

平面子孔径拼接干涉测量精度分析

卢云君, 唐锋, 王向朝, 郭福东

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

摘要 如何提高子孔径拼接干涉测量精度是子孔径拼接系统的关键问题。针对一维平面子孔径拼接系统, 分别采用两两拼接算法和误差均化拼接算法, 进行拼接位移台定位误差、参考面面形误差和随机噪声对拼接精度影响的数值仿真与分析。仿真结果表明, 对于平面拼接系统, 参考面高阶误差、随机噪声对拼接精度影响较小, 高阶误差的影响略大于随机噪声的影响; 参考面低阶误差(二阶项误差)在拼接过程中会累积放大, 是平面拼接干涉测量的主要误差来源, 误差均化拼接算法不能有效控制参考面低阶误差的拼接累积误差; 两两拼接算法与误差均化拼接算法得到基本相同的拼接结果。对 $450\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 的平面镜进行了 15 个子孔径的拼接测量, 去除参考面低阶误差面形前后, 拼接结果与大口径干涉仪的测量结果偏差从 $\lambda/3$ [峰谷值(PV), $\lambda = 632.8\text{ nm}$] 减小至 $\lambda/45$ (PV)。

关键词 测量; 平面子孔径拼接; 拼接精度; 拼接算法; 累积误差

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0404002

Analysis on the Accuracy of Flat Sub-Aperture Stitching Interferometry

Lu Yunjun, Tang Feng, Wang Xiangzhao, Guo Fudong

Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract How to improve the sub-aperture stitching interferometry accuracy is critical for the sub-aperture stitching system. For one-dimensional flat sub-aperture stitching system, the influence of the stitching stage positioning error, the reference surface error and random noise on the stitching accuracy is simulated and analyzed of data based on both double sub-aperture stitching algorithm and error averaging stitching algorithm. The simulation results show that, the flat stitching system is insensitive to the high order errors of reference surface and the random noise. The stitching error of the high order errors of reference surface is a little larger than that of the random noise. The low order errors (the second order errors) of the reference surface will be accumulated and enlarged during the stitching process, which is the main error source for the flat stitching interferometry. The stitching accumulation error of the low order errors of the reference surface cannot be effectively controlled by the error averaging stitching algorithm. The double sub-aperture stitching algorithm and the error averaging stitching algorithm almost get the same stitching result. A flat mirror with aperture of $450\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ is tested by 15 sub-apertures. The deviation between the stitching result and the test result of a large aperture interferometer is reduced from $\lambda/3$ [peak valley value (PV), $\lambda = 632.8\text{ nm}$] to $\lambda/45$ (PV) after removing the low order errors of the reference surface.

Key words measurement; flat sub-aperture stitching; stitching accuracy; stitching algorithm; accumulation error

OCIS codes 120.3180; 120.6650; 120.6660

1 引言

随着现代光学的发展, 大口径光学平面元件在极大规模集成电路制造、天文望远镜和惯性约束聚变等系统中得到了广泛的应用, 这对大口径

光学元件的面形检测精度提出了很高的要求。与大口径干涉仪相比, 子孔径拼接干涉测量仪具有测量空间分辨率高、测量口径大、子孔径测量精度高和系统成本低的优点。子孔径拼接方法自 20 世纪 80 年代由美国亚利桑那大学光学中心的 Kin

收稿日期: 2017-09-07; 收到修改稿日期: 2017-10-24

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011zx02402-003)

作者简介: 卢云君(1985—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事光电检测及子孔径拼接测量技术方面的研究。

E-mail: luyj@siom.ac.cn

等^[1]提出以后,便得到了广泛的研究与应用。1997年,Bray^[2]研发的拼接干涉仪成功应用于国家点火装置(NIF)和兆焦耳激光装置(LMJ)等惯性约束聚变(ICF)系统的大口径平面光学元件检测中。进入21世纪,美国QED公司和英国Zeeko公司相继开发出商用的子孔径拼接干涉仪^[3-5]。在国内,1992年,上海科技大学陈明仪等^[6]提出多子孔径重叠扫描技术(MAOST)。南京理工大学、浙江大学、四川大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等科研单位也在子孔径拼接检测技术方面开展了很多研究工作^[7-12]。本课题组以光刻机方镜的面形为检测目标,进行了一维平面子孔径拼接系统的研制^[13],开展了一系列硬件与算法^[14-15]方面的优化工作。

子孔径拼接方法是指将大口径镜面按照一定的规则划分为若干个相互重叠的子孔径,每个子孔径用小口径干涉仪进行测量,利用子孔径在重叠区域的数据进行各个子孔径拼接系数的计算,恢复全口径面形。影响子孔径拼接测量精度的主要因素有拼接位移台的定位误差、拼接算法误差、环境变化引起的随机噪声以及干涉仪参考面面形误差等。目前子孔径定位主要依靠拼接位移台的高精度运动来实现。在拼接算法方面,利用重叠区域的子孔径数据计算拼接调整系数。参考面面形误差和随机误差的存在,降低了子孔径的测量精度。对于两两拼接,随着拼接次数的增多,拼接计算误差会在拼接过程中不断累积放大。李国培等^[16]、程刚等^[17]均采用误差均化拼接算法,将多个子孔径的重叠区域同时参与拼接系数的计算,防止误差累积。

对于平面拼接测量,本文对两两拼接算法和误差均化拼接算法进行仿真计算,对比拼接系数和拼接结果,发现相比两两拼接,误差均化拼接算法对拼接误差有一定“平均”作用,但是这种“平均”效果无法控制参考面面形误差中的低阶误差在拼接过程中的累积放大。对于参考面面形误差累积效应,中国科学院上海光学精密机械研究所^[14-15]针对参考面面

形误差在平面检测拼接过程中所产生的累积误差进行了理论分析和数值仿真,指出参考面的二阶项误差是平面拼接测量的主要误差来源,通过对拼接数据的处理实现对累积误差的有效控制,实现高精度平面拼接检测。

