

# 衍射拼接主镜厚度误差分析及分辨率增强实验

李韬杰<sup>1,2,3\*\*</sup>, 汪岳峰<sup>1\*\*\*</sup>, 杨正<sup>2,3</sup>, 韩珺<sup>4</sup>, 陈建军<sup>2,3</sup>, 李晶<sup>2,3</sup>, 尹韶云<sup>2,3</sup>, 吴鹏<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>中国人民解放军陆军工程大学电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

<sup>2</sup>中国科学院重庆绿色智能技术研究院集成光电研究中心, 重庆 400714;

<sup>3</sup>跨尺度制造技术重庆市重点实验室, 重庆 400714;

<sup>4</sup>武汉锐科光纤激光技术股份有限公司, 湖北 武汉 430070

**摘要** 基于傅里叶光学的基本原理和稀疏孔径光瞳结构,建立了子镜与衍射拼接主镜厚度误差间的关系模型。在子镜无衍射结构一侧微变形情况下,给出了任意低阶面形误差引入的相位差的一般表达式。以球面变形为例,分析计算了面形误差的容许范围,并采用 ZEMAX 光线追迹法对结果进行了交叉验证。对于子镜双侧无变形的特殊情况,运用蒙特卡罗方法讨论了子镜间厚度的一致性对拼接主镜成像质量的影响,给出了正态分布条件下衍射拼接主镜相干成像时子镜厚度误差的方差与极值范围。根据理论设计结果加工了两片离轴衍射子镜,开展了双子镜拼接成像性能实验。实验结果表明,衍射拼接主镜能提高等效分辨率。

**关键词** 衍射; 拼接主镜; 厚度误差; 相干性; 分辨率

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1005001

## Thickness Error Analysis of Diffractive Segmented Primary Lens and Resolution Enhancement Experiment

Li Taojie<sup>1,2,3\*\*</sup>, Wang Yuefeng<sup>1\*\*\*</sup>, Yang Zheng<sup>2,3</sup>, Han Jun<sup>4</sup>, Chen Jianjun<sup>2,3</sup>,  
Li Jing<sup>2,3</sup>, Yin Shaoyun<sup>2,3</sup>, Wu Peng<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic and Optical Engineering, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

<sup>2</sup>System Integration Center of Optics and Electronics, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;

<sup>3</sup>Chongqing Key Laboratory of Multi-Scale Manufacturing Technology, Chongqing 400714, China;

<sup>4</sup>Wuhan Raycus Fiber Laser Technologies Co. Ltd, Wuhan, Hubei 430070, China

**Abstract** Based on the basic principle of Fourier optics and the pupil configuration of sparse aperture system, the relationship model of the thickness error between the sub-aperture and the diffractive segmented lens is established. The general expression of the phase difference induced by an arbitrary low-order surface shape error is presented under the condition of micro-deformation on one side of the sub-aperture which is without diffraction structure. Taking the spherical deformation as an example, the tolerance range of the surface shape error is discussed and calculated, and the results are verified by the ZEMAX ray tracing method. As for the special case that there is no deformation on both sides of the sub-aperture, the Monte Carlo method is used to investigate the effect of the thickness uniformity among these sub-apertures on the imaging quality of the segmented primary lens and the variance and extreme range of the sub-aperture thickness error are obtained when the coherent imaging is made by the diffractive segmented lens under a normal distribution. According to the theoretical design results, two off-axis diffractive sub-apertures are fabricated and the experiment on the segmented imaging performance of dual sub-apertures is conducted. The experimental results show that the diffractive segmented primary lens can improve the equivalent resolution.

**Key words** diffraction; segmented primary lens; thickness error; coherence; resolution

**OCIS codes** 050.1965; 050.1940; 110.1650; 260.1960

收稿日期: 2018-02-26; 修回日期: 2018-05-10; 录用日期: 2018-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(61605208,61475199)、中国科学院 GF 创新基金(CXJJ-15M061)、航天专用技术预研项目(30502010203)

\* E-mail: wupeng@cigit.ac.cn; \*\* E-mail: xrwlitaojie@163.com; \*\*\* E-mail: wyf\_gx110@sina.com

