

相位差波前检测方法应用于平移误差检测的实验研究

罗群^{1)2)3)†} 黄林海²⁾³⁾ 顾乃庭²⁾³⁾ 李斐¹⁾²⁾³⁾ 饶长辉²⁾³⁾

1) (国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

2) (中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 成都 610209)

3) (中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

(2011年5月10日收到; 2011年6月20日收到修改稿)

相位差波前检测方法由于其结构简单, 对环境要求低, 测量精度较高等优点, 被应用于诸多领域. 本文针对拼接型天文望远镜中主镜的共相位检测问题, 对相位差波前检测方法在拼接主镜各子镜间平移误差测量进行理论分析, 并搭建了实验光路. 实验结果表明: 相位差波前检测方法对拼接镜平移误差的测量精度高于 $\lambda/20$ (λ 为波长), 满足系统对拼接平移误差的要求.

关键词: 相位差波前检测方法, 平移误差, 拼接型望远镜

PACS: 95.75.Qr, 42.68.Wt, 42.30.-d, 02.30.Zz

1 引言

望远镜的分辨率与主镜口径、观测波长、大气湍流强度等因素有关. 若忽略大气湍流等因素对成像的影响, 当观测光波长固定不变时, 望远镜的分辨能力则取决于主镜口径的大小, 口径越大其分辨率越高. 大口径望远镜主镜面在制作工艺、支撑结构、光学检测等方面都具有一定的困难, “拼接主镜”构想的提出, 为建造大口径望远镜开辟了一条新的途径. 1991年, 美国建成口径约为 10 m 的拼接型望远镜 Keck I, 其主镜由 36 块六边形子镜拼接而成, 在红外波段的成像质量接近衍射极限. 此后建造的大型天文望远镜大多采用了这种拼接主镜的结构, 如 Keck II, HET, SALT 等.

拼接型望远镜相对于传统望远镜而言具有质量轻巧、成本较低、制作工艺较简单等优点, 同时也带来了一些挑战, 其中最重要的便是各拼接子镜镜面的共相位检测问题. 在 Keck 望远镜系统中^[1,2], 研究人员认为拼接主镜中各个子镜之间的平移误差检测精度应高于 100 nm, 才可以确保拼接型望远镜系统达到与同口径单块主镜系统相当

的成像质量, 因此需尽可能地减小主镜的共相位误差. 为了实现拼接型望远镜中各子镜的共相位拼接, 国内外相继发展了多种共相位检测技术, 如夏克-哈特曼方法^[3]、曲率传感方法^[4]、金字塔传感器检测方法^[5,6]、干涉检测方法^[7]、相位差检测方法^[8-15]等. 相比较而言, 相位差波前检测方法的结构简单, 空间分辨率高, 适用于扩展目标, 可用于检测高阶像差以及非连续像差, 因此被广泛应用于诸多领域, 如复原模糊图像, 测量系统像差等. 1982年, Gonsalves^[8]首次提出在非点光源甚至是扩展目标的系统中将相位差技术应用于改善因像差引起的模糊图像. 1994年, Kendrick等^[12]通过实验验证了相位差检测方法用于检测拼接型望远镜系统的连续像差以及平移误差和倾斜误差这类非连续像差的可行性, 检测精度可达到 15 nm, 动态范围在一个波长以内. 2005年, Bolcar和Fienup^[13]在多孔径系统中采用相位差检测方法估计光瞳像差和目标图像, 通过数值模拟研究了非线性最优化算法的运算速度和收敛速度. 2008年, Mugnier等^[14]基于下一代拼接型望远镜的结构提出使用相位差波前方法检测准静态像差的可行性, 相位差波前检测方

† E-mail: littlepuppet_luo@sina.com

法所采集的图像为自适应光学系统校正后的长曝光图像.

拼接主镜的共相位误差中,子镜之间的相对上下位移平移误差对望远镜的成像质量影响较大,检测难度也较大,国外的研究工作表明采用相位差方法检测平移误差能够达到纳米级的测量精度.然而,拼接型主镜的结构复杂,在实验室中模拟产生真实无缝拼接的平移误差难度较大,因此目前国内尚未广泛开展这方面的实验研究.本文的验证实验中提出采用液晶空间光相位调制器(LC-SLM)模拟产生平移误差,搭建了一套利用相位差波前检测方法检测两块子镜之间平移误差的实验系统.实验结果表明:相位差波前检测方法对平移误差的检测范围为 $-\lambda/2-\lambda/2$,检测精度优于 $\lambda/20$ (λ 为波长),满足拼接型主镜的共相位检测精度要求,初步验证了将相位差波前检测方法应用于拼接型望远镜平移误差检测的可行性.