2 子孔径拼接的基本原理

图1描述了平面子孔径拼接干涉仪的基本原理。 W_j 和 W_{j+1} 是相邻的两个子孔径,它们之间有一部分区域互相重叠。理论上,在重叠区域内 W_j 和 W_{j+1} 两次检测得到的波前应该是一致的,实际上由于测量过程中存在机械定位误差,每个子孔径的测量结果中包含倾斜和平移误差:

$$\begin{cases} W_j(x,y) = W_{j,0}(x,y) + a_jx + b_jy + c_j \\ W_{j+1}(x,y) = W_{j+1,0}(x,y) + a_{j+1}x + b_{j+1}y + c_{j+1} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $W_j(x,y)$ 和 $W_{j+1}(x,y)$ 表示测得的两个子孔径面形, $W_{j,0}(x,y)$ 、 $W_{j+1,0}(x,y)$ 分别表示两个子孔径的实际面形; a_j 、 b_j 分别表示 W_j 沿 x 、 y 方向的倾斜量, c_j 表示 W_j 沿光轴方向的平移量; a_{j+1} 、 b_{j+1} 分别表示 W_{j+1} 沿 x 、 y 方向的倾斜量, c_{j+1} 表示 W_{j+1} 沿光轴方向的平移量。在 $W_j(x,y)$ 和 $W_{j+1}(x,y)$ 的重叠区域, $W_{j,0}(x,y) = W_{j+1,0}(x,y)$,因此有:

$$W_j(x_1, y_1) - a_jx_1 - b_jy_1 - c_j - [W_{j+1}(x_2, y_2) - a_{j+1}x_2 - b_{j+1}y_2 - c_{j+1}] = 0. \quad (2)$$

式中, x_1 、 y_1 和 x_2 、 y_2 分别表示子孔径 W_j 和子孔径 W_{j+1} 的位置坐标, x_0 和 y_0 分别表示子孔径 W_{j+1} 相对于子孔径 W_j 的位置坐标的平移量。

两个相邻子孔径在重叠区域的位置坐标满足: $x_1 = x_2 + x_0$, $y_1 = y_2 + y_0$,于是有: $W_{j+1}(x_2, y_2) - W_j(x_2 + x_0, y_2 + y_0) = \Delta a_jx_2 + \Delta b_jy_2 + \Delta c_j$,其中, $\Delta a_j = a_{j+1} - a_j$, $\Delta b_j = b_{j+1} - b_j$, $\Delta c_j = c_{j+1} - c_j - a_jx_0 - b_jy_0$ 。

对于一组包含 n 个子孔径的拼接测量数据,一共有 $n-1$ 个上述的方程组,通过最小二乘拟合,可

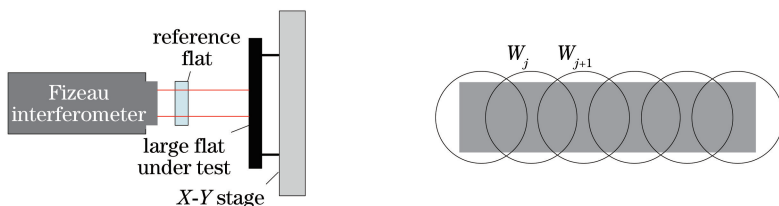


图1 平面子孔径拼接干涉仪的基本原理

Fig. 1 Basic principle of plane sub-aperture stitching interferometer

以得到 $n-1$ 组 $[\Delta a_j, \Delta b_j, \Delta c_j]$ 。以第一个子孔径为基准子孔径,令 $a_1=0, b_1=0, c_1=0$,则对应第 j 个子孔径的拼接修正系数如下:

$$\begin{cases} a_j = \Delta a_{j-1} + a_{j-1} = \sum_{k=1}^{j-1} \Delta a_k \\ b_j = \Delta b_{j-1} + b_{j-1} = \sum_{k=1}^{j-1} \Delta b_k \\ c_j = \Delta c_{j-1} + c_{j-1} = \sum_{k=1}^{j-1} \Delta c_k + \sum_{k=1}^{j-1} a_k x_0 + \sum_{k=1}^{j-1} b_k y_0 \end{cases} \quad (3)$$

从上述的两两拼接过程中可以看出,如果存在拼接误差,随着拼接次数的增加,拼接误差会在拼接过程中不断累积放大。

为了降低拼接累积误差的影响,提出了改进的误差均化拼接算法^[16-17],所有子孔径所包含的重叠区域同时参与拼接计算。算法原理如下:

$$\begin{aligned} S = & \sum_{j=1}^n \{ [W_{j1}(x, y) + f_j] - \\ & [W_{1j}(x, y) + f_1] \}^2 + \dots + \\ & \sum_{j=m-1}^n \{ [W_{j(m-1)}(x, y) + f_j] - \\ & [W_{(m-1)j}(x, y) + f_{m-1}] \}^2 + \dots + \\ & \sum_{j=m+1}^n \{ [W_{j(m+1)}(x, y) + f_j] - \\ & [W_{(m+1)j}(x, y) + f_{m+1}] \}^2 + \dots + \\ & \sum_{j=n-1}^n \{ [W_{j(n-1)}(x, y) + f_j] - \\ & [W_{(n-1)j}(x, y) + f_{n-1}] \}^2 = \min, \quad (4) \end{aligned}$$

式中 $f_n = a_n x + b_n y + c_n$ 为拟合多项式(其中 $f_m = 0, m$ 为基准孔径), $\sum_{j=1}^n \{ \}^2$ 表示子孔径 $W_j (j=1, \dots, m-1, m+1, \dots, n)$ 与相邻孔径在重叠区中面形差值的平方和, \min 表示最小值。将(4)式对各个系数分别求偏导,并令偏导数为零,即可得到如下由 3 $(n-1)$ 个方程组成的方程组:

$$\left(\sum_{j=1}^n \Delta W_{ji} \right)_i = \left(\sum_{j=1}^n Q_{ji} R_{ji} \right)_i, \quad i=1, \dots, m-1, m+1, \dots, n, \quad (5)$$

$$\text{式中 } \mathbf{W}_{ji} = \begin{bmatrix} \sum_{j \cap i} [W_j(x, y) - W_i(x, y)] x \\ \sum_{j \cap i} [W_j(x, y) - W_i(x, y)] y \\ \sum_{j \cap i} [W_j(x, y) - W_i(x, y)] \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{ji} =$$

$$\begin{bmatrix} a_i - a_j \\ b_i - b_j \\ c_i - c_j \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_{ji} = \begin{bmatrix} \sum_{j \cap i} x^2 & \sum_{j \cap i} xy & \sum_{j \cap i} x \\ \sum_{j \cap i} xy & \sum_{j \cap i} y^2 & \sum_{j \cap i} y \\ \sum_{j \cap i} x & \sum_{j \cap i} y & \sum_{j \cap i} 1 \end{bmatrix}, \text{其中}$$

