

# 合成口径子镜测试拼接技术

曹睿<sup>1,4</sup> 赵智亮<sup>2,4</sup> 郑列华<sup>3</sup> 张志华<sup>4</sup> 淳于永昕<sup>4</sup> 郑万国<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院应用技术研究发展中心, 四川 成都 610003

<sup>2</sup>成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041

<sup>3</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

<sup>4</sup>成都太科光电技术有限责任公司, 四川 成都 610041

**摘要** 为了实现合成口径非球面系统共相位, 提出一套测试拼接方法。对抛物面系统面形进行曲面拟合, 建立面形坐标矩阵, 根据三维坐标变换矩阵直接计算出子镜平移偏摆调整量达到合成口径共相位, 计算机上模拟调整得到拼接系统精度与设定精度相当。搭建了一套测试拼接系统, 使用红外双波长相移干涉仪检测  $\Phi 600$  mm 抛物面子镜系统面形, 根据拟合面形数据得到子镜调整量校正子镜。实验得到合成口径系统子镜失调误差与单一口径面形加工精度  $\lambda/15$  相当。

**关键词** 测量; 合成口径; 共相位; 抛物面; 曲面拟合

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.051201

## Subaperture Cophasing Technique of Segmented Mirror

Cao Rui<sup>1,4</sup> Zhao Zhiliang<sup>2,4</sup> Zheng Liehua<sup>3</sup> Zhang Zhihua<sup>4</sup> Chunyu Yongxi<sup>4</sup>  
Zheng Wanguo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research and Development Center of Applied Technology, China Academy of Engineering Physics, Chengdu, Sichuan 610003, China

<sup>2</sup>Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China

<sup>3</sup>Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

<sup>4</sup>Chengdu Techo Photoelectricity Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610041, China

**Abstract** To realize co-phase of segmented asphere aperture, a calculation system is build up for testing and alignment segmented mirrors. Curve fitting the surface data of the paraboloid mirror is made to establish coordinate matrix. The position deviation of sub-apertures is calculated by using transformation matrix. The simulation result shows that the segmented aperture achieves the initial accuracy. A two wave-length interferometer is used to detect the 600 mm paraboloid segmented aperture. Depends on the tilt error calculated form the surface data, the segmented aperture position deviation can be limited in the accuracy of a single aperture  $\lambda/15$ .

**Key words** measurement; segmented aperture; co-phase; paraboloid; curve fitting

**OCIS codes** 120.5050; 350.1260; 350.6090

## 1 引言

根据光学波动理论, 当波长一定时, 光学成像系统的分辨率与系统口径正相关, 因此只能增大光学系统口径来提高系统分辨率。但以现有技术水平, 加工建造 10 m 甚至以上单一口径光学系统在毛坯加工、抛光、面形检测方面都会面临一系列复杂的问题。“拼接主镜”的构想为建造超大口径光学成像系统开辟了一条新的途径。1991 年建成的 KECK I 望远镜口径接近 10 m, 在红外波段达到了衍射分辨率极限, 成功验证了“拼接主镜”的构想。后续建造的 KECK II 望远镜、欧洲南方天文台的 39.3 m 口径的欧洲极大望远镜(E-ELT)、中

收稿日期: 2014-11-24; 收到修改稿日期: 2014-12-26; 网络出版日期: 2015-03-26

基金项目: 国家 973 计划(2011CB013206)

作者简介: 曹睿(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事精密光学检测方面的研究。E-mail: tomm40615092@gmail.com

导师简介: 赵智亮(1974—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事精密光学检测方面的研究。E-mail: zzl\_caep@163.com

国 4 m 口径的大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)以及美国拟在太空中取代哈勃望远镜的下一代空间望远镜詹姆斯·韦伯空间望远镜(JWST)都采用了拼接主镜的结构<sup>[1]</sup>。

