

# 间隙及掩模偏心对采用理想模板窄带算法 共相拼接镜的影响

张永峰<sup>1,2,3\*\*</sup>, 鲜浩<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 分析间隙及偏心影响下的子孔径远场光斑形态变化,并探索采用理想圆孔径模板库匹配含间隙及偏心孔径的远场图样进行共相的可行性及适用范围。数值仿真了不同间隙及不同掩模偏心下的远场光斑形态,得到了二者对远场形态的影响趋势;数值模拟了采用理想模板窄带共相的过程,分析了不同间隙及不同掩模偏心下,不同平移误差的共相精度。研究表明,间隙越大,远场扩展范围越宽;偏心越大,远场受平移误差调制的效应越不明显;当间隙比例因子或偏心比例因子不超过 0.3 时,可直接采用理想模板共相。该研究拓展了窄带共相算法的应用,为深入研究窄带共相算法提供了相应基础。

**关键词** 成像系统; 拼接望远镜; 平移误差测量; 间隙; 掩模偏心; 窄带算法

中图分类号 TH751

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.081101

## Effects of Gap and Decenter of Mask on Narrow-Band Algorithm with Ideal Templates for Co-Phasing a Segmented Mirror

Zhang Yongfeng<sup>1,2,3\*\*</sup>, Xian Hao<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In this study, we analyze the changes in the spot morphology of the far field of the subaperture under the influence of gap and decenter of mask and explore the feasibility and applicable conditions of using the ideal circular aperture template library to match the far-field pattern generated by circular templates with gap and decenter for co-phasing. Further, the shape of the far-field is numerically simulated under different gaps and decenters of mask. The usage of ideal template narrow-band co-phasing is numerically simulated, and the co-phase accuracy of different piston errors under different gaps and decenters of mask is analyzed. The results prove that the far-field extension range will increase with the increasing gap. The larger the decenter of mask is, the less obvious the far-field effect modulated by the piston error will be. The ideal co-phase template can be directly adopted when the gap scaling factor or decenter scaling factor does not exceed 0.3. In this study, we expand the application of the narrow-band co-phase algorithm and provide the basis to further study this algorithm.

**Key words** imaging systems; segmented telescope; piston error measurement; gap; decenter of mask; narrow-band algorithm

**OCIS codes** 110.6770; 110.2960; 120.5050; 050.1940

收稿日期: 2019-06-05; 修回日期: 2019-07-05; 录用日期: 2019-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(11873008,61008038)、国家重点研发计划(2016YFB0501100)、中国科学院重点实验室创新基金(CXJJ-17S053)

\* E-mail: xianhao@ioe.ac.cn; \*\* E-mail: zhangyongfeng15@mails.ucas.edu.cn

# 1 引言

随着天文学的发展,科学家团体迫切需要更大口径的望远镜,以便能够高分辨率地观测宇宙深处晦暗的目标。然而,受加工水平、检测技术、成本、运输、面型控制,甚至发射空间望远镜所需整流罩体积等因素的限制,单一大口径主镜方案显得并不现实。拼接式反射镜方案利用多块小口径且相对易加工的子镜进行拼接,便可达到与单一大口径镜面等同的成像效果<sup>[1]</sup>,在工程实践上为大口径望远镜建设开辟了另一个窗口。KECK<sup>[2]</sup>、GTC<sup>[3]</sup>、SALT<sup>[4]</sup>和LAMOST<sup>[5]</sup>的成功运行验证了拼接式反射镜方案的可行性,正在建设中的E-ELT<sup>[6]</sup>、TMT<sup>[7]</sup>、JWST<sup>[8]</sup>以及概念望远镜ATLAST<sup>[9]</sup>等也将全部采用拼接式主镜。与此同时,子镜共相拼接的问题随之产生。作为首个成功运行的拼接望远镜,KECK望远镜采用窄带模板共相法实现子镜间的可靠精共相<sup>[10]</sup>,本文针对这一最早成功应用的方案进行研究。

窄带模板法原理如下:当子镜间存在平移误差时,横跨相邻子镜的微透镜可形成特别的衍射光斑,该衍射光斑随着平移误差呈现规律性变化。将待测平移误差状态下的衍射光斑与预先生成的模板库进行匹配,便可获得此刻的平移误差。理论上来说,窄带模板法要求掩模子孔径与对应子镜拼缝严格对准。然而,在实际情况中,二者不可避免地存在失调误差,从而导致掩模子孔径偏心。另外,造成掩模子孔径中心遮挡的间隙有两种。一种为拼缝处一定尺寸的物理间隙;另一种可考虑如下,拼缝对应的两个子镜的边缘均存在抛光引起的不同程度的卷边,同时,由于子镜长期暴露在外,其边缘将不同程度受损,为避免子镜卷边及受损对共相精度的影响<sup>[11]</sup>,可采用含较宽中心遮挡的圆孔径作为相应的掩模子孔径,以采样相邻子镜的卷边不显著内部区域的失调波前,该情形也可用间隙建模。以往的研究仅给出对应某一间隙下的远场图样<sup>[12]</sup>,并没有针对间隙及偏心对掩模子孔径远场光斑形态的影响作相关分析。另外,在窄带算法实践应用中,需根据对应拼缝处的间隙及偏心定标并修正模板库。但是,仅由36块子镜拼接而成的KECK主镜,其子镜拼缝超过84

个,遑论由成百上千块子镜拼接而成的甚大望远镜。很显然,采用定标并修正模板库的方式将严重加大共相操作复杂性,本文提议采用不存在偏心及间隙的理想圆孔径生成的模板库,这将节省定标及修正模板库的消耗时间,减小共相操作复杂性。本文还将分析使用理想圆孔径的模板库共相的可行性,得到适用的偏心及间隙容差。

本文先给出存在间隙及偏心时,掩模子孔径远场光斑的计算表达式;通过数值仿真,分析了仅存在间隙或偏心时远场光斑的形态变化。另外仿真分析了由理想圆孔径生成的模板库共相的精度,验证可行性及适用的偏心及间隙容差。该研究拓展了窄带共相算法的应用,为深入研究窄带共相算法提供了相关基础。

## 2 理论基础

工程实践中的拼接式子镜外形多采用正六边形,不失一般性,假设掩模子孔径为圆形。与偏心有关的偏心矢量表达式为

$$\Delta \mathbf{r} = (\Delta x, \Delta y) = (\Delta r \cos \theta, \Delta r \sin \theta), \quad (1)$$

式中: $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为沿 $x$ 方向和 $y$ 方向的偏心; $\Delta r$ 和 $\theta$ 分别为偏心距离和偏心方向。实验采用的直角坐标系如图1所示,图中也显示了子镜与掩模子孔径的位置关系,深色区域为掩模子孔径理想位置,其圆心与间隙中心重合,虚线所围圆区域对应偏心状态的掩模子孔径位置。