$a_m = b_m = c_m = 0$ 。解方程组(5)式即可得到各孔径相对于 W_m 的变换系数 (a_j, b_j, c_j) 。

3 影响因素仿真计算与分析

为了简化问题,以三个子孔径 Sub1、Sub2 和 Sub3 的拼接为例,拼接距离为 D ,子孔径 Sub1 和 Sub3 也存在一部分区域重叠,如图 2 所示。实际仿真计算中,构造 201 pixel \times 2400 pixel 的待测面形,每个子孔径大小为 201 pixel \times 1400 pixel,拼接距离 D 为 500 pixel。

一维被测面形的构造过程:构造 2400 pixel \times 2400 pixel 矩阵,并取圆形区域掩模,在圆形区域内将坐标进行归一化,根据仿真需要,构造一定的泽尼克多项式面形的组合,然后取其中间 201 pixel \times 2400 pixel 面形。图 3 为利用 Z_6 项泽尼克多项式所构造的原始面形以及相应的三个子孔径面形,其中, Z_6 项系数设置为 1(任意量纲),Sub2 和 Sub3 上叠加了平移和倾斜误差,如表 1 所示。

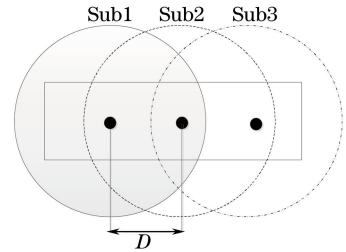


图 2 三个子孔径的拼接

Fig. 2 Stitching of three sub-apertures

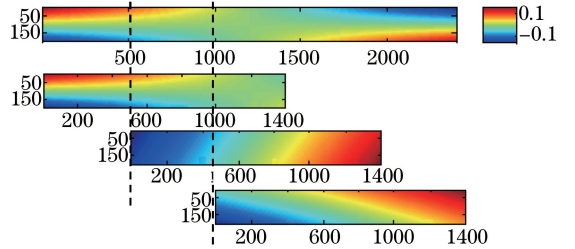


图 3 原始面形与子孔径分割面形

Fig. 3 Original surface and sub-aperture segmentation surfaces

本研究的仿真中,采用两两拼接算法进行子孔径 Sub1、Sub2、Sub3 的拼接得到拼接面形 W_1 ;采用两两拼接算法进行 Sub1、Sub3 的拼接得到拼接面形 W_2 ;采用误差均化拼接算法进行子孔径 Sub1、

Sub2、Sub3 的拼接得到拼接面形 W3,原始面形用 W0 表示。

表 1 三个子孔径的拼接系数

Table 1 Stitching coefficients of three sub-apertures

Sub-aperture	a	b	c
Sub1	0	0	0
Sub2	0.0091	0.0066	0.0096
Sub3	0.0013	-0.0057	0.0066

采用拼接后得到的全口径面形与被测元件的真实面形的差分面形作为误差面形,对差分面形进行峰谷值(PV)和均方根值(RMS)的统计计算,差分面形的 PV 和 RMS 越大,说明面形差异越大。差分

面形定义为: $W=W_s-W_0$,式中 W 为差分面形, W_s 为拼接面形, W_0 为真实参考面形。

3.1 两种算法的比较

分别用第 4~20 项单项泽尼克多项式,构造系数均为 1(任意量纲)的原始面形,再进行子孔径数据的分割与拼接计算。取 W1、W2、W3 与原始面形 W0 的差分面形,得到三组拼接计算的拼接误差,见图 4(a);取 W1、W2、W3 之间的差分面形,得到三组拼接之间的相对差异,见图 4(b)。三种拼接结果 W1、W2、W3 的拼接误差(RMS)结果如图 5 所示。可见,差分面形的差异在 10^{-5} 量级,且仅存在高频残差,可以认为三组拼接结果没有差异。

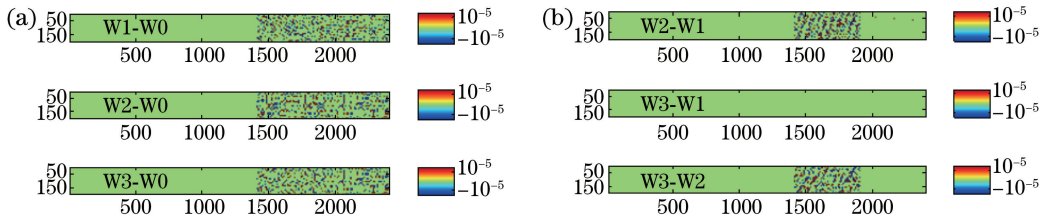


图 4 W1、W2、W3 的拼接误差分布。(a) W1、W2、W3 与 W0 的差分;(b) W1、W2、W3 两两之间的差分

Fig. 4 Stitching error distribution of W1、W2、W3. (a) Difference between W1、W2、W3 and W0;

(b) difference between W1、W2、W3 each other

仿真结果表明,对于平面拼接系统,理想拼接条件下,两两拼接算法与误差均化拼接算法具有相同的拼接效果,两两拼接算法本身不产生累积误差。但是,从算法编程和运行时间来看,误差均化拼接算法的编程效率低、内存消耗大、算法运行速度慢,表 2 是完成 W1、W2、W3 拼接计算所消耗的时间,所采用的计算机为 Windows 7、64 bit 操作系统,内存大小为 16 GB,中央处理器(CPU)主频为 3.4 GHz。

