

# 拼接式反射镜共相误差检测

郑 彬<sup>1,3,4</sup>, 陆培芬<sup>2</sup>, 陈永和<sup>1,3</sup>, 傅雨田<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

<sup>2</sup>华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062;

<sup>3</sup>中国科学院红外成像与探测技术重点实验室, 上海 200083;

<sup>4</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 基于圆孔衍射理论,设计了一套拼接式反射镜的共相误差光学检测系统,并采用双波长窄带共相算法实现对合成孔径拼接镜的共相检测。方案中设计了圆孔掩模板、相位板和微棱镜阵列,通过数值仿真得到子镜间存在一系列台阶差时的圆孔衍射模板图样,再将待测图样与模板图样进行相关匹配,获得当前子镜间存在的台阶差。在将检测方案应用于拼接镜检测之前,通过相位板在光路中引入已知量相位差进行模拟实验,对衍射图样进行采样和匹配;实验结果验证了方案的可行性,可实现对合成孔径拼接面进行较高精度的共相检测。

**关键词** 测量; 圆孔衍射; 共相检测; 拼接镜面; 合成孔径系统

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.1112002

## Co-Phase Error Detection of Segmented Mirrors

Zheng Bin<sup>1,3,4</sup>, Lu Peifen<sup>2</sup>, Chen Yonghe<sup>1,3</sup>, Fu Yutian<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

<sup>3</sup> Key Laboratory of Infrared Detecting and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>4</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Based on the theory of aperture diffraction, a set of co-phase error optical detection system with segmented mirrors is designed, and the dual-wavelength narrow band co-phase algorithm is used to realize the co-phase detection of synthetic aperture segmented mirrors. In the scheme, circular aperture mask plate, phase difference plate and prism array have been designed for the system. By numerical simulation, a set of template pictures about the circular aperture diffraction with a series of different optical path differences have been obtained. Then, the correlation of the test image and template pictures will be figured out to calculate the optical path difference of the two adjacent sub-mirrors. Before applying the scheme to the segmented mirror detection, a known amount of phase difference in the optical path is introduced by phase plates to carry out the simulation, so that the diffraction patterns are sampled and matched. Results of the experiment verify the feasibility of the scheme, and high accuracy co-phase detection of the synthetic aperture segmented surface can be realized.

**Key words** measurement; circular aperture diffraction; co-phase detection; segmented mirrors; synthetic aperture system

**OCIS codes** 120.3620; 050.1940; 040.1880; 080.4035

## 1 引 言

根据瑞利判据可知,当波长一定时,望远镜的空间分辨能力与望远镜的口径成正比,因此望远镜的口径

收稿日期: 2017-05-26; 收到修改稿日期: 2017-06-25

作者简介: 郑 彬(1990—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计与光学检测方面的研究。

E-mail: tank32012@sina.com

导师简介: 傅雨田(1967—),男,博士,研究员,主要从事红外成像遥感技术方面的研究。

E-mail: yutianfu@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

越大,望远镜的空间分辨能力越强<sup>[1]</sup>。目前,随着对天文望远镜探测能力要求的提高,望远镜的口径不断增大,下一代的大型及超大型望远镜的主镜口径一般都大于 10 m<sup>[2]</sup>。为了避免单块大口径镜面加工制造所面临的困难和限制,望远镜的主镜也从最初的单块式发展为子镜拼接式。拼接式主镜与单块整镜相比,最困难也最为关键的技术问题是拼接子镜之间的共相误差检测<sup>[3]</sup>。如果经过各子镜后的光波面具有相同的相位,那么相干叠加后的弥散斑中心强度增强,宽度变窄,则可以提高光学系统的分辨率。因此,如何精密地检测并控制分块子镜拼接成为整个单一镜面,成为了拼接式望远镜实现共相成像所面临的关键技术问题。实现共相需要进行子镜间相对位置的检测和补偿促动,并通过闭环控制实现实时校正;一般共相精度需要达到十分之一的波长,采用主动光学技术来维持系统的共焦和共相位的稳定。目前,检测子镜之间相位差的光学方法有多种,如衍射测量技术、干涉测量技术、曲率波前传感技术、相位差异波前传感技术等。正在运行的美国的 Keck I 和 II 望远镜发展了三种拼接镜共相检测的方法,其中两种是采用衍射技术来获取子镜之间的相位信息,发展了基于夏克-哈特曼原理的宽带共相算法<sup>[4]</sup>和窄带共相算法<sup>[5]</sup>;另一种是基于曲率传感的原理发展的相位间断传感技术<sup>[6]</sup>。Keck I 和 II 望远镜是最早采用拼接式反射镜主动控制光学技术的两台望远镜。1993 年,由 36 块对角线长为 1.8 m 的正六边形子镜拼接成 10 m 口径的 Keck I 望远镜交付使用,国际上拼接镜面的主动光学技术已经发展成熟,成为制造极大口径望远镜的关键技术<sup>[7]</sup>;Keck I 和 II 在可见光波段都实现了共焦,共焦误差均方根值(RMS)为 0.33",在红外波段实现共相<sup>[8]</sup>。国内在现阶段除了大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)采用了拼接镜面主动光学技术,其他主要集中在实验室研究阶段;检测手段主要采用相位差异法、相位恢复法以及色散条纹传感技术等。目前,中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所基于色散条纹传感器在 $\pm 15 \mu\text{m}$ 测量范围内实现了 20 nm 的检测精度<sup>[9]</sup>;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所依据相位差法的基本原理,通过在球面镜上放置两个合成口径分别为 200 mm 和 50 mm 的拼接光阑进行模拟拼接实验,通过优化计算得到台阶误差分别小于 25 nm 和 1 nm<sup>[10]</sup>。