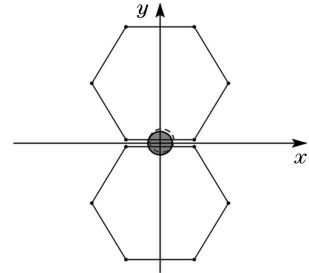


图1 直角坐标系及子镜与掩模相对位置关系

Fig. 1 Schematic of Cartesian coordinate system and relative position relationship between segment and mask

设子镜间平移误差为 $\delta$ ,采用单位振幅的波长为 $\lambda$ 的单色平面波照射,掩模所在平面的透射光场可表示为

$$P(x, y) = \begin{cases} 0, & (x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2 > (D/2)^2 \\ \exp(jk\delta), & (x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2 \leq (D/2)^2 \text{ and } y \geq g/2 \\ \exp(-jk\delta), & (x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2 \leq (D/2)^2 \text{ and } y \leq -g/2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $k$ 为空间角频率, $k = 2\pi/\lambda$ ;  $D$ 为掩模子孔径直径; $g$ 为等效间隙。根据傅里叶光学原理<sup>[13]</sup>,距孔径 $f$

处的焦平面上光强的分布为

$$I(u, v) = \frac{1}{(\lambda f)^2} \left| \iint P(x, y) \exp\left[-j \frac{k}{f}(ux + vy)\right] dx dy \right|^2, \quad (3)$$

式中:  $(u, v)$  为焦平面空间坐标。(3)式的核心积分可具体写为

$$\begin{aligned} I_{\text{Key}}(u, v) &= \iint P(x, y) \exp\left[-j \frac{k}{f}(ux + vy)\right] dx dy = \\ &\exp(jk\delta) \int_{g/2}^{D/2+\Delta y} \int_{\Delta x - \sqrt{(D/2)^2 - (y-\Delta y)^2}}^{\Delta x + \sqrt{(D/2)^2 - (y-\Delta y)^2}} \exp\left[-j \frac{k}{f}(ux + vy)\right] dx dy + \\ &\exp(-jk\delta) \int_{-D/2+\Delta y}^{-g/2} \int_{\Delta x - \sqrt{(D/2)^2 - (y-\Delta y)^2}}^{\Delta x + \sqrt{(D/2)^2 - (y-\Delta y)^2}} \exp\left[-j \frac{k}{f}(ux + vy)\right] dx dy = \\ &\exp(jk\delta) \frac{\exp\left[-j \frac{k}{f}(u\Delta x + v\Delta y)\right]}{j \frac{k}{f}u} \int_{g/2-\Delta y}^{D/2} \exp\left\{j \frac{k}{f} [u \sqrt{(D/2)^2 - y^2} - vy]\right\} dy - \\ &\exp(jk\delta) \frac{\exp\left[-j \frac{k}{f}(u\Delta x + v\Delta y)\right]}{j \frac{k}{f}u} \int_{g/2-\Delta y}^{D/2} \exp\left\{-j \frac{k}{f} [u \sqrt{(D/2)^2 - y^2} + vy]\right\} dy + \\ &\exp(-jk\delta) \frac{\exp\left[-j \frac{k}{f}(u\Delta x + v\Delta y)\right]}{j \frac{k}{f}u} \int_{-D/2}^{-g/2-\Delta y} \exp\left\{j \frac{k}{f} [u \sqrt{(D/2)^2 - y^2} - vy]\right\} dy - \\ &\exp(-jk\delta) \frac{\exp\left[-j \frac{k}{f}(u\Delta x + v\Delta y)\right]}{j \frac{k}{f}u} \int_{-D/2}^{-g/2-\Delta y} \exp\left\{-j \frac{k}{f} [u \sqrt{(D/2)^2 - y^2} + vy]\right\} dy. \end{aligned} \quad (4)$$

从(4)式可清楚地看到,  $\Delta x$  仅在焦平面复振幅中引入纯相位因子, 不会引起焦平面光强分布的变化, 因此, 可只考虑  $\Delta x=0$  时对应偏心的成像情况。为了便于分析, 定义间隙比例因子及偏心比例因子的表达式为

$$g_{\text{ratio}} = g/D, \quad (5)$$

$$\Delta y_{\text{ratio}} = 2\Delta y/D. \quad (6)$$

利用(5)式和(6)式表征不同的间隙及偏心程

度。  $g_{\text{ratio}}=0$  时代表无间隙情形;  $\Delta y_{\text{ratio}}=0$  时代表非偏心状态。要注意的是, (4)式中  $D$  的取值要大于  $g$ ,  $\Delta y$  的绝对值要小于  $(D-g)/2$ , 以保证掩模能够覆盖采样两个子镜的相关区域, 于是其约束关系为

$$g_{\text{ratio}} - 1 < \Delta y_{\text{ratio}} < 1 - g_{\text{ratio}}. \quad (7)$$

令  $x = Dx'/2, y = Dy'/2, u' = Du/2\lambda f, v' = Dv/2\lambda f$ , (4)式可变形为

$$\begin{aligned} I_{\text{Key}}(u', v') &= (D/2)^2 \exp(jk\delta) \frac{\exp(-2\pi j v' \Delta y_{\text{ratio}})}{2\pi j u'} \int_{g_{\text{ratio}}-\Delta y_{\text{ratio}}}^1 \exp[2\pi j (u' \sqrt{1-y'^2} - v'y')] dy' - \\ &(D/2)^2 \exp(jk\delta) \frac{\exp(-2\pi j v' \Delta y_{\text{ratio}})}{2\pi j u'} \int_{g_{\text{ratio}}-\Delta y_{\text{ratio}}}^1 \exp[-2\pi j (u' \sqrt{1-y'^2} + v'y')] dy' + \\ &(D/2)^2 \exp(-jk\delta) \frac{\exp(-2\pi j v' \Delta y_{\text{ratio}})}{2\pi j u'} \int_{-1}^{-g_{\text{ratio}}-\Delta y_{\text{ratio}}} \exp[2\pi j (u' \sqrt{1-y'^2} - v'y')] dy' - \\ &(D/2)^2 \exp(-jk\delta) \frac{\exp(-2\pi j v' \Delta y_{\text{ratio}})}{2\pi j u'} \int_{-1}^{-g_{\text{ratio}}-\Delta y_{\text{ratio}}} \exp[-2\pi j (u' \sqrt{1-y'^2} + v'y')] dy'. \end{aligned} \quad (8)$$