合成口径系统要达到可与单一口径系统相比拟的高分辨率成像效果必须满足各子口径之间共相位要求,否则只能起到提高光能接收率的作用。常用的合成口径共相位误差检测方法主要分为电学和光学检测两种。电学检测方法有电容式、电感式和光纤式位移传感器三种,测量范围可达 10~100  $\mu\text{m}$  以上,精度 1~20 nm 不等。但是由于电学传感器只能检测相邻子口径之间的相对位移,因此主要用于子口径光学共相位之后的闭环控制。电学边缘传感器已经在 KECK 等大型天文望远镜上成功应用。1998 年, Su 等<sup>[2]</sup>在室内使用电容传感器实现子镜共相位后的闭环控制。泰曼格林干涉仪和菲索干涉仪等常用光学面形检测干涉仪都可以对合成口径主镜面形进行共相位误差检测。但是由于各子镜之间边缘台阶高度往往大于普通激光干涉仪光源波长,会在检测过程中带来  $2\pi$  相位模糊问题,可以采用长波长的红外光源,或者使用双波长相移干涉技术,利用合成波长技术检测大误差台阶高度,从而对整个合成口径进行共相位误差检测。中国科学院成都光电研究所的 Song 等<sup>[3]</sup>利用白光和单色光源切换的泰曼格林干涉仪对拼接子镜边缘台阶高度进行检测,测量范围达到了 50  $\mu\text{m}$ ,不确定度为 6 nm。本文在双波长干涉仪检测的基础上,提出一种使用曲面拟合子口径位置矩阵,精确计算出各子镜偏摆和平移误差的算法,实验得到合成口径子镜台阶误差与单一口径面形加工精度  $\lambda/15$  相当。

## 2 合成口径面形共相位误差计算理论

合成口径子镜可以看作刚体,每个子镜有六个自由度:沿子镜法线运动(piston),绕  $y$  轴旋转(tip),绕  $x$  轴旋转(tilt),沿子镜法线的旋转,沿垂直于法线的  $x$  轴和  $y$  轴的平移。由于合成口径系统通常是中心轴对称系统,所以仅对拼接子镜作三维平移加上二维偏摆调整,不对沿子镜法线的旋转做调整就能达到合成口径精确共相位。

基于干涉仪检测所得合成口径系统面形数据,以中心子镜与光轴的交点为原点,光轴方向为  $z$  轴建立坐标系,采用曲面拟合的方法对拼接子镜焦点与准面进行坐标定位,对于一般反射式抛物面子镜,第  $k$  块拼接子镜的拟合方程为

$$(x - o_{kx})^2 + (y - o_{ky})^2 + (z - o_{kz})^2 = \frac{(a_k x + b_k y + c_k z + d_k)^2}{a_k^2 + b_k^2 + c_k^2}, \quad (1)$$

式中  $o_k(o_{kx}, o_{ky}, o_{kz})$  点为第  $k$  块子镜拟合焦点坐标,  $a_k x + b_k y + c_k z + d_k = 0$  为抛物面准面方程,由此可得抛物面子镜光轴方向向量  $s_k = (a_k, b_k, c_k)$ , 据此建立面形坐标矩阵

$$A_k = \begin{bmatrix} o_k(x) & o_k(x) - f \cdot s_k(1) & o_k(x) + p_k(1) & o_k(x) + t_k(1) \\ o_k(y) & o_k(y) - f \cdot s_k(2) & o_k(y) + p_k(2) & o_k(y) + t_k(2) \\ o_k(z) & o_k(z) - f \cdot s_k(3) & o_k(z) + p_k(3) & o_k(z) + t_k(3) \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $p_k = (c_k, 0, -a_k)$  为垂直于光轴  $s_k$ 、在  $xoz$  平面内的方向向量,  $t_k = (-a_k b_k, a_k^2 + c_k^2, -b_k c_k)$  满足  $s_i \times p_i = t_i$ ,  $p_i \times t_i = s_i$ ,  $t_i \times s_i = p_i$  两两垂直,  $s_i$ 、 $p_i$ 、 $t_i$  均单位化,  $f$  为抛物面焦距。以中心子镜面形坐标矩阵  $A_0$  为参考,通过矩阵运算计算拼接子镜的共相位变换矩阵

$$M_k = A_0 \times A_k^{-1}. \quad (3)$$

由于不对抛物面法线方向的旋转作调整,  $M_k$  可由  $R_x$  (绕  $x$  轴旋转),  $R_y$  (绕  $y$  轴旋转),  $T_z$  ( $x, y, z$  平移) 三个独立的变换矩阵(左乘)组合得到。其中

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$T_i(x, y, z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

在调整过程中,先将拼接子镜与参考子镜光轴校正到平行位置,再将其平移到重合位置,所以变换矩阵按照先偏摆后平移的顺序进行组合,得到

$$M'_k = T_i(x, y, z) \times R_y(\varphi) \times R_x(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & x \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & y \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \sin \theta & \cos \varphi \cos \theta & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对于第  $k$  块子镜,通过

$$f(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (M_{ij} - M'_{ij})^2, \quad (8)$$