本文基于圆孔衍射理论构建了一套拼接镜主动光学检测系统,用于对镜面面型为抛物面的拼接主镜进行共相检测,也为以后装调检测大口径拼接镜面做了准备。

## 2 光学检测系统

拼接镜主动光学检测系统是由拼接主镜和相位检测系统组成。图 1 为子镜拼接共相光学检测系统示意图,检测系统前端的准直镜头焦点与拼接面主镜的焦点重合,使从拼接反射镜返回的汇聚光束经准直后进入检测系统。系统包括了一个准直扩束器、一个分光棱镜、一个准直镜头、一个聚焦镜头、一个电荷耦合检测器(CCD)以及相应的圆孔掩模板和微棱镜阵列。现阶段为共相检测系统原理验证阶段,采用面型精度为 $\lambda/10$ ( $\lambda$ 为波长)的平面镜代替拼接面主镜为系统提供返回光路,并在系统中利用相位板引入已知量相位差进行模拟实验。随着大口径抛物面拼接主镜系统平台搭建的日益完善,该共相检测系统将用于子镜拼接的共相检测和控制。对于拼接镜的定相,检测系统的关键元件是掩模板和微棱镜阵列。圆孔掩模板如图 2(a)所示,掩模上有小圆孔,与被二次成像的拼接子镜边缘间中心对准,如图 2(b)所示。棱镜阵列如图 2(c)所示,该微棱镜由直径 20 mm、高 2.5 mm 的圆柱被 16 个侧面均等切削而成,侧面与底面夹角为 $3^\circ$ ,切削位置为:以顶面中心为圆心外接圆直径为 2.4 mm 的正十六边形开始往外。如图 1 所示,棱镜阵列放置在掩模板之后的出瞳处,将经过各掩模孔出来的衍射图样在探测器 CCD 靶面上有序地分开,避免各相邻衍射图样间的干扰。

### 2.1 共相检测原理<sup>[5]</sup>

共相检测原理是基于圆孔衍射理论,根据衍射图样的具体细节,包括衍射光斑的形状、大小以及光斑间的相对位置等,获取相邻子镜间的相位信息。

假设衍射孔径的半径为 $a$ ,上半圆孔(子镜)的台阶差为 $\delta/2$ ,下半圆孔(子镜)的台阶差为 $-\delta/2$ ,则上下半圆孔间的台阶差为 $\delta$ 。设单位振幅的单色平面波入射到台阶差为 $\delta$ 的两子拼接镜,孔径所在的孔径平面为 $\rho$ ,采用极坐标 $(\rho, \theta)$ ,则加载了相位差后的孔径平面上的复振幅可以表示为