2 基本原理

相位差波前检测方法的光路如图 1 所示.

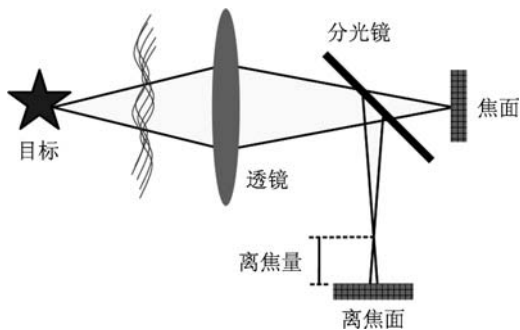


图 1 光路示意图

相位差波前检测方法根据两幅或多幅光强图像复原波前信息,通常情况下采用两幅光强图像复原待测波前,第一幅光强图像位于光学系统焦平面处,另一幅光强图像位于离焦距离已知的离焦面.

由傅里叶光学原理可知,系统的脉冲响应函数为广义光瞳函数的傅里叶变换^[16],如(1)式所示:

$$h(\mathbf{w}) = \mathfrak{F} \{p(\mathbf{r}) [\exp i\varphi(\mathbf{r})]\}, \quad (1)$$

其中 \mathbf{r} 为像面坐标, \mathbf{w} 为物平面坐标, h 为脉冲响应函数, p 为光瞳处振幅分布函数, φ 为光瞳处相位分布函数, $\mathfrak{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换.当物为理想点光源

时,成像系统焦平面的复振幅分布等于脉冲响应函数,焦面光强分布如下:

$$I(\mathbf{w}) = |h(\mathbf{w})|^2. \quad (2)$$

已知离焦距离的像面上的复振幅分布为

$$h_d(\mathbf{w}) = \mathfrak{F} \{p(\mathbf{r}) \exp \{i[\varphi(\mathbf{r}) + \phi_d(\mathbf{r})]\}\}, \quad (3)$$

其中下标 d 表示离焦面, $\phi_d(\mathbf{r})$ 表示已知离焦量所引入的离焦像差.离焦面的光强分布如下所示:

$$I_d(\mathbf{w}) = |h_d(\mathbf{w})|^2. \quad (4)$$

在实际系统中,可以通过控制离焦位移量的大小来控制离焦像差的大小,也可以通过增加离焦相位屏等方式实现离焦面上的光强分布测量.离焦像差大小与离焦位移量之间的关系如下式所示:

$$\phi_d(\mathbf{r}) = -\frac{k}{2} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{f+d} \right) \times \mathbf{r}^2 \approx -\frac{kd}{2f^2} \mathbf{r}^2, \quad (5)$$

式中 k 为波矢, f 为成像系统焦距, d 为相应的离焦量.

在本文的实验中,首先将 CCD 探测器光敏面调节至成像透镜的焦平面处,然后保持 CCD 探测器位置不变,在 LC-SLM 上叠加离焦像差,采集离焦面光强分布图像.

本文采用的算法是利用一幅焦面图像和一幅离焦面图像复原光瞳处的待测波前,算法流程如图 2 所示.图中 FT 和 I-FT 分别表示傅里叶变换以及傅里叶逆变换; $I(\mathbf{w})$ 和 $I_d(\mathbf{w})$ 分别表示 CCD 探测器拍摄得到的焦面和离焦面的光强分布; $p(\mathbf{r})$ 表示光瞳面振幅分布,为已知量; $\varphi_d(\mathbf{r})$ 为已知离焦量在光瞳面上所对应的离焦像差.算法迭代从左上方出发,当 $k=1$ 时,相位分布选用初始值 $\varphi_0(\mathbf{r})$,通常可设为零或随机分布值.流程图详细描述了算法的第 k 次迭代过程,其中 $\varphi^k(\mathbf{r})$ 为第 k 次迭代的相位分布, $|U^k(\mathbf{w})|$ 和 $\Phi^k(\mathbf{w})$, $|U_d^k(\mathbf{w})|$ 和 $\Phi_d^k(\mathbf{w})$ 分别表示经傅里叶变换后焦面、离焦面光场的振幅分布和相位分布, $q^k(\mathbf{r})$, $q_d^{k+1}(\mathbf{r})$, $\varphi^k(\mathbf{r})$ 和 $\varphi^{k+1}(\mathbf{r})$ 分别表示基于焦面和离焦面光强分布函数进行傅里叶逆变换得到的光瞳面的振幅分布和相位分布.迭代算法跳出的判断依据为傅里叶变换得到的像面光强分布与实测光强分布之差,若两者之差 E 小于预先设定的阈值 M ,则迭代停止, $\varphi^{k+1}(\mathbf{r})$ 即为待测像差.