由于(8)式中积分的复杂性, 无法对(4)式继续化简以得到其解析解。因此, 在以下的仿真中,

将对(4)式中的关键积分采用数值积分法进行计算。

### 3 含间隙或偏心的远场形态分析

为了分析间隙及掩模偏心对远场图样的影响,需要结合三个因素的共同作用,分别是不同的平移误差状态、不同的偏心状态和不同的间隙状态。实验中,仿真不同的平移误差状态,即 $k\delta$ 取 $0, \pi/11, 2\pi/11, 3\pi/11, 4\pi/11, 5\pi/11, 6\pi/11, 7\pi/11, 8\pi/11, 9\pi/11, 10\pi/11$ 等不同值时的远场光强分布;仿真不

同的偏心状态,即 $\Delta y_{\text{ratio}}$ 取 $0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ 等不同值时的远场光强分布;至于仿真不同的间隙状态,根据文献[11],卷边效应较显著的区域尺寸有时甚至与掩模子孔径在主镜面的投影尺寸相当,若使掩模子孔径的采样区避开卷边区域,有必要将 $g_{\text{ratio}}$ 取遍区间 $[0, 1]$ 内的值,此处 $g_{\text{ratio}}$ 取 $0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ 等不同值。图2所示既不存在间隙,掩模也不存在偏心时,对应不同平移误差状态下的掩模远场衍射图样,并将此作为后续共相测量的理想模板。

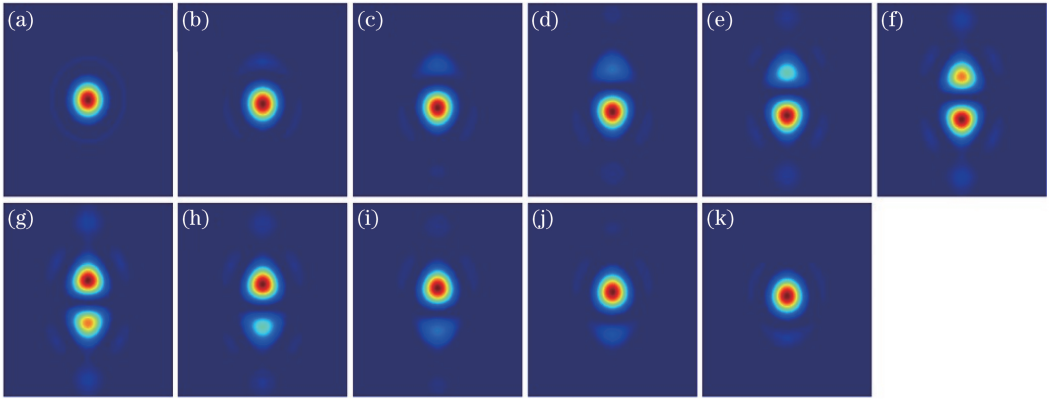


图2 不存在间隙及掩模偏心时不同平移误差对应的远场图样。(a)  $0$ ; (b)  $\pi/11$ ; (c)  $2\pi/11$ ; (d)  $3\pi/11$ ; (e)  $4\pi/11$ ; (f)  $5\pi/11$ ; (g)  $6\pi/11$ ; (h)  $7\pi/11$ ; (i)  $8\pi/11$ ; (j)  $9\pi/11$ ; (k)  $10\pi/11$

Fig. 2 Far field patterns without gap and mask decenter, corresponding to different piston errors. (a)  $0$ ; (b)  $\pi/11$ ; (c)  $2\pi/11$ ; (d)  $3\pi/11$ ; (e)  $4\pi/11$ ; (f)  $5\pi/11$ ; (g)  $6\pi/11$ ; (h)  $7\pi/11$ ; (i)  $8\pi/11$ ; (j)  $9\pi/11$ ; (k)  $10\pi/11$

#### 3.1 单一因素间隙的影响分析

图3所示为不存在掩模偏心时,由平移误差及间隙两个因素引起的远场变化。

从图3很容易发现,当间隙较小时,远场光斑的形态变化不大,远场中存在两个较明显的光斑,且随着平移误差的增大,呈现出一个光斑变强,另一个光斑变弱的趋势;当间隙较大时,远场光斑形态发生很大变化,远场中较明显的光斑将不止两个,间隙越大,明显光斑越多,但受平移误差调制的远场变化过程不变,上方及下方的光斑中,一方逐渐增强,另一方逐渐减弱。远场光斑呈现左右对称性,图4所示为 $k\delta$ 取 $6\pi/11$ ,  $g_{\text{ratio}}$ 取不同值时,各远场沿着竖轴的光强分布。从图4可以很清楚地看到,随着间隙的增大,将大量光能分散到其余极大值上,使得所有极大峰强度都不高,极大峰的对比度随之降低。

#### 3.2 单一因素掩模偏心的影响分析

无论正偏心或负偏心,只要偏心绝对值相等,那偏心对掩模远场衍射图样产生的影响是相同的。因此,仅分析正偏心的影响。图5所示为不存在间隙

时,由平移误差及掩模偏心两个因素导致的远场变化。

从图5可以看到,当掩模孔径偏心严重时,由掩模生成的远场光斑形态发生严重变化,甚至已经完全失去非偏心状态下亮斑强度随平移误差变化的动态趋势,这也导致采用模板法共相时,无法得到准确的平移误差值。

通过对上述两个因素的独立分析,可以得到间隙趋向于将能量分散到周围的极大峰上,偏心趋向于将分散的能量集中,甚至汇聚到一个明显亮斑。这两个因素的作用恰恰相反,因而需要确定一个恰当的公差容限,使得光斑形态的变化不至于对使用理想圆孔径模板的共相匹配过程产生过大的影响,以保证子镜共相过程可精确执行。