3.2 定位误差影响仿真

在子孔径拼接测量系统中,子孔径位置通过拼接位移台自身的定位精度以及采用标记等辅助手段进行定位,子孔径定位误差一般可控制在一个像素以内。

分别采用第 4~20 项单项泽尼克多项式,构造系数为 1(任意量纲)的不同面形分布的原始面形,采用表 1 的仿真条件进行子孔径的分割和拼接。在进行子孔径分割时,增加一个像素的定位误差。采用与前文相同的拼接算法计算得到拼接面形。

存在定位误差时,对拼接面形和原始面形进行差分计算,计算差分面形的 RMS 误差大小作为评价依据。图 6 为分别采用不同单项泽尼克多项式作

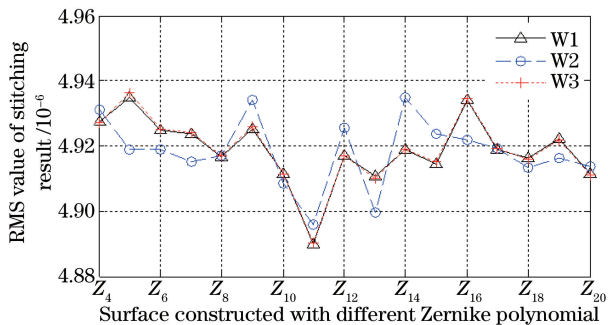


图 5 不同泽尼克多项式面形的拼接误差结果

Fig. 5 Stitching error results of surfaces constructed with different Zernike polynomials

表 2 三种拼接计算的耗费时间

Table 2 Running time of three kinds of stitching calculations

Surface	W1	W2	W3
Time / s	0.13	0.09	0.29

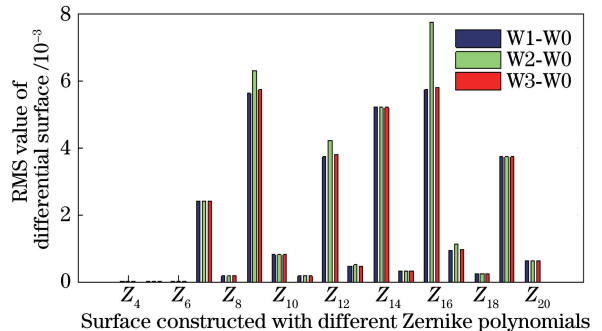


图 6 定位误差为一个像素时产生的拼接误差

Fig. 6 Stitching error while the positioning error is one pixel

为原始面形分布时,对于三个子孔径的拼接,当 Sub2 和 Sub3 分别存在一个像素的定位误差时,对应不同的泽尼克多项式面形所产生的拼接误差。从仿真结果可以看出, Z_4 、 Z_5 和 Z_6 的拼接面形基本不受定位误差的影响;对于 Z_7 及以上面形,定位误差会导致拼接面形产生拼接误差,误差大小与具体的泽尼克面形相关,其中 Z_9 、 Z_{12} 、 Z_{14} 、 Z_{16} 、 Z_{19} 泽尼克多项式面形对应的拼接误差较大。存在定位误差时 W1 与 W3 的误差基本相同,说明误差均化拼接算法并不能降低定位误差导致的拼接误差。此外,对于 Z_9 、 Z_{12} 、 Z_{16} 等面形分布,W2 的拼接误差略大,说明提高子孔径数量能够在一定程度上抑制定位误差的影响,但效果不明显。

3.3 参考面形误差

在拼接计算过程中,对应子孔径的重叠区域,参考面上不同区域的面形差异导致子孔径重叠区域测量结果会存在倾斜系数和平移系数的微小差异。Bray^[18]指出,对于二阶项误差(Z_4 、 Z_5 和 Z_6),拼接过程中会无误差地“完美”拼接,导致参考面形误差在拼接过程中不断累积放大。本课题组^[15]从对应重叠区域的参考面所产生的局部斜率差的角度,认为只要存在局部斜率差,对于两两拼接算法来说,就会在拼接过程中不断累积放大,在对 4~37 阶泽尼克像差做了详细的仿真计算与

分析的基础上,对拼接方向和非拼接方向产生斜率差、仅仅产生平移误差以及对拼接没有影响的项做了归纳汇总。提出根据局部斜率差,采用 Z_4 和 Z_6 构造“准系统误差”面形,拼接前先减去该面形,再进行拼接计算,可以有效地控制拼接误差的累积。

图 7(a)所示的为相邻子孔径 $W_j(x, y)$ 和 $W_{j+1}(x, y)$ 的重叠区域,图 7(b)为重叠区域对应的参考面形误差。其中, $w_r(x, y)$ 表示参考面形误差, $w_{rr}(x, y)$ 对应子孔径 $W_j(x, y)$ 的重叠区域, $w_{rl}(x, y)$ 对应子孔径 $W_{j+1}(x, y)$ 的重叠区域。在进行子孔径拼接时, $w_{rr}(x, y)$ 与 $w_{rl}(x, y)$ 的局部差分面形也会参与拼接计算:

$$\Delta w_r(x, y) = w_{rr}(x + \Delta x, y + \Delta y) - w_{rl}(x, y) = ax + by + c + a_2x^2 + b_2y^2 + c_2xy + \dots, \quad (6)$$

式中, Δx 、 Δy 为子孔径 $W_{j+1}(x, y)$ 相对于子孔径 $W_j(x, y)$ 位置坐标的平移量, $\Delta w_r(x, y)$ 的线性项 ax 、 by 和 c 分别对应局部差分面形所产生的 x 、 y 方向的斜率差和直流量偏差, $\Delta w_r(x, y)$ 的高阶项 a_2x^2 、 b_2y^2 、 c_2xy 等对应局部差分面形的高阶误差。前者在拼接过程中可以完美拼接,不产生拼接误差,但缺点是会在拼接过程中不断累积放大;后者在拼接过程中不能完美拼接,存在拼接误差,但优点是不会在拼接过程中累积放大。