# 1 引 言

衍射拼接主镜具有重量轻、成本低、拼接公差宽松、折叠展开方便等优点,有望为地球静止轨道的对地米级观测提供一种有效的解决方案。Hyde等<sup>[1-2]</sup>提出了使用多个小口径衍射子镜拼接成大口径主镜的“极大口径衍射望远镜”概念,并从大口径制备的可行性等方面给出了理论推导和数值分析。Barton等<sup>[3]</sup>展示了大口径石英基底衍射元件的制备能力,所制备的衍射元件的透射波前误差优于 $\lambda/10$ ( $\lambda$ 为波长)。Early等<sup>[4]</sup>报道了直径达5 m的石英基底衍射拼接主镜样机,但未实现合成孔径的等效分辨率成像。Anderson等<sup>[5-7]</sup>提出了宽带大口径薄膜光子筛的概念,开发了薄膜光子筛原型成像样机,从原理上验证了薄膜衍射器件成像的可行性,并在“猎鹰7卫星”项目中从空间原子氧腐蚀的角度讨论了器件工作寿命问题。Waller等<sup>[8-10]</sup>采用高分子薄膜基底研制了可折叠的相位型衍射拼接主镜样机,并开展了成像性能测试工作。Xie等<sup>[11-12]</sup>报道了单口径光子筛在应用方面的相关进展,然而光子筛型衍射主镜的效率较低,适合于强光目标的成像应用(如太阳黑子、日珥成像),在静止轨道对地高分遥感观测的应用中,效率更高的相位型菲涅耳衍射主镜仍是首选方案。国内多家单位也对相位型菲涅耳衍射主镜开展了技术研究,主要集中在拼接误差调节<sup>[13-14]</sup>、面形误差控制<sup>[15-16]</sup>、大口径薄膜器件制备<sup>[17-18]</sup>等方面。

与反射式主镜相比,衍射元件的基底厚度误差是透射式衍射拼接主镜所独有的误差。当有衍射结构一侧的表面为理想平面且拼接误差为零时,无衍射结构一侧的面形误差和子镜间的厚度误差同样会导致各子镜在相干合成时引入相位差,造成衍射拼接主镜的像质退化。目前,关于子镜单元厚度误差对衍射拼接主镜成像质量的影响研究鲜有报道,尤其对于子镜间存在厚度误差时主镜相干合成所需的子镜厚度的一致性条件,尚无明确的研究结论。

本文主要针对分块式相位型菲涅耳衍射拼接主镜的子镜基底厚度误差展开讨论。基于稀疏孔径光瞳结构,利用Zernike多项式拟合得到了低阶面形误差的一般公式,给出了微变形情况下任意面形的相位差表达式,通过傅里叶光学原理建立了单侧任意面形误差与系统斯特列尔比(SR)的关系模型。以子镜无衍射结构一侧的表面球面变形

为例,讨论了面形误差的矢高允许范围,运用ZEMAX衍射光线追迹的方法验证了理论模型的正确性。采用蒙特卡罗分析方法,根据多组衍射拼接主镜SR的统计结果得到了子镜双侧表面无变形情况下子镜间厚度误差允许范围的概率分布方差,给出了厚度误差的极值边界,并通过两子镜的相干合成实验对理论分析结果进行了验证。该分析方法为子镜厚度误差加工公差的量化评价提供了指导依据。

## 2 基本原理

### 2.1 衍射拼接主镜模型

图1所示为衍射拼接主镜结构示意图,其中 $Oxyz$ 为坐标系,衍射拼接主镜由1~6号子镜拼接而成,绕主镜中心呈圆周对称分布,背景为衍射拼接主镜外接圆所对应的全口径二元菲涅耳环带结构的示意图。子镜直径 $d=56$  mm,子镜中心至主镜中心距离 $L_q=120$  mm,主镜外接圆直径 $D=296$  mm,焦距 $f=2400$  mm,主镜基底材料的折射率 $n=1.458$ 。

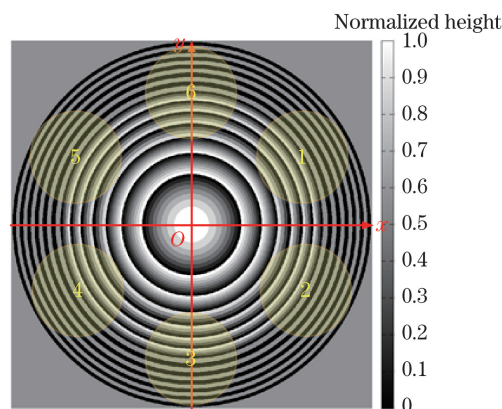


图1 衍射拼接主镜结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of segmented diffractive primary lens

### 2.2 单侧面形误差的相位差近似表述

在面形变形量非常微小(面形峰谷值为数十纳米)的情况下,表面局部倾斜度很小(近似为零),可将光线看作近似正入射镜子表面,相位差主要是由子镜基底的厚度差异导致的。此时面形误差造成的相位差可表示为

$$\Delta\varphi = k \Delta L(x, y)(n' - 1), \quad (1)$$

式中 $\Delta L(x, y)$ 为关于坐标 $(x, y)$ 的面形误差函数, $n'$ 为子镜折射率, $k$ 为波数。利用Zernike多项式拟合出面形低阶起伏变化时 $\Delta L(x, y)$ 的一般表达式为