函数极小值来计算以坐标原点为固定点,绕  $x$  轴和  $y$  轴的两个偏摆角度  $\theta$  和  $\varphi$ ,通过  $M$  与  $M'$  对比可以直接得到固定点平移量

$$x = M_{14}, y = M_{24}, z = M_{34}, \quad (9)$$

通常,拼接子镜的固定点和偏摆轴都与原点及坐标轴  $x$  轴和  $y$  轴不重合,在计算过程中需先将坐标平移到固定点,然后绕光轴旋转到坐标轴与偏摆轴相重合,才能应用以上计算。

### 3 计算机模拟

在计算机上使用 Matlab 软件对曲面拟合拼接算法进行模拟。为了和实际实验相对应,模拟一块  $\Phi 614$  mm 口径,焦距距 1975 mm 的抛物面,设定面形精度优于  $\lambda/100$ ,中心  $\Phi 352$  mm 的圆形子镜和四周 8 块扇形子镜,中心圆形子镜作为参考不作移动,合成口径尺寸如图 1。由计算机产生随机数作为四周扇形子镜平移和偏摆量误差,平移量  $-5 \sim 5 \mu\text{m}$ ,偏摆量  $-25 \sim 25 \mu\text{rad}$ ,图 2 为引入偏摆后计算机模拟视图。

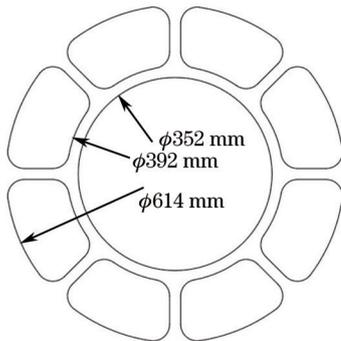


图 1 合成口径半径尺寸图

Fig.1 Dimension of segmented aperture

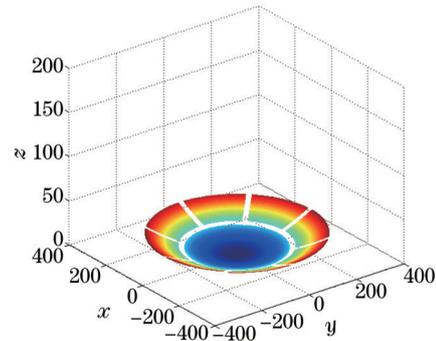


图 2 合成口径模拟 3D 图

Fig.2 Simulation of segmented mirrors

表 1 是在 Matlab 中模拟拼接实验结果,结果表明曲面拟合拼接算法能精确地计算合成口径抛物面各子镜间的平移偏摆误差,平移误差达到  $\lambda/50$ ,约为设定面形精度的一半;偏摆角度误差小于  $0.1 \mu\text{rad}$ ,达到了

表 1 Matlab 模拟拼接实验结果

Table 1 Result of simulation in Matlab

Mirror $i$	Piston / $\mu\text{m}$			Tilt / $\mu\text{rad}$			Tip / $\mu\text{rad}$		
	$Z_0$	$Z$	$\Delta Z$	$\theta_0$	$\theta$	$\Delta \theta$	$\varphi_0$	$\varphi$	$\Delta \varphi$
1	1.324	1.305	0.019	-10.739	-10.794	0.055	22.181	22.067	0.114
2	-4.025	-4.039	0.014	2.273	2.383	0.110	22.538	22.595	0.057
3	3.003	2.984	0.019	-3.793	-3.690	0.103	14.167	14.228	0.061
4	-3.581	-3.598	0.017	20.155	20.098	0.057	22.277	22.168	0.109
5	1.787	1.769	0.018	11.787	11.728	0.059	7.538	7.430	0.108
6	2.577	2.560	0.017	-5.225	-5.116	0.109	-15.941	-15.882	0.059
7	-4.029	-4.046	0.017	9.446	9.554	0.108	21.827	21.887	0.060
8	3.235	3.217	0.018	-8.867	-8.921	0.054	-22.571	-22.680	0.109

合成口径子镜共相位要求。

## 4 实验装置及结果

作为原理验证性实验,使用一块  $\Phi 614$  mm 的一块整体加工完成的抛物面镜,峰谷(PV)值优于  $\lambda/20$ 。将其分割为中心  $\Phi 352$  mm 的圆形子镜作为拼接时的位置参考镜,四周分割为八块扇形子镜,合成口径子镜尺寸如图2所示。为节约实验经费,仅使用两块相邻的扇形子镜和中心圆形子镜进行拼接验证实验。每块扇形子镜安装在成都太科公司设计的大口径子镜拼接微位移调整机构上,调整机构的三个微动结构能以 10 nm 的精度进行一维平移和二维偏摆调整,图3为微位移机构 CAD 模型图。拼接过程分为粗调和精调两部分:粗调使用三坐标测量仪将子镜间台阶误差拼接到  $3 \mu\text{m}$  以下;精调使用成都太科光电公司设计的双波长相移干涉仪对拼接子镜进行面形检测,图4为检测拼接系统光路图。干涉仪波长分别为 1053 nm 和 1064 nm,采用菲索共光路干涉原理,双波长相移干涉仪能对拼接子镜之间台阶高度进行检测。