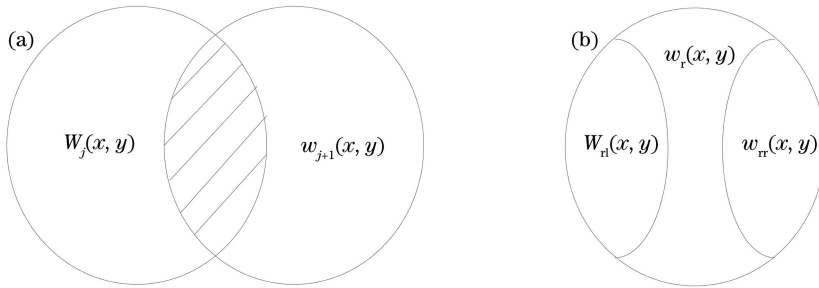


图 7 (a) 相邻子孔径的重叠区域及其对应的 (b) 参考面形误差

Fig. 7 (a) Overlap area in adjacent sub-apertures and its corresponding (b) reference surface error

假设待测面为理想平面,采用表 1 的仿真条件,分别采用系数为 1(任意量纲)的 4~20 项泽尼克多项式面形作为参考面形误差,叠加在三个子孔径

面形上。考察误差均化拼接算法和两两拼接算法的拼接面形的差异。

图 8(a)~(d)分别为 Z_4 、 Z_6 、 Z_{10} 、 Z_{16} 项泽尼克

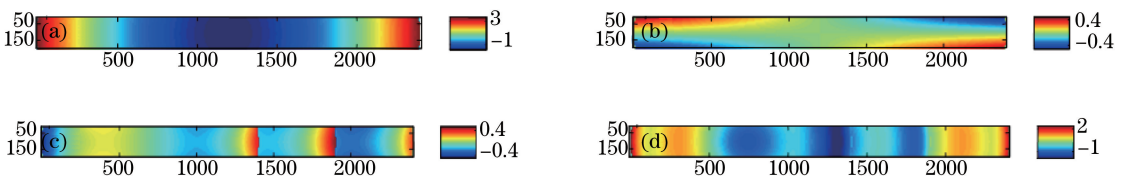


图 8 不同泽尼克像差的拼接结果。(a) Z_4 ; (b) Z_6 ; (c) Z_{10} ; (d) Z_{16}

Fig. 8 Stitching results of different Zernike aberrations. (a) Z_4 ; (b) Z_6 ; (c) Z_{10} ; (d) Z_{16}

像差采用误差均化拼接算法经过三个子孔径拼接后的拼接结果面形分布,两两拼接算法的拼接结果面形分布也基本类似。可以看出,误差均化拼接并不能消除二阶项(Z_4 、 Z_5 和 Z_6)参考面面形误差在拼接过程中的累积误差。对于高阶参考面面形误差,在两个子孔径的拼接重叠区域会存在明显的拼接误差,面形分布上可直观地看到拼接痕迹的存在。虽然可以通过图像融合技术消除由拼接误差产生的拼接痕迹,但是本质上拼接误差依然存在。该仿真验证了由(6)式所得到的结论,即 Z_4 项的差分面形只有线性项,不含高阶项,因此没有拼接痕迹,但是误差会累积放大;而 Z_{10} 项的差分面形只含有高阶项,不含线性项,因此没有累积放大,只有拼接误差; Z_{16} 项的差分面形同时含有线性项和高阶项,因此该项误差经过拼接后,既有线性项的累积误差,也有高阶项的拼接误差存在。

图9是第4~20项泽尼克多项式(系数为1,任意量纲)的参考面面形误差的拼接累积误差仿真结果。其中,对于二阶项(Z_4 、 Z_5 和 Z_6)参考面面形误差,W1、W2、W3拼接结果完全相同,说明二阶项参考面面形误差的拼接累积误差与拼接算法及子孔径分布(或拼接距离)均无关。从原理上,单纯采用拼接算法优化或拼接策略优化,不能消除二阶项面形导致的拼接累积误差。对于 Z_7 及以上的高阶面形,W1、W2、W3的误差大小不同,但数值接近且不存在普适性规律,即对高阶参考面面形误差,采用误差均化拼接算法不能抑制拼接累积误差;增加子孔径数量有可能改善拼接结果,也有可能加大拼接误差,取决于参考面的面形分布,对于大部分参考面面形像差分布情况,改变子孔径排布不会明显改变拼接误差。

3.4 测量随机误差影响仿真

干涉仪在拼接测量过程中,周围环境的温度变化、湿度变化以及气流扰动等外在因素的影响会导

致每个子孔径的测量数据中包含一定的噪声信息。将噪声分为两类考虑,一类是服从正态分布的完全随机噪声,另一类是随机高阶噪声。随机高阶噪声与随机噪声的区别在于,对应子孔径数据的拼接重叠区域,高阶噪声差分后会产生平移和倾斜误差,使子孔径拼接系数的计算产生误差,最终产生拼接误差。

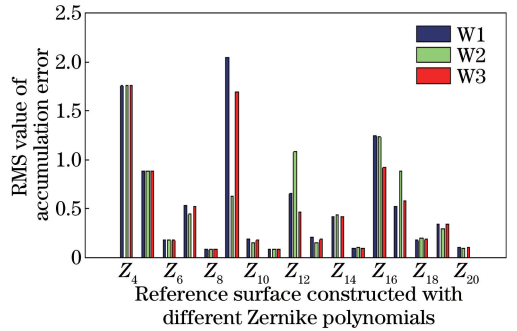


图9 $Z_4 \sim Z_{20}$ 项泽尼克像差的拼接累积误差
Fig. 9 Stitching accumulation errors of $Z_4 \sim Z_{20}$ Zernike aberrations

3.4.1 随机噪声

测量过程中的随机噪声一般遵循正态分布,随机噪声有两个主要的数字特征:反映分布中心的算术平均值和反映分散性的标准差。可以利用Matlab中randn函数产生伪随机正态分布函数作为随机噪声,叠加到子孔径数据面形上。假设噪声的平均值为零,考察不同标准偏差(0.01,0.05,0.1,0.5,1,任意量纲)对拼接面形的影响。