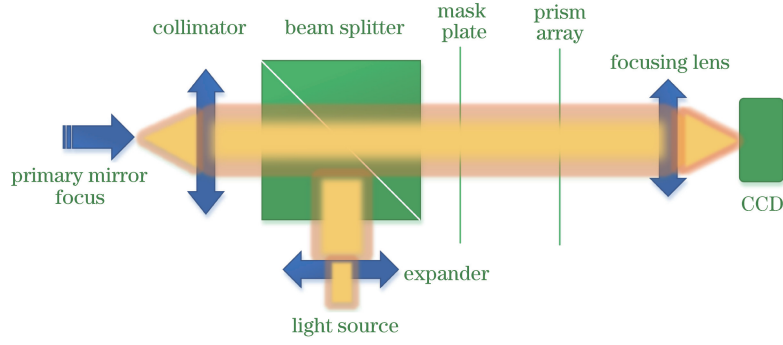


图 1 拼接子镜共相检测系统光路图

Fig. 1 Optical path of the segmented mirror co-phase detection system

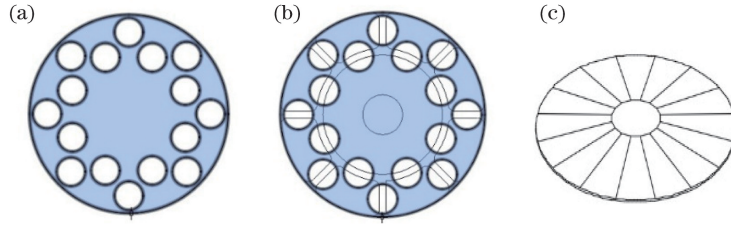


图 2 (a)掩模板示意图;(b)掩模板与拼接面的对准示意图;(c)棱镜阵列

Fig. 2 (a) Schematic of the mask plate; (b) alignment schematic of mask plate and segmented mirrors; (c) prism array

$$f(\rho, \theta) = \begin{cases} \exp(ik\delta), & \eta \geq 0, \rho \leq a \\ \exp(-ik\delta), & \eta < 0, \rho \leq a, \\ 0, & \rho > a \end{cases} \quad (1)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\eta = 0$  表示上下双半圆孔的分界线。

设衍射光斑所在的平面为  $\omega$ , 在理想成像的情况下, 像平面的复振幅分布可表示为子孔径函数的傅里叶变换<sup>[11]</sup>, 可得:

$$F(\omega, k\delta) = \frac{2}{\pi a^2} \int_0^{\pi/2} \int_0^a \cos(k\theta + k\rho\omega) \rho d\rho d\theta. \quad (2)$$

则像平面的强度值为

$$I(\omega, k\delta) = F^2(\omega, k\delta). \quad (3)$$

窄带夏克哈特曼算法中, 对于两相邻子镜任意的相位差  $\delta$ , 像平面的强度分布  $I(\omega, k\delta)$  可以由  $F(\omega, 0)$  和  $F(\omega, \pi/2)$  构建得到:

$$I(\omega, k\delta) = [\cos(k\delta)F(\omega, 0) + \sin(k\delta)F(\omega, \pi/2)]^2. \quad (4)$$

由(4)式可知, 单波长窄带共相算法存在半波长的演化周期, 因而导致单波长窄带共相检测存在半波长的模糊问题; 为解决单波长检测方法的半波模糊问题, 将通过采用双波长窄带共相算法, 同时扩大了检测系统共相检测的动态范围。

首先分别使用波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的光源, 得到两幅当前位置的子孔径双半圆孔衍射图样。根据模板匹配得出台阶高度  $z_1$  和  $z_2$ 。假定实际台阶差为  $h$ , 则  $h$  与模板匹配得出的台阶高  $z$  的关系为

$$h = z + (1/2)m\lambda, \quad |z| < \lambda/4, \quad m \in Z, \quad (5)$$

根据(5)式可得出对应于波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  时的实际台阶高度为

$$h = z_1 + (1/2)m\lambda_1, \quad m \in Z, \quad |z_1| < \lambda_1/4, \quad (6)$$

$$h = z_2 + (1/2)n\lambda_2, \quad n \in Z, \quad |z_2| < \lambda_2/4, \quad (7)$$

两式相减可得:

$$\delta z = z_2 - z_1 = (1/2)(m\lambda_1 - n\lambda_2). \quad (8)$$

选取波长为  $1 < \frac{\lambda_2}{\lambda_1} < \frac{3}{2}$  的两束光, 且  $\frac{j+1}{j} < \frac{\lambda_2}{\lambda_1} < \frac{j}{j-1}$ , 其中  $j$  为整数, 因此可得出双波长窄带的检测范围为

$$\begin{cases} -\frac{j\lambda_1}{4} < h < \frac{j\lambda_1}{4}, j = 2n + 1 \\ -\frac{(j-1)\lambda_2}{4} < h < \frac{(j-1)\lambda_2}{4}, j = 2n \end{cases} \quad (9)$$

根据上述过程, 可以推算当波长  $\lambda_1 = 635 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 650 \text{ nm}$  时, 双波长共相检测的检测范围为  $\pm 6.826 \mu\text{m}$ 。双波长窄带共相算法主要步骤如下:

- 1) 分别使用波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的光源, 得到两幅当前位置的子孔径间圆孔衍射图样;
- 2) 将每一幅待测衍射图样与模板图样做交叉相关运算, 得到半波长检测范围内的台阶高度  $z_1$  和  $z_2$ ;
- 3) 利用(6)、(7)式, 求得  $m$ 、 $n$  消除半波长模糊的影响, 得到当前位置的边缘台阶高度  $h$ 。