$$\begin{bmatrix} Z_0^0(x_1, y_1) & Z_1^{-1}(x_1, y_1) & \cdots & Z_n^m(x_1, y_1) \\ Z_0^0(x_2, y_2) & Z_1^{-1}(x_2, y_2) & \cdots & Z_n^m(x_2, y_2) \\ Z_0^0(x_3, y_3) & Z_1^{-1}(x_3, y_3) & \cdots & Z_n^m(x_3, y_3) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_0^0(x_N, y_N) & Z_1^{-1}(x_N, y_N) & \cdots & Z_n^m(x_N, y_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{j(00)} \\ C_{j(1-1)} \\ C_{j(11)} \\ \vdots \\ C_{j(nm)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta L_j(x_1, y_1) \\ \Delta L_j(x_2, y_2) \\ \Delta L_j(x_3, y_3) \\ \vdots \\ \Delta L_j(x_N, y_N) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $Z_n^m(x_N, y_N)$  为标准 Zernike 多项式,  $x_N$  和  $y_N$  为任意子孔径内的第  $N$  个点的坐标,  $m$  和  $n$  分别为标准 Zernike 多项式的角向频率和径向秩序,  $N$  取正整数,  $C_{j(nm)}$  为第  $j$  个子镜对应项的系数,  $\Delta L_j(x_N, y_N)$  为第  $j$  个子镜面上任意一点相对于参考面沿矢高方向的偏差量。根据面形偏差量, 利用最小二乘法求得  $C_{j(nm)}$ , 得到具体的面形公式为

$$\Omega(x, y) = \sum C_{1(nm)} Z_n^m(x_N, y_N)_1 + \sum C_{2(nm)} Z_n^m(x_N, y_N)_2 + \cdots + \sum C_{j(nm)} Z_n^m(x_N, y_N)_j, \quad (3)$$

式中  $Z_n^m(x_N, y_N)_j$  为第  $j$  个子孔径坐标对应的多项式。

对于某一个具体的面形误差, 将(3)式代入(1)式即可得到对应的相位差表达式。通过计算含有相位差的衍射拼接主镜的点扩散函数(PSF), 可利用

SR 值( $f_{SR}$ )来量化评价面形误差对成像质量的影响。

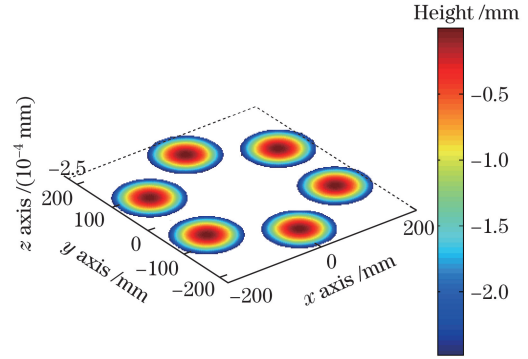


图 2 子镜球面变形示意图

Fig. 2 Schematic of spherical deformation of sub-aperture

### 2.3 衍射拼接主镜面形误差的傅里叶光学表述

对于单口径衍射子镜, 衍射面处于理想位置, 无衍射结构一侧含有面形误差时, 像面复振幅的表达式为

$$U_{\text{sub}} = \frac{1}{i\lambda z} \exp(ikz) \iint P(x, y) T(r) \exp(-i\Delta\varphi) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z} [(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2]\right\} dx dy, \quad (4)$$

式中  $P(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{outside of aperture} \\ 1, & \text{inside of aperture} \end{cases}$  为孔径函数, 此处为圆形孔径;  $\Delta\varphi$  为面形误差所对应的相位差;

$(x, y)$  为光瞳面坐标,  $(x_1, y_1)$  为像面坐标;  $T(r) = A'_{m'} \exp\left[\frac{-i\pi(x^2+y^2)}{\lambda f}\right]$  为二元菲涅耳透镜的透过率函数, 其中

$$A'_{m'} = \frac{1}{L} \text{sinc}\left(\frac{m'}{L}\right) \exp\left(i\frac{\pi m'}{L}\right) \exp\left[-i\frac{\pi(L+1)(\alpha+m')}{L}\right] \frac{\sin\left[\frac{\pi(\alpha+m')}{L}\right]}{\sin\left[\frac{\pi(\alpha+m')}{L}\right]}, \quad (5)$$

式中  $\alpha = \frac{\lambda_0 [n(\lambda) - 1]}{\lambda [n(\lambda_0) - 1]}$  为波长匹配系数( $\lambda_0$  为中心波长, 当波长无偏差时, 波长匹配系数为 1),  $L$  为台阶数,  $m'$  为衍射级次。由(4)式展开得

$$U_{\text{sub}} = \frac{1}{i\lambda z} \exp(ikz) \iint P(x, y) \exp(-i\Delta\varphi) \times \exp\left[\frac{-i\pi(x^2+y^2)}{\lambda f} + \frac{i\pi(x^2+y^2)}{\lambda z} + \frac{i\pi(x_1^2+y_1^2)}{\lambda z} - \frac{i2\pi(xx_1+yy_1)}{\lambda z}\right] dx dy. \quad (6)$$