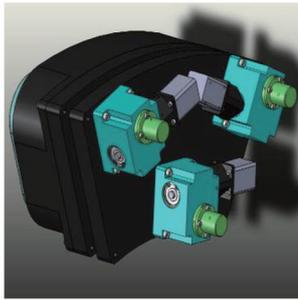


图3 微位移校正装置 CAD 结构图

Fig.3 CAD model of mirror segment structure

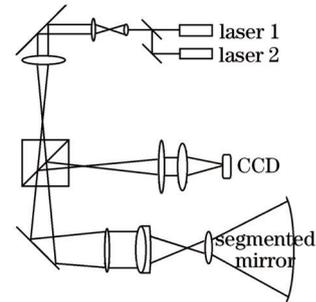


图4 合成口径面形检测光路示意图

Fig.4 Interferometer using for surface testing

图5(a)为拼接前使用干涉仪检测得到的条纹图,通过双波长相移算法计算合成口径系统面形,使用抛物面拟合拼接算法,计算得到各子镜与中心参考镜之间的平移和偏摆误差。根据微位移调整机构微动结构的位置,确定各微动结构位移量。由于  $x$  与  $y$  轴方向位移量很小,在实验中暂不作调整也能达到同相位效果<sup>[4-7]</sup>。图5(b)为经过微位移平台按照算法给定误差进行校正后干涉仪检测所得面形条纹。从图中可以直观地看到拼接后合成口径面形已经达到与单一口径相当的精度,合成口径子镜失调误差小于  $\lambda/15$ 。

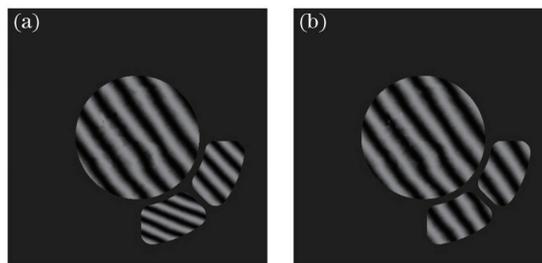


图5 (a) 合成口径面形共相位校正前干涉条纹图和(b)后干涉条纹图

Fig.5 (a) Interferogram of segmented mirrors before co-phasing adjustment and (b) after co-phasing adjustment

## 5 结论

本文提出了合成口径子镜拼接算法,在计算机上模拟拼接证实算法能精确地计算合成口径子镜平移和偏摆误差。利用双波长相移干涉仪检测合成口径台阶误差,在所得面形基础上建立了一套抛物面面形拟合拼接算法计算合成口径拼接误差,完成了合成口径拼接实验,子镜失调误差与单一口径面形加工精度  $\lambda/15$  相当。为大口径拼接望远镜系统加工和制作提供了一条途径。

### 参考文献

- 1 Redding D C, Basinger S A, Lowman A E, *et al.*. Wavefront sensing and control for a next-generation space telescope [C]. SPIE, 1998, 3356: 758-772.
- 2 Su D, Zou W, Zhang Z, *et al.*. Experimental system of segmented-mirror active optics[C]. SPIE, 2000, 4003: 417-425.

- 3 Song H, Xian H, Jiang W, *et al.*. Design of a white-light interferometric measuring system for co-phasing the primary mirror segments of the next generation of ground-based telescope[C]. SPIE, 2007, 6721: 67210D.
- 4 Bruning J H, Herriott D R, Gallagher J E, *et al.*. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. Appl Opt, 1974, 13(11): 2693-2703.
- 5 Wang Yueming, Lang Junwei, Wang Jianyu. Status and prospect of space-borne hyperspectral imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010008.  
王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010008.
- 6 Liao Zhou, Qiu Qi, Zhang Yudong. Numerical simulation of segmented telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0722002.  
廖周, 邱琪, 张雨东. 分块拼接望远镜的数值仿真[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0722002.
- 7 Gu Zhiyuan, Yan Chanxiang, Hu Chunhui, *et al.*. Coordinate datum transition method for optical system computer-aided alignment[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0322003.  
顾志远, 颜昌翔, 胡春晖, 等. 光学系统计算机辅助装调的坐标基准过渡方法[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0322003.

栏目编辑: 何卓铭