### 3 数值模拟与实验结果

#### 3.1 数值仿真建立衍射模板图样

根据窄带共相算法的基本方程[(4)式], 可以得到衍射图样随着台阶差  $\delta$  的变化情况。图 3 为通过 MATLAB 生成的波长为  $635 \text{ nm}$  的 11 幅不同台阶差下的理论衍射图样, 其对应的等高线图如图 4 所示, 可以看出, 衍射图样光斑的大小、形状以及位置对台阶差的变化非常敏感。因此, 待测图样分别与每幅模板图样进行交叉相关匹配, 相关性最高的模板对应的台阶差与待测图样的台阶差最相近。

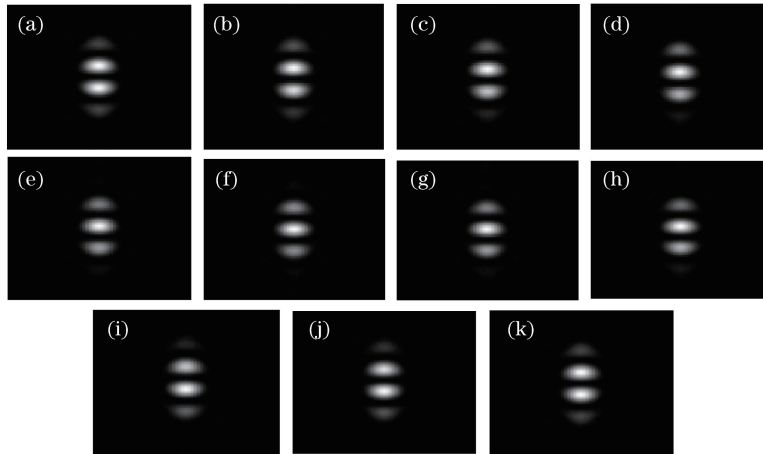


图 3 11 幅衍射模板图样。(a)  $-5\lambda/20$ ; (b)  $-4\lambda/20$ ; (c)  $-3\lambda/20$ ; (d)  $-2\lambda/20$ ; (e)  $-\lambda/20$ ;  
(f) 0; (g)  $\lambda/20$ ; (h)  $2\lambda/20$ ; (i)  $3\lambda/20$ ; (j)  $4\lambda/20$ ; (k)  $5\lambda/20$

Fig. 3 Eleven diffraction template patterns. (a)  $-5\lambda/20$ ; (b)  $-4\lambda/20$ ; (c)  $-3\lambda/20$ ; (d)  $-2\lambda/20$ ;  
(e)  $-\lambda/20$ ; (f) 0; (g)  $\lambda/20$ ; (h)  $2\lambda/20$ ; (i)  $3\lambda/20$ ; (j)  $4\lambda/20$ ; (k)  $5\lambda/20$

由图 3 和图 4 可知, 在单波长窄带算法中, 理论计算所得的衍射图样随着台阶差  $\delta$  值的变化呈现出半个波长的演化周期。因此, 单波长窄带共相算法存在半波长模糊问题, 为了消除半波长模糊问题, 同时增大系统的检测范围, 需要采用双波长窄带测量的方法进行测量。

#### 3.2 实验结果

由图 2(b) 可以看出, 光经合成孔径拼接面反射经过圆孔掩模板时, 由于合成孔径拼接面之间存在  $20 \text{ mm}$  的缝隙, 最终在掩模板的圆孔处发生近似双半圆孔衍射现象。在现阶段的共相检测实验中, 通过引入已知相位差的相位板和圆孔掩模板进行模拟。设计了如图 5(a) 所示的相位板模拟子镜间的相位差, 相位板由折射率  $n = 1.458$  的石英材料制成, 分成 4 个厚度不同的象限, 象限间引入了 4 个不同相位差, 分别为  $229, 458, 687, -1374 \text{ nm}$ , 分别对应  $0 \sim 0.5 \mu\text{m}$  象限、 $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$  象限、 $1.5 \sim 3 \mu\text{m}$  象限和  $3 \sim 0 \mu\text{m}$  象限。因此, 经过相邻象限的光束具有相应的台阶差, 对于  $635 \text{ nm}$  波长, 对应的台阶差为  $0.36\lambda, 0.72\lambda, 1.08\lambda, -2.16\lambda$ 。