当各个子镜都处于理想空间位置即二元衍射面的焦距与传播距离一致时,  $f=z$ , (6)式化简为

$$U_{\text{sub}} = \frac{A'_{m'}}{i\lambda z} \exp(ikz) \exp\left[\frac{i\pi(x_1^2+y_1^2)}{\lambda z}\right] \iint \exp(-i\Delta\varphi) P(x, y) \exp\left[\frac{-i2\pi(xx_1+yy_1)}{\lambda z}\right] dx dy. \quad (7)$$

衍射拼接主镜的 PSF 为

$$f_{\text{PSF}} = \left| \sum_{j=1}^M U_{\text{subj}}(x - X_j, y - Y_j) \right|^2, \quad (8)$$

式中  $U_{\text{subj}}$  为第  $j$  个子镜的复振幅,  $(X_j, Y_j)$  为第  $j$  个子镜的中心坐标,  $M$  为构成拼接主镜的全部子镜数量。

### 3 面形误差分析

#### 3.1 单侧面形误差对主镜成像质量的影响分析

如图 3 所示, 当衍射面处于理想位置, 无衍射结构表面存在形变时, 透射光线之间会产生相位差。

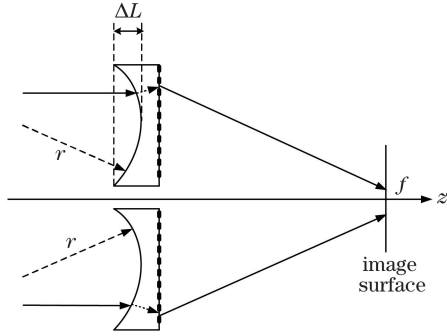


图 3 无衍射结构的表面变形误差示意图

Fig. 3 Schematic of deformation error of surface without diffraction structure

根据卷积定理, (7)式化简得

$$U_{\text{subj}} = \frac{A'_m}{i\lambda z} \exp(ikz) \exp\left[\frac{i\pi(x_1^2 + y_1^2)}{\lambda f}\right] \times \mathfrak{F}[\exp(-i\Delta\varphi_j)] * \mathfrak{F}[P(x - X_j, y - Y_j)], \quad (9)$$

式中  $\mathfrak{F}[\cdot]$  表示傅里叶变换,  $*$  表示卷积,  $\Delta\varphi_j$  为第  $j$  个子镜的相位差。

在制备过程中, 大口径的单元薄膜衍射子镜容易出现中间薄边缘厚的情况, 特别是无衍射结构的光滑面容易产生凹陷的面形误差。以球面变形为例, 以主镜  $f_{\text{SR}} > 0.9$  作为约束边界展开分析, 将计算结果与 ZEMAX 软件的仿真结果进行对比。球面变形的曲率半径为 1550000 mm, ZEMAX 软件计算得到  $f_{\text{SR}} = 0.9056$ , MATLAB 软件计算得到  $f_{\text{SR}} = 0.8996$ , 仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可知, PSF 的分布规律和峰值强度基本一致, 两者  $f_{\text{SR}}$  相差 0.6%, 吻合较好, 说明衍射拼接主镜单侧微变形情况下相位差的近似表达方法准确可靠。若要保持系统  $f_{\text{SR}} > 0.9$ , 各子镜无衍射结构一侧的表面球面变形的最大矢高需要控制在 248.4 nm 以内。