### 4 理想模板窄带共相容限分析

在KECK望远镜共相的窄带检测算法中,需要获取11组光程差间隔为 $\lambda/11$ 的掩模远场衍射图样,作为模板保存在模板库中。实际检测时,只



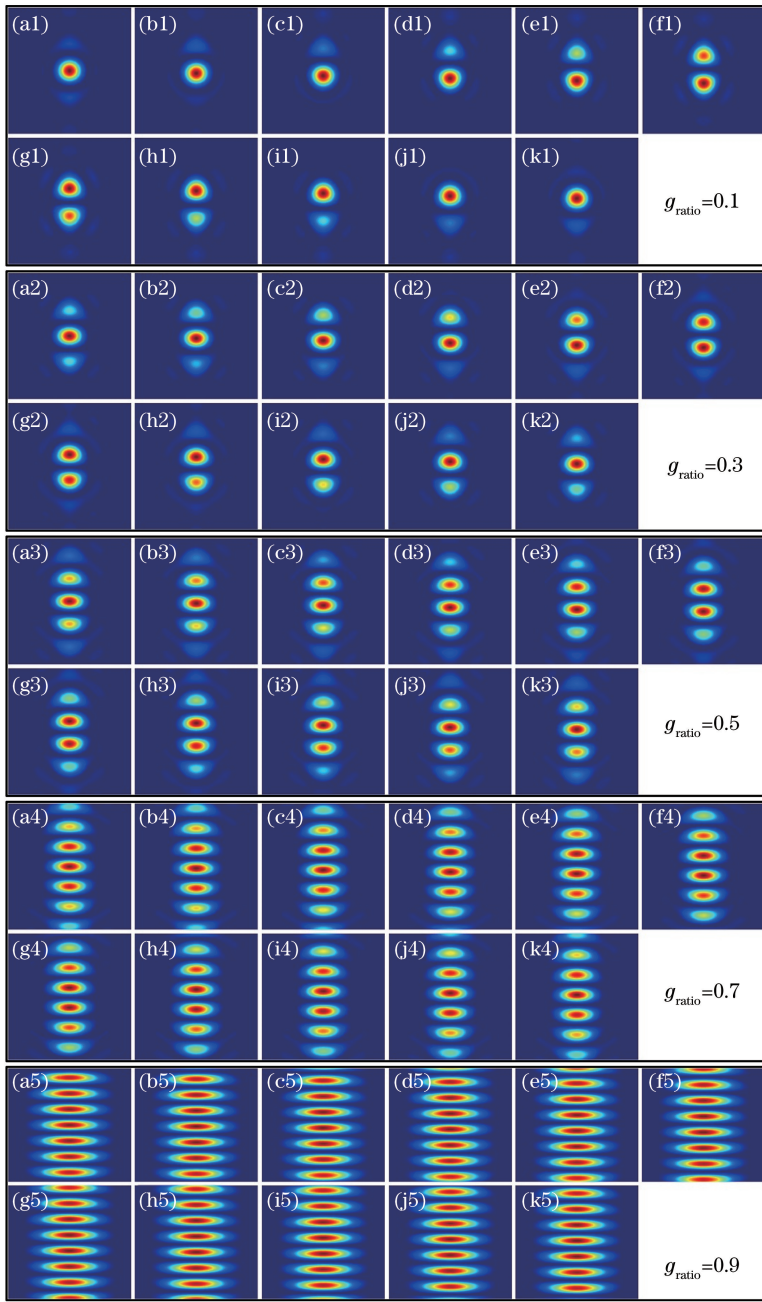


图3 无掩模偏心,不同平移误差及不同间隙下掩模的远场图样。 $k\delta$ 取(a) 0;(b)  $\pi/11$ ;(c)  $2\pi/11$ ;(d)  $3\pi/11$ ;(e)  $4\pi/11$ ;(f)  $5\pi/11$ ;(g)  $6\pi/11$ ;(h)  $7\pi/11$ ;(i)  $8\pi/11$ ;(j)  $9\pi/11$ ;(k)  $10\pi/11$

Fig. 3 Far field patterns from mask with different piston and gap, but without decenter.  $k\delta$  equals (a) 0; (b)  $\pi/11$ ; (c)  $2\pi/11$ ; (d)  $3\pi/11$ ; (e)  $4\pi/11$ ; (f)  $5\pi/11$ ; (g)  $6\pi/11$ ; (h)  $7\pi/11$ ; (i)  $8\pi/11$ ; (j)  $9\pi/11$ ; (k)  $10\pi/11$

需对星曝光一次,就可获得所有相邻子镜拼缝处的远场衍射图样。再将每个拼缝处的衍射图样与模板库中的远场衍射图样进行互相关运算,最大相关系数对应的模板相位就可作为被检测子镜间的相位误差。为了提高精度,还可对相关系数曲线进行二次拟合以便获得更准确的相位误差。由此可见,作为窄带检测的关键参数,相关系数直接决定了平移误差检测的准确性。采用的相关系数计算公式为<sup>[14]</sup>

$$R = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\sum_i x_i y_i - N \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{(\sum_i x_i^2 - N \bar{x}^2)(\sum_i y_i^2 - N \bar{y}^2)}}, \quad (9)$$

式中: $x_i, y_i$ 分别为作互相关运算的两个矩阵的元素; $\bar{x}, \bar{y}$ 分别为作互相关运算的两个矩阵的均值; $N$

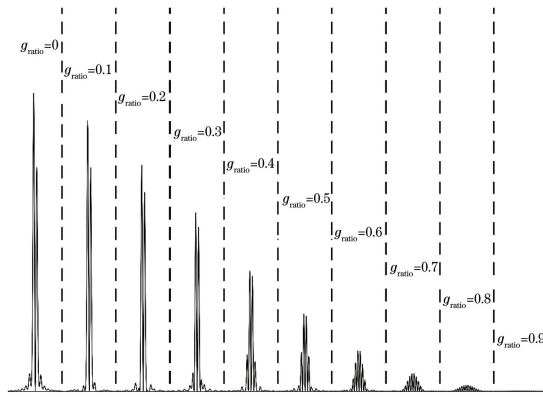


图 4  $k\delta = 6\pi/11$  时不同间隙下沿竖轴的光强分布情况

Fig. 4 Intensity distributions for different gaps in vertical direction when  $k\delta = 6\pi/11$