假设待测面为理想平面,以Sub1为基准子孔径,采用表1的仿真条件。通过叠加一系列具有不同标准偏差的随机误差,计算Sub2和Sub3的拼接系数,并与表1中原始的拼接系数进行比较,拼接系数的绝对误差如图10所示。根据仿真结果,随机误差的标准偏差越大,拼接系数误差也越大,但总体上,拼接系数的计算误差不大,且与随机噪声的标准偏差的大小不存在明显的线性关系。

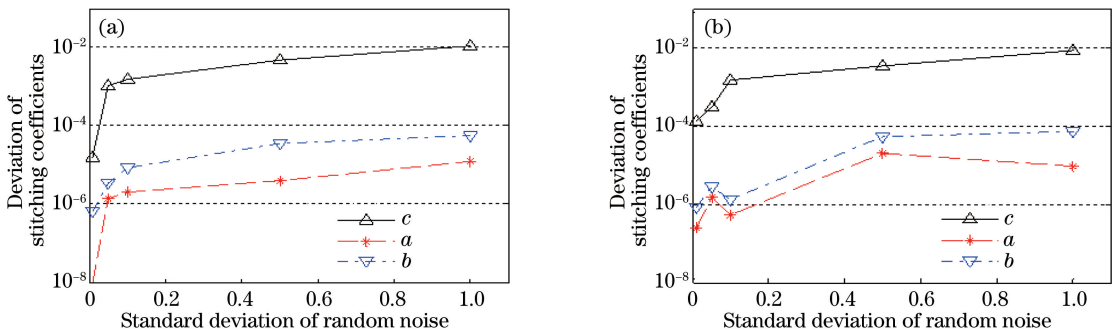
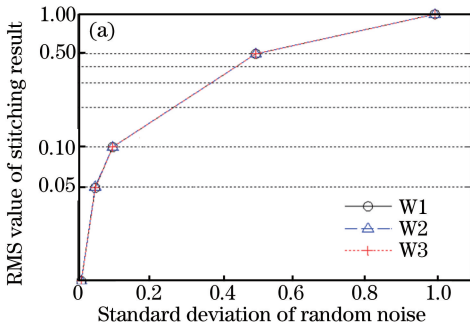


图10 不同子孔径在随机噪声下产生的拼接系数误差。(a) Sub2;(b) Sub3

Fig. 10 Stitching coefficient error of different sub-apertures under random noise. (a) Sub2; (b) Sub3

图 11 是不同标准差的随机噪声的拼接面形的 RMS 误差。可以看出, W1、W2 和 W3 拼接结果的正 RMS 误差与随机误差标准差基本在同一量级, 说



明随机误差在拼接过程中并不会累积放大, 两两拼接结果和误差均化拼接结果基本相同。

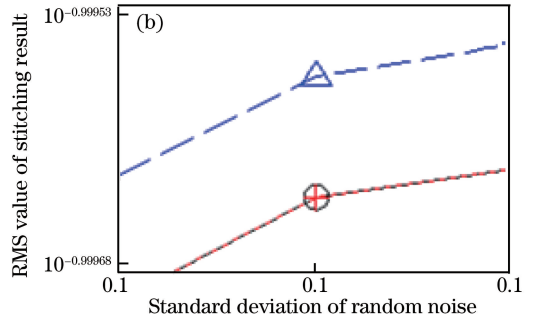


图 11 不同标准差的随机噪声的拼接误差。(a)标准差分布在 0~1 之间;(b)标准差为 0.1

Fig. 11 Stitching error of the random noise of different standard deviations.

(a) Standard deviations between 0-1; (b) standard deviation of 0.1

3.4.2 高阶随机噪声

在子孔径拼接测量过程中随机噪声不完全是服从正态分布的随机函数, 还存在一定的高阶随机噪声。对单个子孔径连续进行多次测量, 取相邻两次测量结果的差分, 得到一系列差分面形, 在这些差分

面形的分布中可以看出干涉仪测量系统中还存在高阶随机噪声误差, 图 12 为 Zygo 干涉仪测量的差分面形。对干涉仪系统进行单个子孔径的 16 次重复性测量(每次测量值为 16 个单次测量的平均值), 得到 PV 重复性为 1.74 nm, RMS 重复性为 0.31 nm。

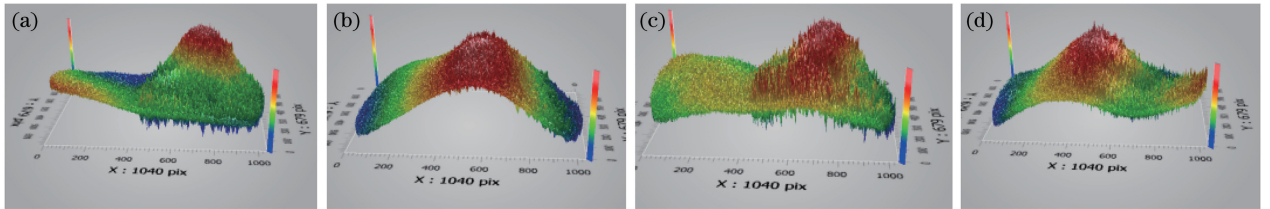


图 12 子孔径测量过程中的随机高阶噪声。(a)第二次与第一次测量结果的差分;(b)第三次与第二次测量结果的差分;
(c)第四次与第三次测量结果的差分;(d)第五次与第四次测量结果的差分

Fig. 12 High order noise during the subaperture measurements. (a) Difference between the second and the first measurements; (b) difference between the third and the second measurements; (c) difference between the fourth and the third measurements; (d) difference between the fifth and the fourth measurements

仿真中仍采用表 1 的仿真条件, 以理想平面作为待测面形, 构造 36 组高阶随机噪声, 每组包含三个高阶随机噪声, 每个高阶随机噪声误差由任意 5 项系数为 0.01(任意量纲)的 $Z_7 \sim Z_{36}$ 面形组合而成, 分别叠加在子孔径 Sub1、Sub2 和 Sub3 上, 进行 W1、W2 和 W3 的拼接计算, 最终得到 36 组 W1、W2 和 W3 的拼接结果。图 13 为 36 组拼接结果的正 RMS 误差。可以看出, 与参考面的高阶误差类似, 误差均化拼接算法并不能有效提高拼接精度。