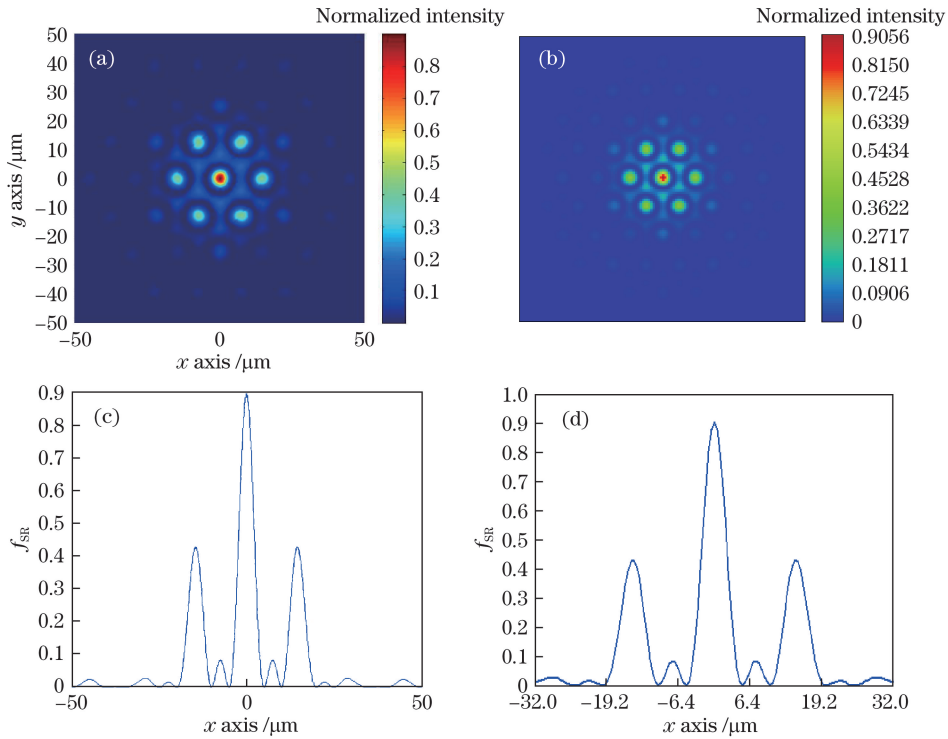


图 4 PSF 和对应的 ZEMAX 结果。(a) 球面变形 PSF 及 (b) 对应的 ZEMAX 结果;

(c) PSF 横截面图及 (d) 对应的 ZEMAX 结果

Fig. 4 PSF and corresponding ZEMAX results. (a) PSF of spherical surface and (b) its corresponding ZEMAX result;

(c) cross section of PSF and (d) its corresponding ZEMAX result

### 3.2 厚度误差对主镜成像质量的影响分析

如图 5 所示,当衍射面处于理想位置而子镜间存在厚度一致性误差时,若光线正入射于子镜表面,每个子镜的透射波前将是完善球面波的一部分。此时,单纯通过波前数据无法甄别出子镜间是否存在厚度差异,ZEMAX 光线追迹和波前像差检测等误差分析方法不再适用,需利用相干合成孔径的相位差计算得到各子镜间存在厚度误差时衍射拼接主镜 PSF 的空间分布情况,进而给出各子镜基底厚度一致性的公差要求。

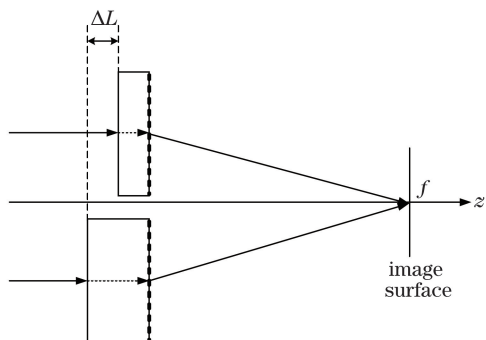


图 5 厚度误差示意图

Fig. 5 Schematic of thickness errors

当两个子镜基底存在厚度差  $\Delta L$ ,由(1)式可得到相位差为  $\Delta\varphi = k\Delta L(n' - 1)$ ,此时  $\Delta L$  对于孔径内任意  $(x, y)$  为恒定值,代入(7)式化简得

$$U_{\text{subj}} = \frac{A'_m}{i\lambda z} \exp(ikz) \exp(-i\Delta\varphi_j) \times \exp\left[\frac{i\pi(x_1^2 + y_1^2)}{\lambda f}\right] \times \mathfrak{F}[P(x - X_j, y - Y_j)]. \quad (10)$$

将(10)式代入(8)式,可得含有厚度一致性误差的衍射拼接主镜的 PSF。主镜实现等效分辨率增强的过程属于相干合成,当存在多个子镜时,不同子镜的厚度一致性误差的公差难以准确赋值,因此采用概率统计学的方法来给出厚度一致性误差的分布情况。运用蒙特卡罗方法,以  $f_{\text{SR}} > 0.9$  作为边界条件,通过给定不同方差  $\sigma$  展开测试,对每个  $\sigma$  构建 1000 组厚度一致性误差的随机正态分布方案,然后对每个方差获得的  $f_{\text{SR}}$  进行统计,结果见表 1。

表 1 方差随机正态分布的统计结果

Table 1 Statistical results of random normal distribution of variance

Variance /nm	39	40	45	50
Probability /%	99.99	99.89	99.22	97.67

正态分布条件下,当置信系数取 3 时,在置信区

间  $|\Delta L| \leq 3\sigma$  内,厚度误差有 99.73% 的概率满足  $f_{\text{SR}} > 0.9$ 。由表 1 可知, $\sigma = 40$  nm 时满足置信系数取 3 的条件,此时置信区间范围为  $-120 \sim 120$  nm,即要想实现主镜  $f_{\text{SR}} > 0.9$ ,子镜间厚度误差的极限值需满足  $|\Delta L_{\text{lim}}| \leq 120$  nm。