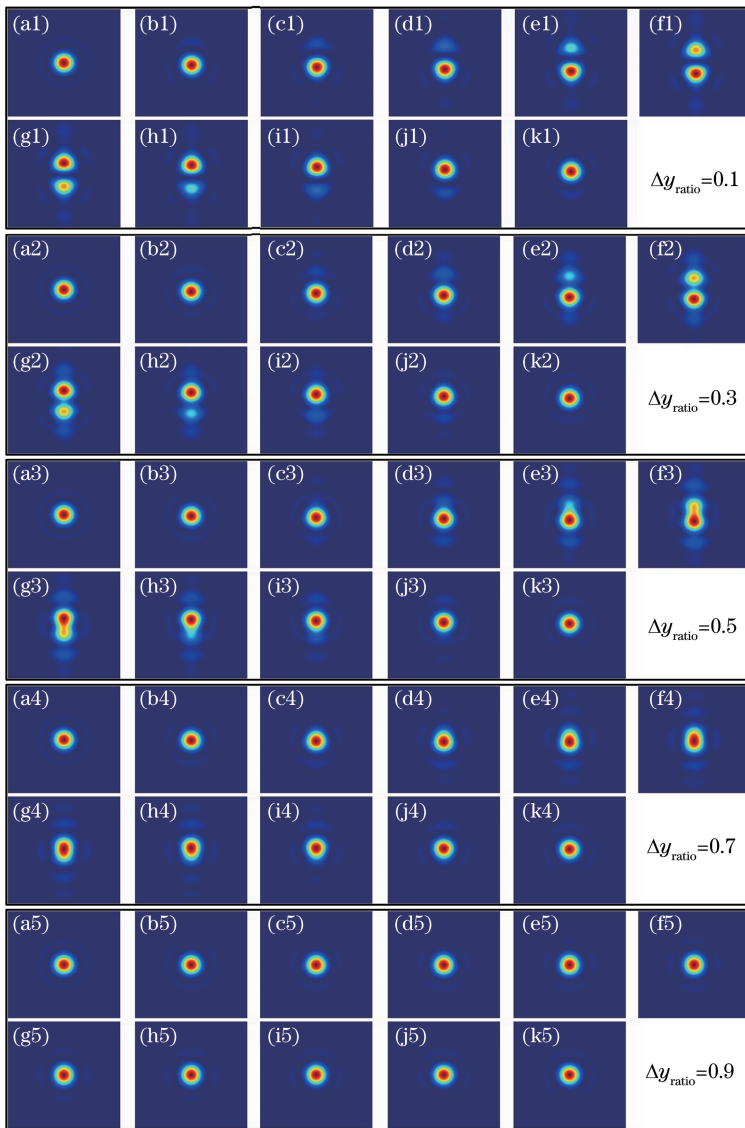


图 5 不存在间隙时,不同平移误差及掩模偏心下掩模的远场图样。 $k\delta$  取(a) 0;(b)  $\pi/11$ ;(c)  $2\pi/11$ ;  
(d)  $3\pi/11$ ;(e)  $4\pi/11$ ;(f)  $5\pi/11$ ;(g)  $6\pi/11$ ;(h)  $7\pi/11$ ;(i)  $8\pi/11$ ;(j)  $9\pi/11$ ;(k)  $10\pi/11$

Fig. 5 Far field patterns from mask with different piston and decenter, but without gap.  $k\delta$  equals (a) 0; (b)  $\pi/11$ ;  
(c)  $2\pi/11$ ; (d)  $3\pi/11$ ; (e)  $4\pi/11$ ; (f)  $5\pi/11$ ; (g)  $6\pi/11$ ; (h)  $7\pi/11$ ; (i)  $8\pi/11$ ; (j)  $9\pi/11$ ; (k)  $10\pi/11$

为矩阵中元素的个数。

图 6 所示为不存在间隙及掩模偏心时,模板库中模板间互相关系数变化情况。从图中很容易看到模板间互相关系数的对称性,即关于 45° 直线对称;且互相关系数均在 45° 直线上达到最大值,这表明无间隙及偏心时,模板能够准确地检测出对应的平移误差值。但是,当存在间隙或偏心时,若要使用理想圆孔径生成的模板库成功共相,也需满足相应的互相关系数在 45° 直线上达到最大值。接下来,将仿真使用理想圆孔径生成的模板库共相的过程,探索理想模板窄带共相的可行性及适用范围。

#### 4.1 关于单一因素间隙的分析

图 7 所示为存在不同大小的间隙时,掩模的远场图样与模板库中预存的模板间互相关系数的计算结果。

从图 7 可以得到三个结论:随着间隙增大,同一

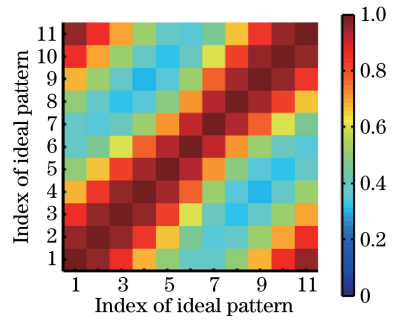


图 6 模板间的互相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients between templates

远场与无间隙及偏心的模板间的互相关系数范围急剧压缩,该现象可从图 8 明显看到;随着间隙逐渐增大,逐渐开始出现误匹配现象,该现象可从图 9 明显看到;当同一远场与无间隙及偏心的模板间的互相关系数动态范围较小时,模板法检测出现对噪声鲁棒性弱的问题。

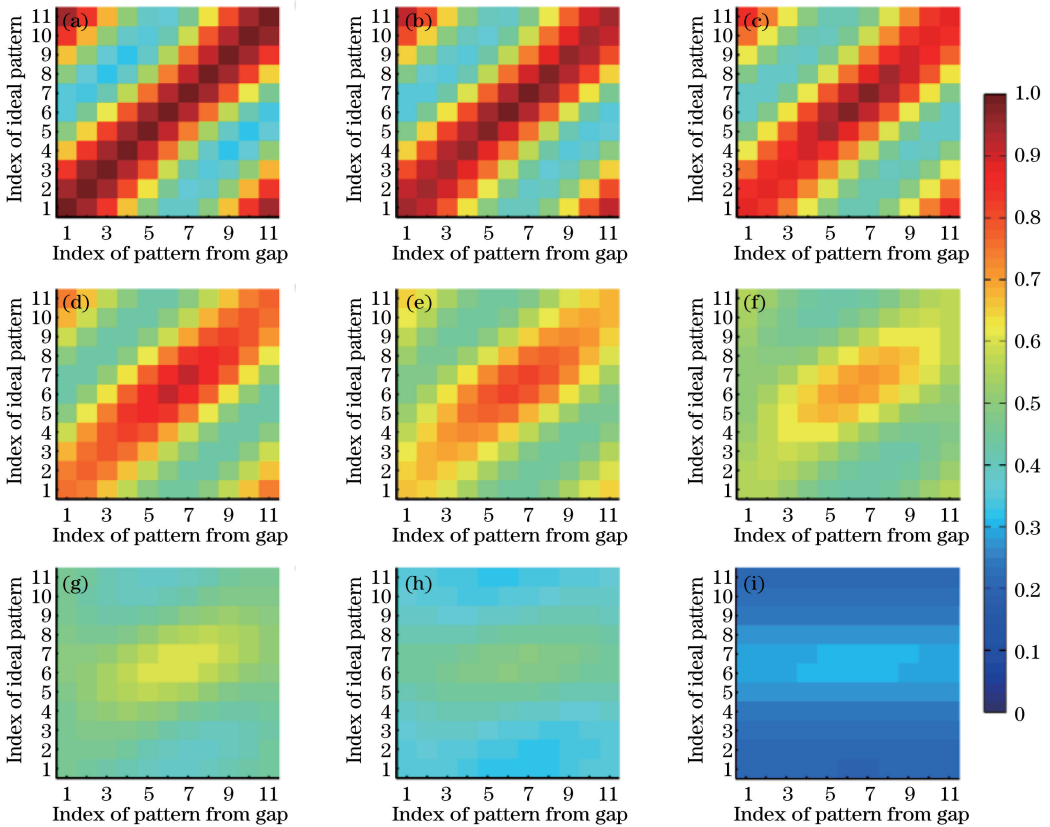


图 7 模板与不同间隙及平移误差下的掩模远场的互相关系数。 $g_{ratio}$  分别取 (a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.3; (d) 0.4; (e) 0.5; (f) 0.6; (g) 0.7; (h) 0.8; (i) 0.9

Fig. 7 Correlation coefficients between templates and far field patterns of mask with different gap and piston.