考面面形误差的该项系数是固定的, 因此拼接次数越多, 拼接误差会累积越大; 而高阶随机噪声具有一定的随机性, 其引入的倾斜系数也是变化的, 拼接次数越多, 这些拼接误差可以达到类似“平均”的效果, 不会一直累积放大。

4 实验验证

可以采用类似参考面面形误差的分析方法, 用高阶随机误差噪声取代图 7(b)和(6)式中参考面面形误差, 对高阶随机噪声所产生的拼接误差进行分析, (6)式中线性项系数的大小直接影响最终的拼接累计误差大小。不同的是, 对于多个子孔径拼接, 参

采用 Zygo 公司 4 in(1 in=2.54 cm)DynaFiz 干涉仪组建平面子孔径拼接干涉测量系统, 对 450 mm×60 mm 平面镜面形进行子孔径拼接干涉检测, 参考面标称面形精度为 $\lambda/50$ (PV, $\lambda = 632.8$ nm)。采用 15 个子孔径进行一维拼接测量, 图 14 是拼接测量结果, 其中图 14(a)是采用两两拼接算法进行 15 个子孔径拼接的结果, 图 14(b)是采

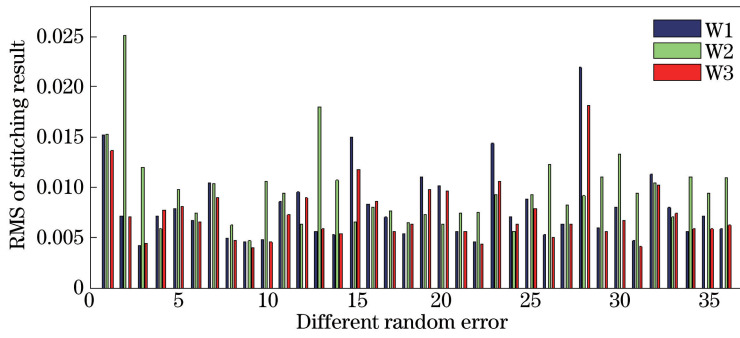


图 13 36 组高阶随机噪声的拼接累积误差

Fig. 13 Stitching accumulation errors of 36 high order random noise

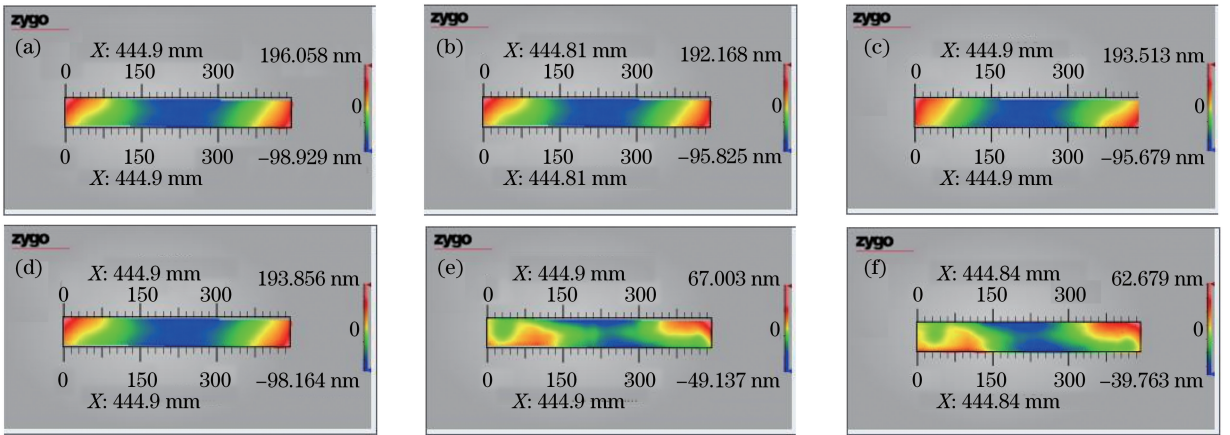


图 14 450 mm×60 mm 平面镜面形的拼接测量结果。(a) 15 个子孔径的两两拼接;(b) 8 个子孔径的两两拼接;
(c) 15 个子孔径的误差均化拼接;(d) 去除参考面高阶误差的 15 个子孔径的两两拼接;
(e) 去除参考面二阶项误差的 15 个子孔径的两两拼接;(f) 大口径干涉仪测量结果

Fig. 14 Stitching measurement results of the 450 mm×60 mm flat mirror surface. (a) 15 sub-apertures with double sub-aperture stitching algorithm; (b) 8 sub-apertures with double sub-aperture stitching algorithm;
(c) 15 sub-apertures with error averaging stitching algorithm; (d) 15 sub-apertures with double sub-aperture stitching algorithm after removing the high order errors of reference surface; (e) 15 sub-apertures with double sub-aperture stitching algorithm after removing the second order errors of reference surface;
(f) measurement result of large aperture interferometer

用两两拼接算法进行的 8 个子孔径(第 1、3、5、7、9、11、13、15 个子孔径)拼接的结果,图 14(c)是采用误差均化算法进行 15 个子孔径拼接的结果,图 14(d)是去除参考面高阶误差后采用两两拼接算法进行 15 个子孔径拼接的结果,图 14(e)是去除参考面二阶项误差后采用两两拼接算法进行 15 个子孔径拼接的结果。图 14(f)是 Zygo 公司 24 in 干涉仪测量结果,参考面标称面形精度为 $\lambda/12$ (PV),以此作为拼接测量结果的比对标准。

表 3 是上述各种拼接结果的 PV 和 RMS 误差及拼接计算所耗费的时间。误差均化拼接算法消耗的时间远远大于两两拼接算法,但是拼接效果和两两拼接算法的效果基本相同。拼接距离不同,即参与拼接计算的子孔径数量不同,对拼接计算结果基