## 4 等效分辨率增强实验

### 4.1 实验系统描述

按照第 3 节给出的厚度误差的公差,采用石英基底设计加工了两片通光口径为 56 mm 的离轴菲涅耳透镜,厚度为 3 mm。使用美国 ZYGO 公司生产的型号为 New View 7100 的白光干涉仪检测离轴菲涅耳透镜的微结构精度;子镜中心的坐标位置相对主镜中心分别为  $60^\circ, 120^\circ$ ,距主镜中心距离为 120 mm,搭建 6 维支撑调整机构,光路如图 6 所示,实物图如图 7 所示。反射镜口径为 280 mm,面形精度为  $\lambda/40$ ;显微物镜为北京大恒光电技术公司生产,型号为 GCO-2105,放大倍率为 40 倍;利用美国 Coherent 公司的 BeamView-USB 探测器对接收的光斑进行数据分析,探测器的靶面尺寸为  $2/3$  inch(1 inch = 2.54 cm),像素数为  $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ ;利用美国 Zygo 公司的 Verifire HD 型号干涉仪实时监控波前。

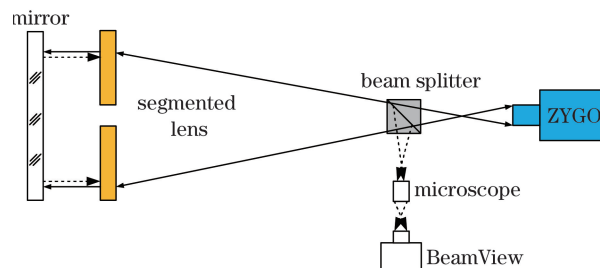


图 6 光路

Fig. 6 Optical path

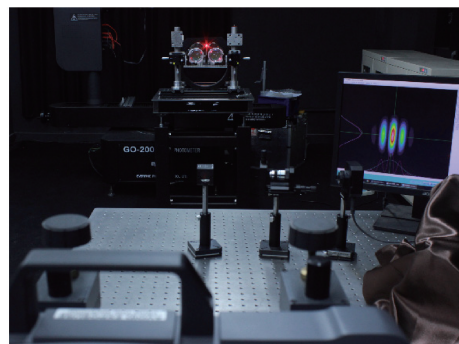


图 7 实验装置图

Fig. 7 Experimental setup

### 4.2 测量结果及讨论

图 8(a)所示为白光干涉仪测量得到的子镜台

阶微结构图片,图 8(b)所示为对应的 ZYGO 干涉仪波前图。可以看出,子镜单元的台阶结构制作精度较好,波前均方根(RMS)值达到  $0.012\lambda$ ,各项加工精度满足设计要求。

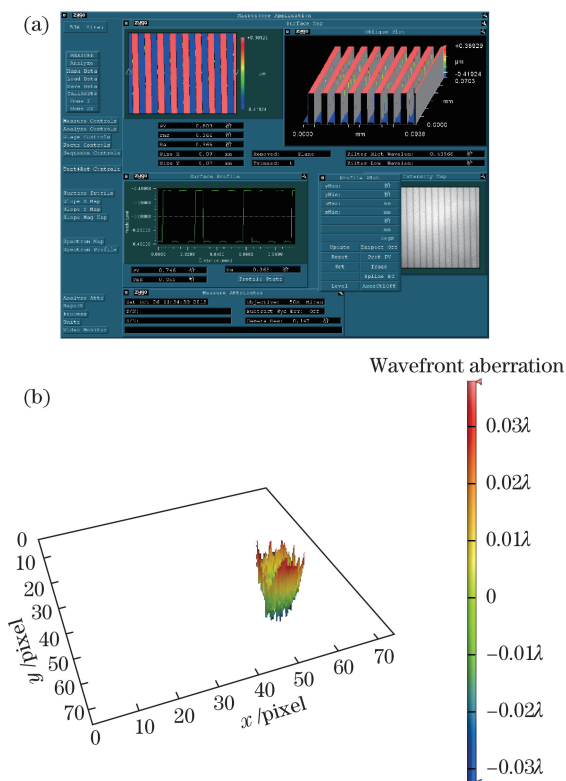


图 8 二元微结构及对应的波前。(a)微结构;(b)波前  
Fig. 8 Binary microstructure and its corresponding wavefront.  
(a) Microstructure; (b) wavefront