$g_{ratio}$  equals (a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.3; (d) 0.4; (e) 0.5; (f) 0.6; (g) 0.7; (h) 0.8; (i) 0.9

根据图 9 可以获得一个针对间隙的理想模板库可用的容限系数,即为了使得采用理想模板库能够准确共相, $g_{ratio}$  应不大于 0.3。

#### 4.2 关于单一因素偏心的分析

图 10 所示为存在不同大小的掩模偏心时,掩模的远场图样与模板库中预存的模板进行互相关计算

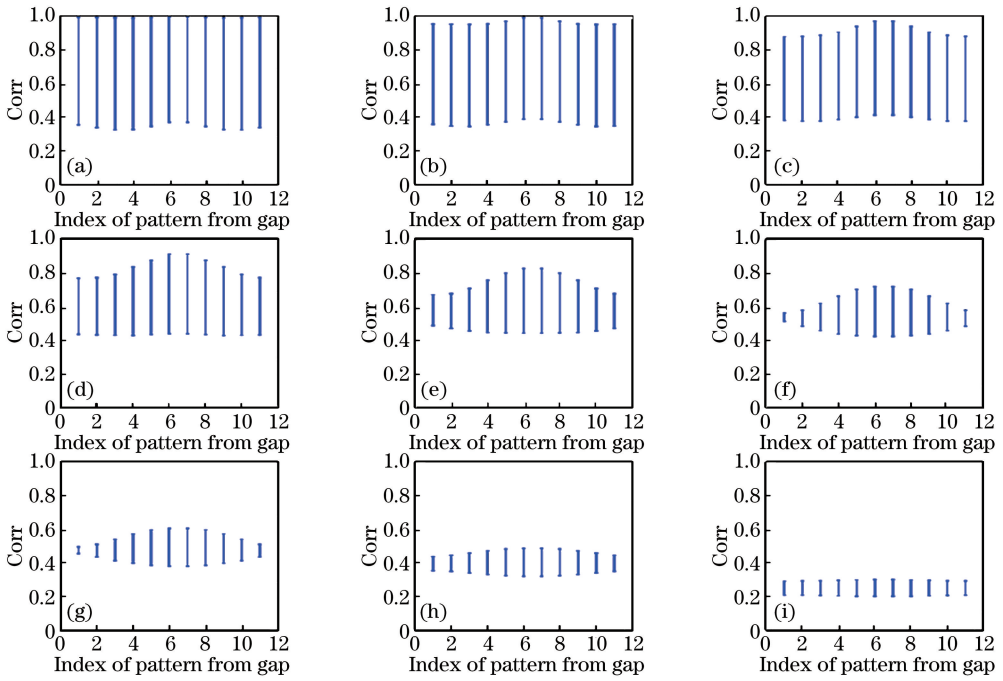


图 8 模板与不同间隙下的掩模远场的互相关系数范围。  $g_{ratio}$  分别取(a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.3; (d) 0.4; (e) 0.5; (f) 0.6; (g) 0.7; (h) 0.8; (i) 0.9

Fig. 8 Correlation coefficients between templates and far field patterns of mask with different gap.  $g_{ratio}$  equals (a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.3; (d) 0.4; (e) 0.5; (f) 0.6; (g) 0.7; (h) 0.8; (i) 0.9

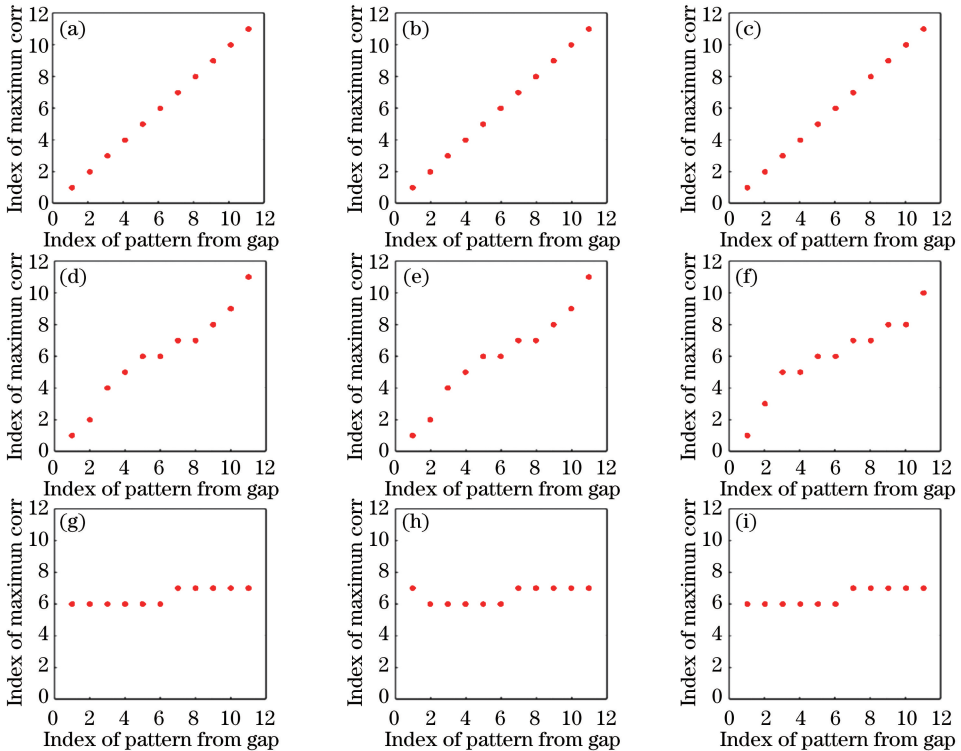


图 9 不同间隙下的掩模远场与模板匹配情况。  $g_{ratio}$  分别取(a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.3; (d) 0.4; (e) 0.5; (f) 0.6; (g) 0.7; (h) 0.8; (i) 0.9

Fig. 9 Matching results between templates and far field patterns of mask with different gap.  $g_{ratio}$  equals (a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.3; (d) 0.4; (e) 0.5; (f) 0.6; (g) 0.7; (h) 0.8; (i) 0.9