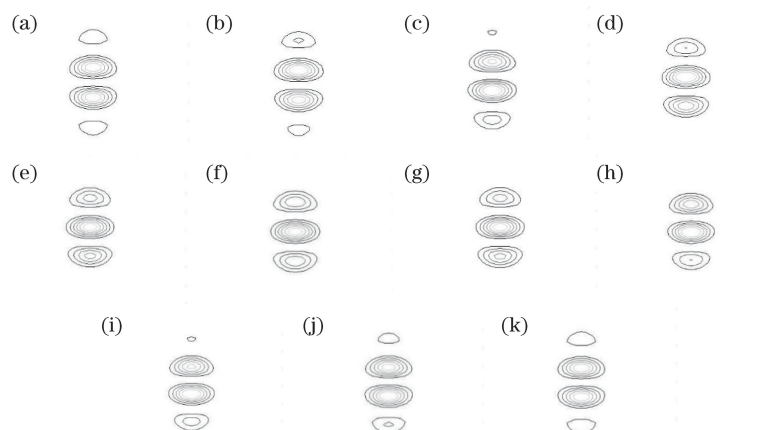


图 4 图 3 中每幅模板图样的强度等高线图。(a)  $-5\lambda/20$ ; (b)  $-4\lambda/20$ ; (c)  $-3\lambda/20$ ; (d)  $-2\lambda/20$ ; (e)  $-\lambda/20$ ; (f) 0; (g)  $\lambda/20$ ; (h)  $2\lambda/20$ ; (i)  $3\lambda/20$ ; (j)  $4\lambda/20$ ; (k)  $5\lambda/20$

Fig. 4 Contour maps of every template pattern in Fig. 3. (a)  $-5\lambda/20$ ; (b)  $-4\lambda/20$ ; (c)  $-3\lambda/20$ ; (d)  $-2\lambda/20$ ; (e)  $-\lambda/20$ ; (f) 0; (g)  $\lambda/20$ ; (h)  $2\lambda/20$ ; (i)  $3\lambda/20$ ; (j)  $4\lambda/20$ ; (k)  $5\lambda/20$

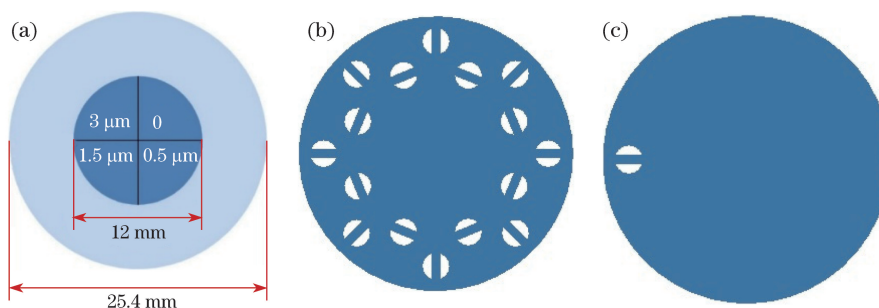


图 5 (a) 相位板; (b) 双半圆孔衍射掩模板; (c) 仅剩下单孔的双半圆孔衍射掩模板  
Fig. 5 (a) Phase plate; (b) double semicircle diffraction mask plate;  
(c) double semicircle diffraction mask plate with only one hole

图 5(b)为模拟实验采用的双半圆孔掩模板,实验中选取如图 5(c)所示的一个双半圆孔,转动相位板依次扫过该掩模孔,通过 CCD 采集每次相位板相位发生突变时的衍射图样。采用波长为 635 nm 的检测光源,得到的 4 个不同台阶差的衍射图样如图 6(a)~(d)所示。

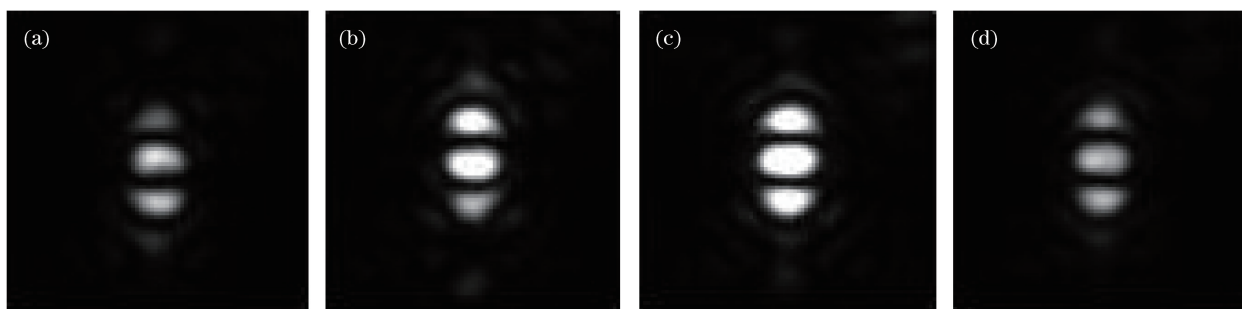


图 6 波长为 635 nm 时 4 种相位差对应的衍射图样。(a) 229 nm; (b) 458 nm; (c) 687 nm; (d)  $-1374$  nm  
Fig. 6 Diffraction patterns corresponding to four phase differences with the wavelength of 635 nm.  
(a) 229 nm; (b) 458 nm; (c) 687 nm; (d)  $-1374$  nm

