 8(c)的结果,显然拼接面形受到了参考面高阶项误差的影响,存在高频的“拼接痕迹”。使用本文算法对

图 8(b)的结果进行校正,去除第 2~6 项 Zernike 面形后,得到结果如图 8(d)所示。从每个子孔径测量结果逐一扣除参考面误差后进行拼接计算,再去掉拼接结果中的第 2~6 项 Zernike 面形,得到图 8(e)的结果。对比图 8(c)~(e)结果可以看出,本文算法对参考面的高阶面形误差有很好的抑制作用。

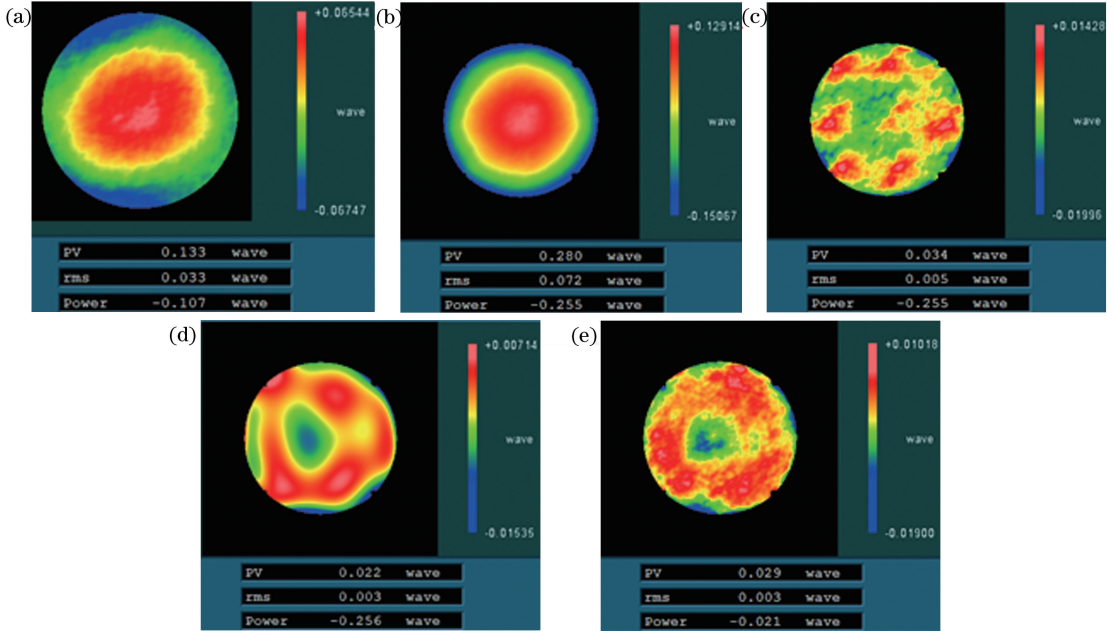


图 8 参考面误差校正实验结果。(a)参考面误差;(b)拼接结果;(c)去除 Z2~Z6 项的拼接结果;(d)拼接误差校正结果;(e)去除参考面误差的拼接结果

Fig. 8 Experiment results of reference surface error correction. (a) Reference surface error; (b) stitching result; (c) stitching result after removing Z2-Z6 items; (d) corrected result of stitching error; (e) stitching result after removing reference surface error

5 结 论

分析分别由参考面二阶项误差和高阶项误差导致的拼接误差对平面子孔径拼接的影响。参考面二阶项误差在拼接后会导致离焦和像散误差累积扩大;而参考面高阶项误差在误差量级上对拼接结果影响不大,但会产生高频面形误差。参考面误差在子孔径拼接后,导致各个子孔径面形具有不同的拼接误差,将任意两个子孔径面形中的拼接误差相减,都会得到倾斜面形。重叠率不影响参考面二阶项误差对拼接误差的贡献,但参考面高阶项误差的拼接误差结果随重叠率的增加而减小。同时提出了一种有效抑制参考面高阶项误差的算法,通过面形数据仿真和实验结果计算,验证了该算法的有效性和正确性。结果表明,本文算法能有效减小参考面高阶项误差对子孔径拼接面形中高频误差的影响,提高

了子孔径拼接干涉测量中的高频面形的测量精度。

参 考 文 献

- [1] Wang X K. Testing of a large rectangular mirror based on sub-aperture stitching method[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(S1): S11201.
- [2] Chen S Y, Xue S, Wang G L, *et al.* Subaperture stitching algorithms: a comparison [J]. Optics Communications, 2017, 390: 61-71.
- [3] Bray M. Stitching interferometry and absolute surface shape metrology: similarities[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4451: 375-383.
- [4] Lu Y J, Tang F, Wang X Z, *et al.* Analysis on the accuracy of flat sub-aperture stitching interferometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45 (4): 0404002.

卢云君, 唐锋, 王向朝, 等. 平面子孔径拼接干涉测量精度分析[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0404002.

- [5] Burge J H, Zhao C Y. Applications of subaperture stitching interferometry for very large mirrors [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8450: 84500X.
- [6] Li Y, Tang F, Lu Y J, *et al.* A method for reducing the error accumulation in sub-aperture stitching interferometer for flat optics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0708006.
李永, 唐锋, 卢云君, 等. 一种降低平面子孔径拼接累积误差的方法 [J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708006.
- [7] Chen S Y, Dai Y F, Li S Y, *et al.* Error reductions for stitching test of large optical flats [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(5): 1543-1550.
- [8] Bloemhof E E. Absolute surface metrology by differencing spatially shifted maps from a phase-shifting interferometer [J]. Optics Letters, 2010, 35(14): 2346-2348.
- [9] Jia X, Xu F C, Xie W M, *et al.* Absolute testing of surface based on sub-aperture stitching interferometry [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9449: 944933.
- [10] Deng W T, Wang K W, Bai J, *et al.* Elimination of reference surface error on high-accuracy subaperture stitching [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1194-1199.
邓万涛, 汪凯巍, 白剑, 等. 高精度子孔径拼接中参考面误差的去除方法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1194-1199.
- [11] Zhu P H, Tang F, Lu Y J, *et al.* Research on high accuracy sub-aperture stitching algorithm for flat optics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1104002.
朱鹏辉, 唐锋, 卢云君, 等. 高精度平面子孔径拼接算法研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1104002.
- [12] Chen Y C, Liang C W, Chang H S, *et al.* Reconstruction of reference error in high overlapping density subaperture stitching interferometry [J]. Optics Express, 2018, 26(22): 29123-29133.
- [13] Chen S Y, Wu C C, Tie G P, *et al.* Stitching test of large flats by using two orthogonally arranged wavefront interferometers [J]. Applied Optics, 2017, 56(33): 9193-9198.
- [14] Otsubo M, Okada K, Tsujiuchi J. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms [J]. Optical Engineering, 1994, 33(2): 608-613.