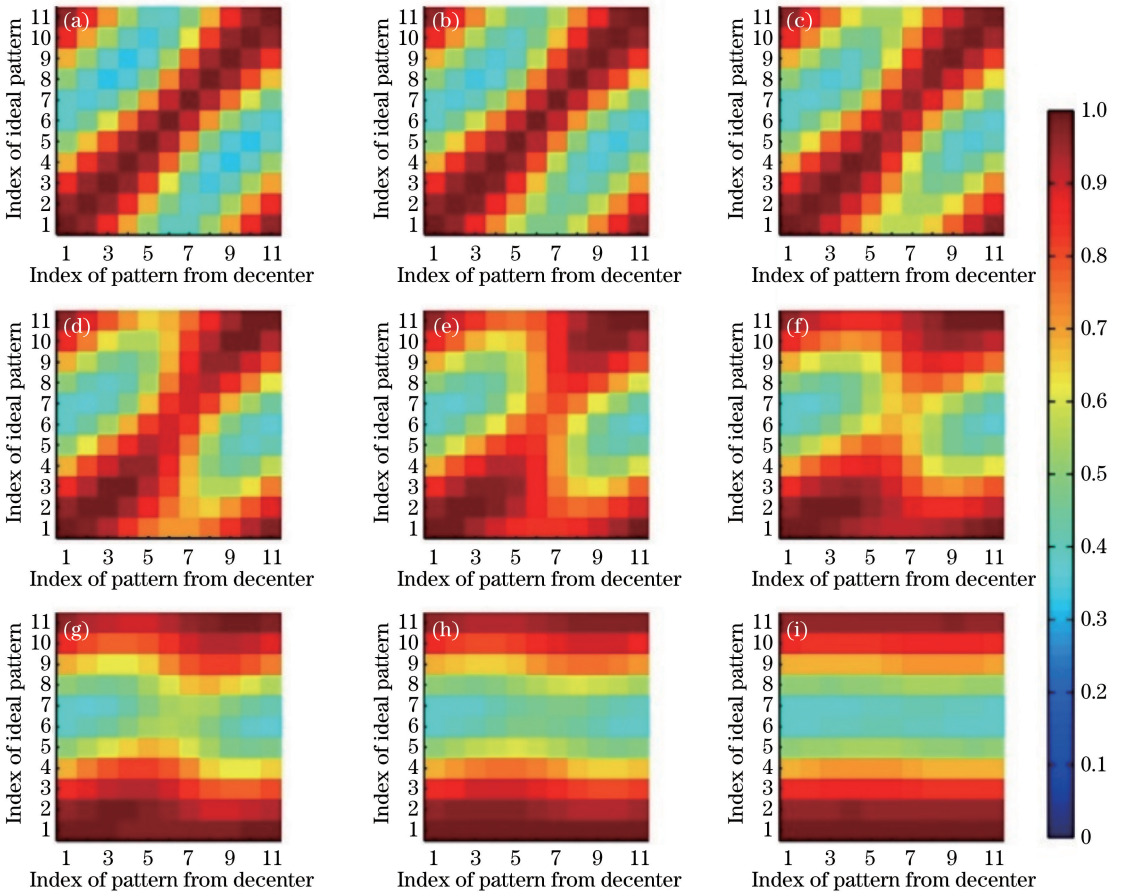


图 10 模板与不同偏心及平移误差下的掩模远场的互相关系数。 $\Delta y_{ratio}$ 取(a) 0.1;(b) 0.2;(c) 0.3;(d) 0.4;(e) 0.5;(f) 0.6;(g) 0.7;(h) 0.8;(i) 0.9

Fig. 10 Correlation coefficients between templates and far field patterns of mask with different decenter and piston.

$\Delta y_{ratio}$  equals (a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.3; (d) 0.4; (e) 0.5; (f) 0.6; (g) 0.7; (h) 0.8; (i) 0.9

的结果。

仅存在掩模偏心时,同一远场与无间隙及偏心的模板间的互相关系数范围并未出现强烈的类似间隙情形下的压缩现象,可从图 11 看到,但其误匹配现象很严重。特别当  $\Delta y_{ratio}$  的绝对值超过 0.8 时,出现全部误匹配,如图 12 所示。

根据图 12 可以获得一个针对掩模偏心的理想模板库可用的容限系数,即为了使得采用理想模板库能够准确共相, $\Delta y_{ratio}$  的绝对值应不大于 0.3。

## 5 结 论

使用拼接镜构造大口径望远镜是发展下一代巨型望远镜的前提,但伴随出现子镜的失调误差检测与校正的问题。模板法可实现子镜失调误差的有效检测,但其准确性与精度会受间隙及偏心的影响,在使用窄带共相算法时,需要定标间隙及

偏心,并修正模板库。通过数值仿真详细而全面地分析了间隙及偏心对掩模远场的影响方式,及采用理想模板检测平移误差的精度。结果表明,间隙倾向于将远场能量分散,以致间隙越大,远场能量越分散,远场的极大峰也越多,分布状态也变得越复杂;偏心倾向于将远场能量集中,以致偏心越大,远场能量越集中,远场中一侧极大峰变强,另一侧极大峰变弱的趋势也被削弱;若使理想模板库实现可靠共相,应该使得间隙因子  $g_{ratio} \leq 0.3$ , 偏心因子  $|\Delta y_{ratio}| \leq 0.3$ 。通过对间隙及偏心两个因素的分析发现,即便等效子孔径存在间隙或偏心,采用理想模板库仍可实现共相检测,从而省去了共相前的定标及修正模板库步骤,节省时间,简化操作。本文的分析为工程实践上采用理想模板库共相检测的宽间隙掩模子孔径设计及掩模板与拼接光瞳对准容差指标提供了理论依据。