由于实际获取的衍射图样存在一些由于环境引起的噪斑,因而在做图像匹配之前需对图样进行滤波降噪处理。又由于 CCD 采集的光斑存在亮度不均匀的问题,故在保持衍射图样轮廓的基础上,对光斑进行腐蚀和膨胀等形态学处理,重构图样使亮斑均衡化;裁剪图样使采集的图样与理论生成的衍射模板图样尺寸一致后,再进行相关运算。



当光源的波长为 635 nm 时,若让相位板依次扫过单孔掩模板,则同样可获得相应 4 种情形时的双半圆孔衍射图样。根据 4 种情况可计算出它们所引入的光程差分别为  $0.36\lambda, 0.72\lambda, 1.08\lambda, -2.16\lambda$ , 同样考虑到半波长的演化周期,在  $-5\lambda/20 \sim 5\lambda/20$  的半波长周期内,它们的匹配结果依次相当于上下双半圆孔间存在  $-3.8\lambda/20, 4.4\lambda/20, 1.6\lambda/20$  以及  $-3.2\lambda/20$  光程差时的情形。表 1 是 635 nm 波长情况下实验采集的衍射图样与模板图样进行相关匹配所得结果。

表 1 波长为 635 nm 时 4 种情形的相关匹配结果

Table 1 Correlation matching results of the four situations when the wavelength is 635 nm

Half wavelength period	Optical path difference			
	$0.36\lambda$	$0.72\lambda$	$1.08\lambda$	$-2.16\lambda$
$-5\lambda/20$	0.759	0.871	0.490	0.845
$-4\lambda/20$	0.895	0.858	0.478	0.856
$-3\lambda/20$	0.881	0.837	0.475	0.873
$-2\lambda/20$	0.842	0.803	0.836	0.831
$-\lambda/20$	0.658	0.388	0.841	0.418
0	0.470	0.364	0.843	0.489
$\lambda/20$	0.439	0.350	0.851	0.471
$2\lambda/20$	0.501	0.343	0.844	0.761
$3\lambda/20$	0.655	0.772	0.474	0.796
$4\lambda/20$	0.737	0.887	0.481	0.824
$5\lambda/20$	0.759	0.871	0.490	0.845

考虑到半波模糊,将光源换成波长为 650 nm 的激光器,再次进行衍射实验,图 7 为实验中获得的 4 个不同台阶差时对应的衍射图样。

当光源的波长为 650 nm 时,若让相位板依次扫过单孔掩模板,则同样可依次获得相应 4 种情形时的双半圆孔衍射图样。根据 4 种情形可计算出它们所引入的光程差分别为  $0.35\lambda, 0.70\lambda, 1.06\lambda, -2.11\lambda$ , 同样考虑到半波长的演化周期,在  $-5\lambda/20 \sim 5\lambda/20$  的半波长周期内,它们的匹配结果依次相当于上下双半圆孔间存在  $-3\lambda/20, 4\lambda/20, 1.2\lambda/20$  以及  $-2.2\lambda/20$  光程差时的情形。

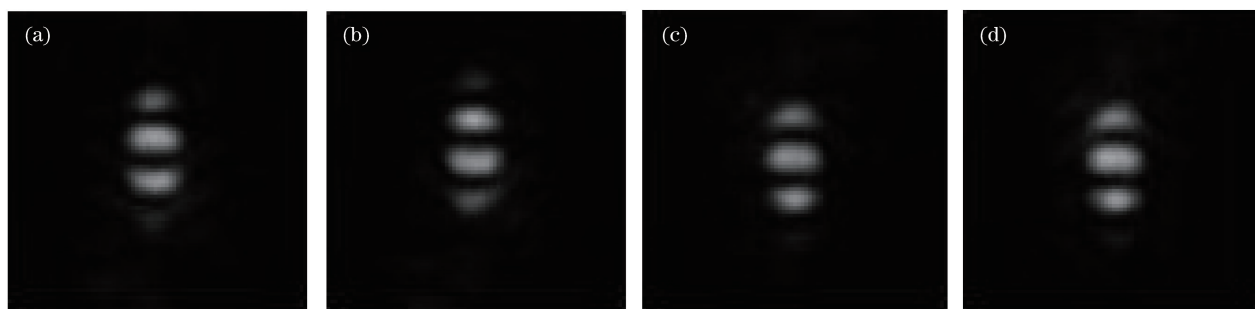


图 7 波长为 650 nm 时 4 种相位差对应的衍射图样。(a) 229 nm; (b) 458 nm; (c) 687 nm; (d)  $-1374$  nm

Fig. 7 Diffraction patterns corresponding to four phase differences with the wavelength of 650 nm.