本没有影响。通过去除参考面的二阶项误差,拼接测量结果与大口径测量结果的偏差由 $\lambda/3$ (PV)减小至 $\lambda/45$ (PV)。

结合图 14 和表 3 可以看出,参考面面形误差是影响全局拼接精度的关键因素。在参考面面形误差中,二阶项以上的高阶误差只影响单个子孔径的测量精度,也即局部精度。目前商用的参考面可以达到 $\lambda/50$ (PV),在满足局部测量精度的条件下,不需要单独对参考面面形误差进行标定。真正影响全局拼接精度的是参考面的二阶项误差,因为这部分面形误差在拼接过程中不断累积放大。本课题组^[17]已有相关工作的报道,该报道中提出的二阶项误差方法不需要对参考面面形进行绝对标定,仅通过对拼接数据的处理实现对累积误差的有效控制,提高

拼接检测精度。

表 3 450 mm×60 mm 平面镜测量结果的 PV 和 RMS 误差及测量时间

Table 3 PV and RMS error value of measurement result and measurement time of stitching calculation of the 450 mm×60 mm flat mirror

Result	PV /nm	RMS /nm	Time /s
Fig. 14(a)	294.99	62.41	7.12
Fig. 14(b)	287.99	60.75	3.23
Fig. 14(c)	289.19	61.26	40.71
Fig. 14(d)	292.02	61.03	7.19
Fig. 14(e)	116.14	14.50	7.19
Fig. 14(f)	102.44	19.79	—

5 结 论

对平面子孔径拼接干涉测量系统进行拼接精度仿真,结果表明当一维平面子孔径拼接测量系统存在位移台定位误差、参考面面形误差和随机噪声时,误差均化拼接算法并不能改善拼接精度。由于参考面面形误差在拼接过程中产生拼接累积误差,增加子孔径拼接测量次数,并不能有效提高拼接精度,只有单独标定参考面面形误差(尤其是二阶项面形)并在拼接之前加以补偿,才能有效控制拼接累积误差。对 450 mm×60 mm 平面镜面形进行 15 个子孔径的拼接干涉检测,实验结果进一步验证了参考面面形误差中二阶项误差是影响全局拼接精度的关键因素。

根据本研究的仿真与实验结果,可以得到下述平面拼接系统精度优化相关结论:1) 参考面面形误差是影响全局拼接精度的关键因素。误差均化算法与两两拼接算法均无法控制平面拼接测量中的拼接累积误差,误差均化算法与两两拼接算法具有基本相同的拼接性能,而两两拼接算法编程实现更为简单,计算效率更高。2) 拼接距离和子孔径定位误差不是影响全局拼接精度的主要因素。改变重叠区域的位置和宽度,并不改变拼接系数的计算结果和拼接面形结果,在保证一定重叠区域的条件下,可以增大拼接距离,缩短测量时间,提高拼接效率。

参 考 文 献

[1] Kin C J, Wyant J C. Subaperture test of a large flat or a fast aspheric surface[J]. Journal of the Optical Society of America, 1981, 71: 1587.
 [2] Bray M. Stitching interferometer for large optics using a standard interferometer: description of an automated system[C]. SPIE, 1997, 3047: 911-918.
 [3] Murphy P, Forbes G, Fleig J, *et al.* Stitching

interferometry: a flexible solution for surface metrology[J]. Optics and Photonics News, 2003, 14 (5): 38-43.

[4] King C W. An automated metrology workstation for the measurement of large convex surfaces [C]. Optical Fabrication and Testing, 2014: OTh3B. 2.
 [5] King C W, Bibby M. Development of a metrology workstation for full-aperture and sub-aperture stitching measurements [J]. Procedia CIRP, 2014, 13: 359-364.
 [6] Chen M, Cheng W, Wang C. Multiaperture overlapping scanning technique for large-aperture test[C]. SPIE, 1992, 1553: 626-635.
 [7] Wang Q, Chen J, Zhu R, *et al.* New technique for testing large optical flat[C]. SPIE, 1993, 2003: 389-397.
 [8] Bai J, Cheng S Y. Object function analysis for subaperture testing and connection [J]. Optical Instruments, 1997, 19(4): 36-39.
 白剑,程上彝. 子孔径检测及拼接的目标函数分析法 [J]. 光学仪器, 1997, 19(4): 36-39.
 [9] Zhang R Z, Shi Q K, Cai B W, *et al.* Study on the experiments of the stitching interferometer [J]. Optical Technique, 2004, 30(2): 173-175.
 张蓉竹,石琪凯,蔡邦维,等. 子孔径拼接干涉检测实验研究[J]. 光学技术, 2004, 30(2): 173-175.
 [10] Chen Y W, Wang F, Wang G W, *et al.* New sub-aperture stitching algorithm based on transformation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912004.
 陈一巍,王飞,王高文,等. 基于变换的子孔径拼接新算法[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912004.
 [11] Wang X K. Testing large SiC mirror by subaperture stitching interferometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 051202.
 王孝坤. 大口径碳化硅反射镜面形子孔径拼接干涉检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50 (5): 051202.
 [12] Zhang M, Gao S T, Miao E L, *et al.* Maximum likelihood estimation method to eliminate supporting error in subaperture stitching interferometry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54 (4): 041204.
 张敏,高松涛,苗二龙,等. 最大似然估计法去除子孔径拼接检测中的支撑误差[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041204.
 [13] Lu Y, Tang F, Wang X, *et al.* A high accuracy subaperture stitching system for nonflatness measurement of wafer stage mirror[C]. SPIE, 2014, 9276: 927617.
 [14] 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.
- [15] Zhu P H, Tang F, Lu Y J, *et al.* Research on high accuracy sub-aperture stitching algorithm for large 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[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1104002.
- [16] Li G P, Yu Y J, Chen M Y. Stitching technique by error averaging [J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(6): 561-564.
- 李国培, 于瀛洁, 陈明仪. 误差均化的拼接技术[J]. 光学精密工程, 2001, 9(6): 561-564.
- [17] Cheng G, Jiang S L. Large aperture optical components of stitching technique by error averaging [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(6): 118-120.
- 程刚, 蒋世磊. 大口径光学件误差均化拼接技术[J]. 光电工程, 2006, 33(6): 118-120.
- [18] Bray M. Stitching interferometry and absolute surface shape metrology: similarities [J]. SPIE, 2001, 4451: 375-383.