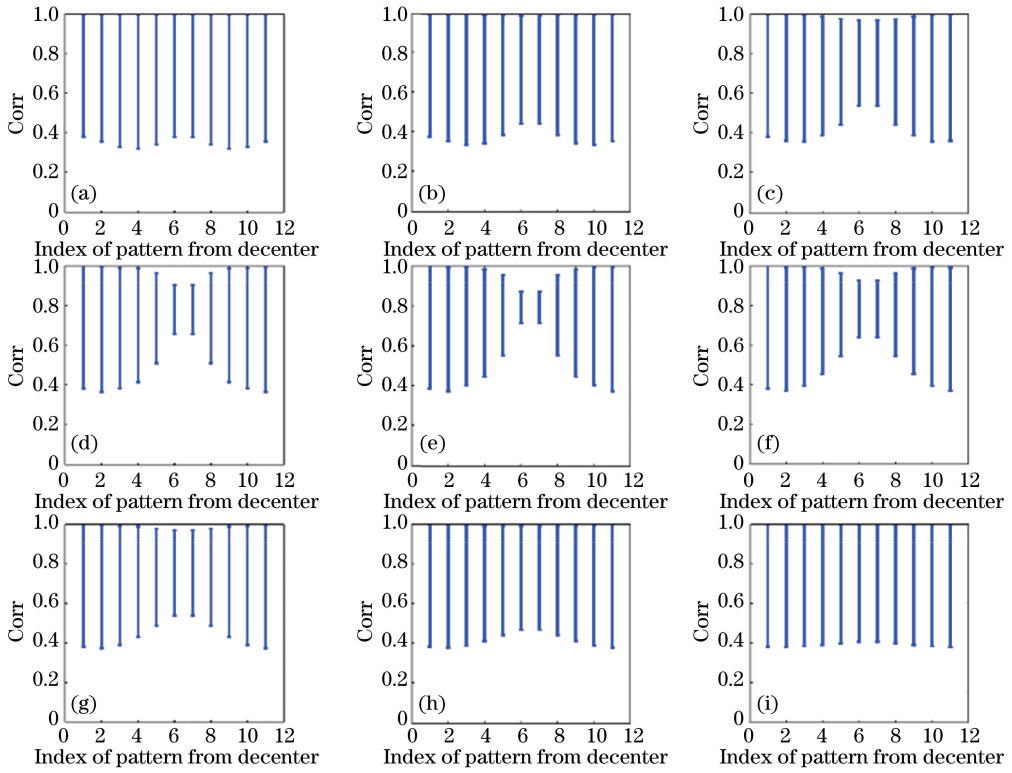


图 11 模板与不同偏心下的掩模远场的互相关系数范围。  $\Delta y_{\text{ratio}}$  分别取 (a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.3; (d) 0.4; (e) 0.5; (f) 0.6; (g) 0.7; (h) 0.8; (i) 0.9

Fig. 11 Correlation coefficients between templates and far field patterns of mask with different decenter.

$\Delta y_{\text{ratio}}$  equals (a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.3; (d) 0.4; (e) 0.5; (f) 0.6; (g) 0.7; (h) 0.8; (i) 0.9

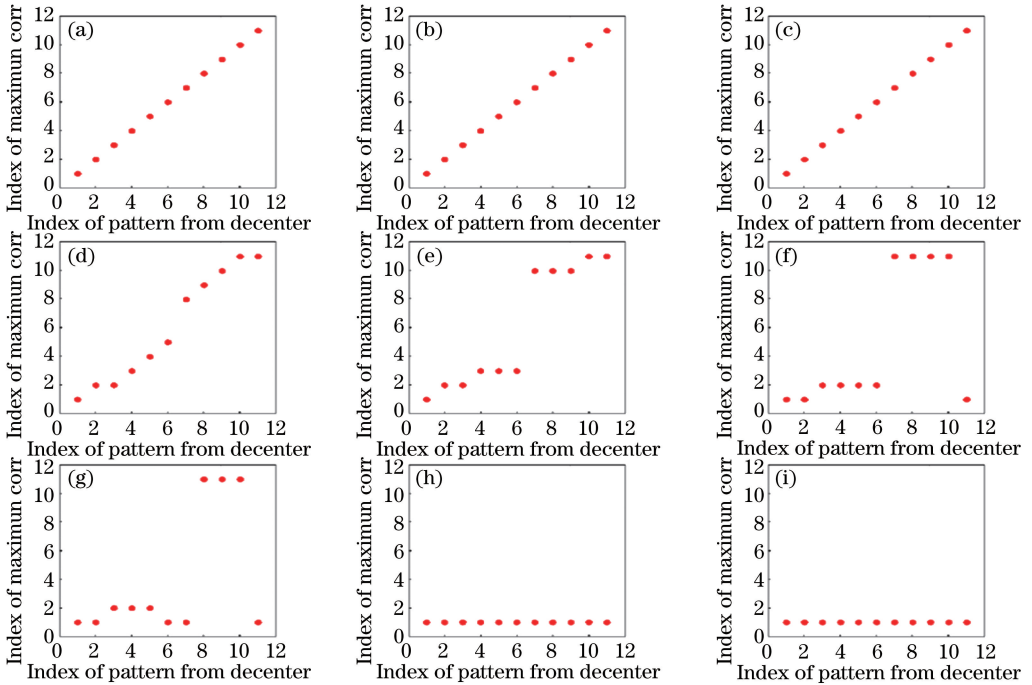


图 12 不同偏心下的掩模远场与模板匹配情况。  $\Delta y_{\text{ratio}}$  分别取 (a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.3; (d) 0.4; (e) 0.5; (f) 0.6; (g) 0.7; (h) 0.8; (i) 0.9

Fig. 12 Matching results between templates and far field patterns of mask with different decenter.  $\Delta y_{\text{ratio}}$  equals

(a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.3; (d) 0.4; (e) 0.5; (f) 0.6; (g) 0.7; (h) 0.8; (i) 0.9

## 参 考 文 献

- [1] Su D Q, Cui X Q. Active optics-key technology of the new generation telescopes [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.
- [2] Chanan G A, Nelson J E, Mast T S. Segment alignment for the keck telescope primary mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 1986, 628: 466-471.
- [3] Lefort B, Castro J. The GTC primary mirror control system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7019: 70190I.
- [4] Stobie R, Meiring J G, Buckley D A H. Design of the southern African large telescope (SALT) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4003: 355-362.
- [5] Cui X Q. Progress and prospect of LAMOST project [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6267: 626703.
- [6] Sedghi B, Müller M, Dimmler M. Analyzing the impact of vibrations on E-ELT primary segmented mirror [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9911: 991111.
- [7] Seo B J, Nissly C, Angeli G, et al. Investigation of primary mirror segment's residual errors for the Thirty Meter Telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7427: 74270F.
- [8] Perrin M D, Acton D S, Lajoie C P, et al. Preparing for JWST wavefront sensing and control operations [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9904: 99040F.
- [9] Bolcar M R, Balasubramanian K, Clampin M, et al. Technology development for the advanced technology large aperture space telescope (ATLAST) as a candidate large UV-optical-infrared (LUVOIR) surveyor [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9602: 960209.
- [10] 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.
- [11] Yaitskova N, Troy M. Rolled edges and phasing of segmented telescopes [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(4): 542-553.
- [12] Zheng B, Lu P F, Chen Y H, et al. Co-phase error detection of segmented mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1112002.  
郑彬, 陆培芬, 陈永和, 等. 拼接式反射镜共相误差检测 [J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1112002.
- [13] Lü N G. *Fourier optics* [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006.  
吕乃光. *傅里叶光学* [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [14] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. *Numerical recipes: the art of scientific computing* [M]. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2007: 745-748.