手动调整支撑机构,将两子镜波前像差的 RMS 值调整至  $0.027\lambda$ ,如图 9 所示,此时拼接误差可认为已调整到理想位置。

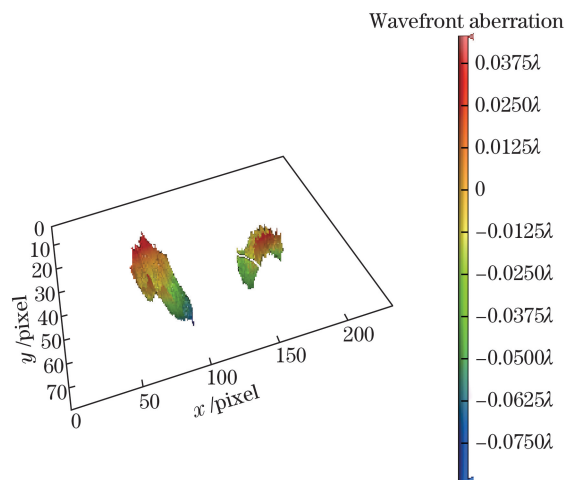


图 9 拼接主镜的波前像差  
Fig. 9 Wavefront aberration of segmented primary lens

拼接主镜调整到位后加入分光棱镜,利用干涉仪作为光源,将光路转折至显微物镜放大后用 BeamView-USB 探测器接收。单独测量每个子镜的光斑,如图 10(a)、(b)所示,实测光斑的半峰全宽(FWHM)约为  $1484\ \mu\text{m}$ ,两子镜相干合成后光斑如图 10(c)所示,实测主峰的 FWHM 约为  $246\ \mu\text{m}$ 。图 11(a)、(b)所示为理论计算值,单个子镜光斑的 FWHM 约为  $29\ \mu\text{m}$ ,相干合成后主峰的 FWHM 约为  $5\ \mu\text{m}$ 。

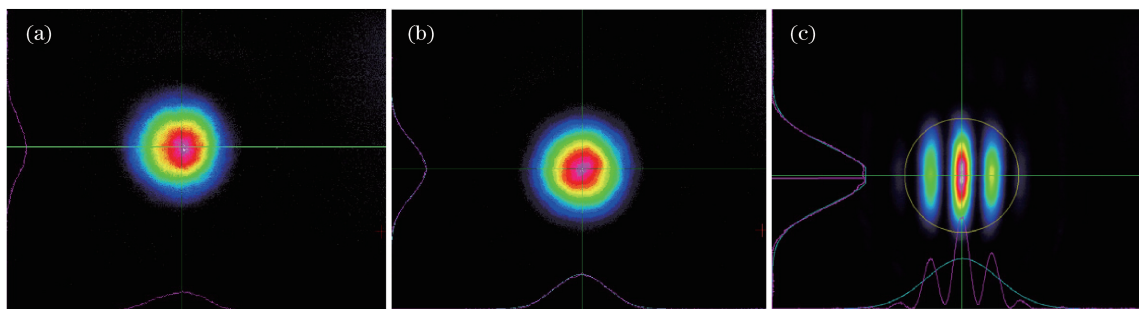


图 10 光斑。(a)(b)子镜单独测量的光斑;(c)两个子镜相干合成的光斑  
Fig. 10 Spots. (a)(b) Spot obtained by measurement of single sub-aperture;  
(c) spot obtained by coherent synthesis of two sub-apertures

如图 8 所示,已排除了子镜单元加工误差的影响,单个子镜的实际成像 PSF 接近理想艾里斑形状,根据前文实测结果和理论计算的单个子镜光斑的 FWHM,可知实际显微物镜的转像放大倍率约为 51,这主要是由于实验时器件摆放不够精确,即显微物镜的摆放没有严格使衍射拼接主镜的焦点与探测器处于理想的物像共轭位置,实验结果与理论

放大倍率(40 倍)存在偏差。实测时单个子镜光斑的 FWHM 约为相干合成后主峰的 6 倍,理论计算时单个子镜光斑的 FWHM 约为相干合成后主峰的 5.8 倍,从侧面证明了主要误差来自于显微物镜转像放大倍率的误差。此外,探测器摆放时可能产生的离焦也会导致读取 FWHM 数据时存在偏差。

实测的相干合成后主峰 FWHM 除以 51 后得

到  $4.82 \mu\text{m}$ , 与相干合成后主峰 FWHM 的理论值  $5 \mu\text{m}$  相差  $0.18 \mu\text{m}$ , 实际测量数据与理论值能较好吻合, 说明两子镜拼接后实现了子镜中心基线方向上的等效分辨率增强。

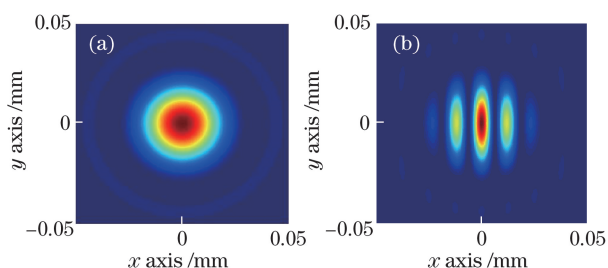


图 11 仿真。(a) 单个子镜的仿真;  
(b) 两子镜相干合成的仿真

Fig. 11 Simulation. (a) Simulation of single sub-aperture;  
(b) simulation of coherent synthesis of two sub-apertures