(a) 229 nm; (b) 458 nm; (c) 687 nm; (d)  $-1374$  nm

表 2 为对应光源波长为 650 nm 时,上下双半圆孔间存在对应相位板引入的 4 种光程差时衍射图样与模板图样匹配的结果。

## 4 结果分析

由上一节分析可知,光源波长为 635 nm 时,根据图 5(a),当相位板的厚度为  $0 \sim 0.5 \mu\text{m}$  突变处对准掩模孔时,掩模板象限间存在 229 nm 的光程差,上下双半圆孔间存在  $0.36\lambda$  的光程差,由于存在半波长演化周期,此时匹配的结果相当于存在  $-3.8\lambda/20$  的光程差时的情形,相关匹配结果应介于光程差为  $-3\lambda/20$

表 2 波长为 650 nm 时 4 种情形的相关匹配结果

Table 2 Correlation matching results of the four situations when the wavelength is 650 nm

Half wavelength period	Optical path difference			
	0.35 $\lambda$	0.70 $\lambda$	1.06 $\lambda$	-2.11 $\lambda$
-5 $\lambda/20$	0.867	0.712	0.430	0.448
-4 $\lambda/20$	0.879	0.721	0.606	0.788
-3 $\lambda/20$	0.893	0.680	0.667	0.880
-2 $\lambda/20$	0.790	0.481	0.767	0.890
- $\lambda/20$	0.395	0.327	0.862	0.762
0	0.409	0.332	0.870	0.460
$\lambda/20$	0.423	0.328	0.884	0.457
2 $\lambda/20$	0.414	0.528	0.852	0.705
3 $\lambda/20$	0.408	0.607	0.826	0.737
4 $\lambda/20$	0.786	0.779	0.609	0.629
5 $\lambda/20$	0.867	0.712	0.430	0.448

与-4 $\lambda/20$ 的模板之间。根据表 1 中的数据可知,对应光程差为 0.36 $\lambda$  时,最高的相关系数为 0.895,对应光程差为-4 $\lambda/20$  的衍射模板;次高的相关系数为 0.881,对应光程差为-3 $\lambda/20$  的衍射模板;因此,可以得出此时的匹配结果为上下双半圆孔间存在-4 $\lambda/20$  光程差,可知实验结果与理论假设相匹配;由于上下双半圆孔间实际引入的光程差为-3.8 $\lambda/20$ ,此时误差为 0.2 $\lambda/20$ 。

同理,当相位板为 0.5~1.5  $\mu\text{m}$  突变处对准掩模孔时,象限间的光程差为 458 nm,上下双半圆孔间存在 0.72 $\lambda$  的光程差,由上节分析可知相当于存在 4.4 $\lambda/20$  的光程差时的情形,因此匹配的结果应该介于光程差为 5 $\lambda/20$  与 4 $\lambda/20$  的模板之间。而由表 1 对应情形的相关匹配系数可知,对应于掩模板光程差分别为 5 $\lambda/20$  和 4 $\lambda/20$  时匹配的相关系数分别为 0.871 与 0.887,相关系数为匹配结果中的最大值和次大值,因此此时匹配得到的结果是上下双半圆孔间存在 4 $\lambda/20$  的光程差,误差为 0.4 $\lambda/20$ 。同样可得第三种情况和第四种情况的匹配结果分别为  $\lambda/20$  和-3 $\lambda/20$ ,误差分别为 0.6 $\lambda/20$  和 0.2 $\lambda/20$ 。

当波长为 650 nm 时,根据表 2 可知,第一种情况的匹配结果为上下双半圆孔之间存在-3 $\lambda/20$  的光程差,相关系数为 0.893,而上下圆孔间存在的实际光程差为-3 $\lambda/20$ ,匹配较为理想;第二种情况的实际光程差分别为 4 $\lambda/20$ ,由表 2 中相应情形的数据可以发现匹配结果为相关系数 0.779 所对应的 4 $\lambda/20$ ;第三种情况上下圆孔间存在的光程差为 1.2 $\lambda/20$ ,根据表 2 数据可知此时匹配的结果为  $\lambda/20$ ,误差为 0.2 $\lambda/20$ ;第四种情况,由表 2 数据可知匹配结果为-2 $\lambda/20$ ,根据其实际相位差-2.11 $\lambda/20$  可知其误差为 0.11 $\lambda/20$ 。表 3 中的数据是根据 635 nm 和 650 nm 波长的相关匹配结果验证双波长窄带共相算法所得,结合相关匹配结果,再根据双波长窄带共相算法公式[(5)~(8)式]可以依次算出每种相位情形所对应波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的  $m$  和  $n$  值,从而得出对应  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的台阶高  $h_1$  和  $h_2$ ,分别再与实际台阶高  $h$  比较可得出对应情形下每个波长的测试误差。

表 3  $\lambda_1=635\text{ nm}$ 、 $\lambda_2=650\text{ nm}$  时双波长窄带共相算法结果Table 3 Results of the two wavelength narrow band co-phase algorithm with  $\lambda_1=635\text{ nm}$ ,  $\lambda_2=650\text{ nm}$ 