通过测量透射式衍射拼接主镜的两个子镜相干合成的光学 PSF, 从实验上检验了衍射拼接主镜各子镜基底厚度误差分析理论的正确性, 并从实验上验证了菲涅耳衍射拼接主镜实现等效分辨率增强的效果。

## 5 结 论

针对透射式衍射拼接主镜相干合成孔径的成像要求, 建立了含有厚度误差的衍射拼接主镜理论分析模型, 给出了一种评估子镜厚度误差一致性要求的分析方法。在衍射拼接主镜模型中, 若子镜基底无衍射结构且表面单侧存在球面变形时, 变形矢高需控制在  $248.4 \text{ nm}$  以内; 若子镜基底双侧无变形, 各子镜单元的厚度一致性服从正态分布, 则满足系统  $f_{\text{SR}} > 0.9$  的厚度统计方差为  $40 \text{ nm}$ , 最大厚度误差需满足  $|\Delta L_{\text{lim}}| \leq 120 \text{ nm}$ 。完成了两子镜单元的相干合成成像实验, 实验验证了衍射拼接主镜相干合成能实现等效分辨率增强的效果。研究结论可为更大口径的衍射拼接主镜研制提供指导。

## 参 考 文 献

- [1] Hyde R A. Eyeglass. 1. Very large aperture diffractive telescopes[J]. Applied Optics, 1999, 38(19): 4198-4212.
- [2] Hyde R A, Dixit S N, Weisberg A H, et al. Eyeglass: A very large aperture diffractive space telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4849: 28-39.
- [3] Barton I M, Britten J A, Dixit S N, et al. Fabrication of large-aperture lightweight diffractive lenses for use in space[J]. Applied Optics, 2001,

40(4): 447-451.

- [4] Early J, Hyde R, Baron R. Twenty-meter space telescope based on diffractive Fresnel lens[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5166: 148-156.
- [5] Andersen G. Large optical photon sieve[J]. Optics Letters, 2005, 30(22): 2976-2978.
- [6] Andersen G. Membrane photon sieve telescopes[J]. Applied Optics, 2010, 49(33): 6391-6394.
- [7] Andersen G, Asmolova O, Mcharg M G, et al. FalconSAT-7: A membrane space solar telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9904: 99041P.
- [8] Waller D, Campbell L, Domber J L, et al. MOIRE primary diffractive optical element structure deployment testing[C]. 2<sup>nd</sup> AIAA Spacecraft Structures Conference, 2015: 1836.
- [9] Waller D, Domber J L, Belnap B, et al. MOIRE strongback thermal stability analysis and test results[C]. 56<sup>th</sup> AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2015: 0205.
- [10] Waller D, Domber J, Price C, et al. MOIRE thermal vacuum structural stability testing[C]. 53<sup>rd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2015: 2019.
- [11] Xie C Q, Zhu X L, Li H L, et al. Toward two-dimensional nanometer resolution hard X-ray differential-interference-contrast imaging using modified photon sieves[J]. Optics Letters, 2012, 37(4): 749-751.
- [12] Xie C Q, Zhu X L, Shi L N, et al. Spiral photon sieves apodized by digital prolate spheroidal window for the generation of hard-X-ray vortex[J]. Optics Letters, 2010, 35(11): 1765-1767.
- [13] Jin G, Yan J L, Liu H, et al. Flat-stitching error analysis of large-aperture photon sieves[J]. Applied Optics, 2014, 53(1): 90-95.
- [14] Li T J, Wu P, Yin S Y, et al. Piston and tip-tilt error analysis of segmented diffractive lens[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0211002.  
李韬杰, 吴鹏, 尹韶云, 等. 衍射主镜面外拼接误差分析[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0211002.
- [15] Li T J, Wu P, Yang Z, et al. Aberration analysis of membrane diffractive lens with substrate deformation error[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1011003.  
李韬杰, 吴鹏, 杨正, 等. 薄膜衍射主镜基底面形误差的像差特性分析[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1011003.
- [16] Li T J, Wu P, Yang Z, et al. Large aperture membrane diffractive lens deformation error analysis[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(2): 0205002.  
李韬杰, 吴鹏, 杨正, 等. 大口径薄膜衍射主镜面形误

- 差仿真分析[J]. 光子学报, 2018, 47(2): 0205002.
- [17] Wang R Q, Zhang Z Y, Guo C L, *et al.* Effects of fabrication errors on diffraction efficiency for a diffractive membrane[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(12): 120501.
- [18] Zhang J, Li M J, Yin G H, *et al.* Low-cost method of fabricating large-aperture, high efficiency, Fresnel diffractive membrane optic using a modified Moiré technique[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(10): 100501.