Parameter	Optical path difference			
	229 nm	458 nm	687 nm	-1347 nm
$z_1$	-4 $\lambda_1/20$	4 $\lambda_1/20$	$\lambda_1/20$	-3 $\lambda_1/20$
$z_2$	-3 $\lambda_2/20$	4 $\lambda_2/20$	$\lambda_2/20$	-2 $\lambda_2/20$
$m$	1	1	2	-4
$n$	1	1	2	-4
$h_1/\text{nm}$	190.5	444.5	666.75	-1365.25
$h_2/\text{nm}$	227	455	682.5	-1365
Error value of $h_1/\text{nm}$	-38.5	13.5	-20.25	18.25
Error value of $h_2/\text{nm}$	-2	-3	-4.5	18

综上所述,可知实验结果与理论假设相一致,模拟实验中每种情形的相关匹配误差都在 $\lambda/20$ 范围内,由表3可知模拟实验中出现的最大误差为 $-38.5\text{ nm}$ ,说明了检测方案具有较高的检测精度,验证了理论方案的可行性。由于模板数有限,根据计算所得相关系数提取相位差的过程中存在着一定的量化误差。为了提高匹配精度,可以在两个最大的相关系数之间进行二次插值,以降低相位提取过程中的量化误差,获得更准确的光程差。

## 5 结 论

共相检测是实现大口径合成孔径望远镜主镜拼接的关键技术之一,基于圆孔衍射理论构建了一套拼接镜共相检测光学系统对拼接面进行共相检测,同时采用了双波长窄带共相算法,拓展了检测系统的检测范围。根据双波长窄带共相算法可知最终系统的检测范围能达到 $\pm 6.826\ \mu\text{m}$ ,而单波长检测方法的检测范围只有半个波长,说明双波长窄带共相算法极大地扩展了系统的检测范围。模拟实验中每种情形的相关匹配误差都在 $\lambda/20$ 范围内,方案具有较高的检测精度,目前的实验结果将有利于方案的进一步实施,同时也将为国内大口径合成孔径共相检测技术提供一种新的可行性方案。

## 参 考 文 献

- [1] Zheng Shaobo, Zhao Qing. Fundamentals of physical optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 90-93.  
郑少波, 赵清. 物理光学基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 90-93.
- [2] Lin Xudong, Chen Tao, Wang Jianli, *et al.* Co-focus experiment of segmented-mirror active optics[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(3): 563-569.  
林旭东, 陈涛, 王建立, 等. 拼接镜主动光学共焦实验[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 563-569.
- [3] Meng Yuhuang, Xu Shuyan, Xu Boqian. Method of segmented mirror co-phasing based on dispersed fringe sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911006.  
孟玉凰, 徐抒岩, 许博谦. 基于色散条纹传感技术的拼接镜共相方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0911006.
- [4] Chanan G, Troy M, Dekens F, *et al.* Phasing the mirror segments of the Keck telescopes: the broadband phasing algorithm[J]. Applied Optics, 1998, 37(1): 140-150.
- [5] Chanan G, Ohara C, Troy M. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes II: the narrow-band phasing algorithm[J]. Applied Optics, 2000, 39(25): 4706-4714.
- [6] Chanan G A, Mast T S, Nelson J E, *et al.* Phasing the mirror segments of the W. M. Keck telescope[C]. SPIE, 1994, 2199: 622-630.
- [7] Su Dingqiang, Cui Xiangqun. Active optics—key technology of the new generation telescope[J]. Progress in Astronomy, 1999, 17(1): 1-14.  
苏定强, 崔向群. 主动光学——新一代大望远镜的关键技术[J]. 天文学进展, 1999, 17(1): 1-14.
- [8] Garry G A, Nelson J E, Terry T S. Segment alignment for the Keck telescope primary mirror[C]. SPIE, 1986, 628: 466-470.
- [9] Zhang Yong, Zhang Liang, Liu Genrong, *et al.* Experimental study of segmented mirrors co-phase using dispersed fringe sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0212004.  
张勇, 张靓, 刘根荣, 等. 基于色散条纹传感器的拼接镜面共相的实验研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0212004.
- [10] Zhang Jinkai, Zhang Jingxu, Lin Xudong, *et al.* Experimental study on segmented mirrors for piston detection using phase diversity[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(12): 1364-1368.  
张金凯, 张景旭, 林旭东, 等. 相位差法用于拼接镜 piston 相位检测的实验研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(12): 1364-1368.
- [11] Sha Dingguo, Su Datu. Optical measurement technology[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010: 170-172.  
沙定国, 苏大图. 光学测试技术[M]. 第2版. 北京: 北京理工大学出版社, 2010: 170-172.