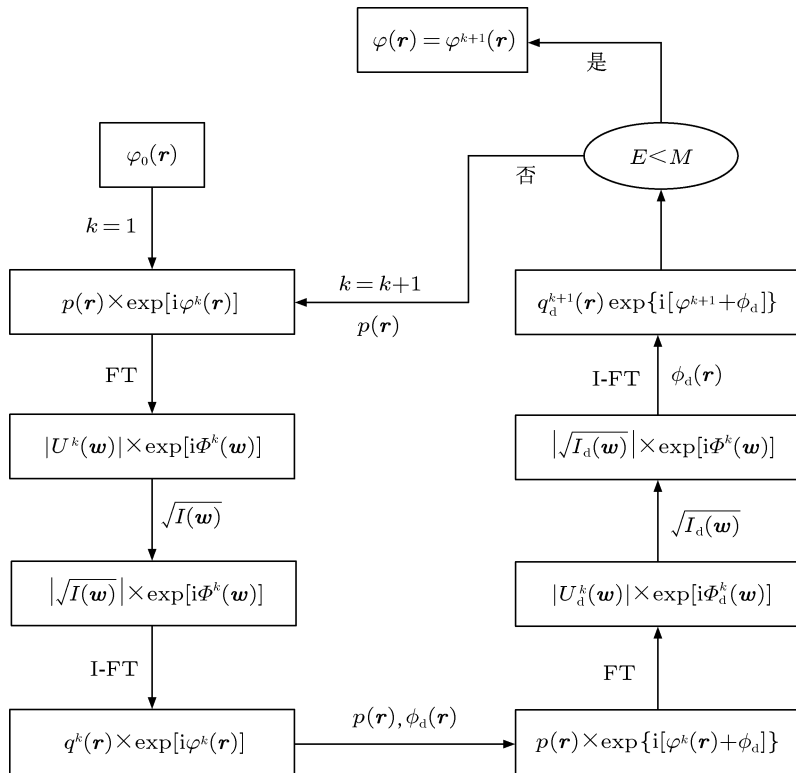


图2 算法流程图

3 实验系统和结果

3.1 实验系统描述

实验光路如图 3 所示。实验使用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器作为光源，光阑直径为 4.6 mm，光瞳面离散矩阵大小为 256×256，圆形光阑在光瞳面矩阵中对应的采样点为 77×77。CCD 型号 Cascade 650，靶面像元尺寸为 7.4 μm×7.4 μm，焦面图像、离焦面像素个数为 256×256。透镜 L1, L2, L3 的焦距均为 200 mm，CCD 前方成像透镜 L4 的焦距为 180 mm。

由于不同 LC-SLM 在结构上的差异，相应的相位调制特性也不相同，因此在使用 LC-SLM 产生待测平移误差之前必须对 LC-SLM 的响应曲线进行测量和标定。测量 LC-SLM 相位调制特性的方法有许多种，如功率计探测法、双缝干涉法、迈克耳孙干涉法等。本实验采用 Twyman-Green 干涉仪进行相位调制特性测量^[17]，根据干涉条纹的移动量分析得到 LC-SLM 的相移量与驱动电压的关系。根据响应曲线的标定结果通过使用拟合多项式得到控制灰度图，从而驱动 LC-SLM 产生实验所需的待测波前。

在平移误差检测实验中，在一个波长的动态

范围以内，由 LC-SLM 分别产生一系列大小不等的波前平移量，LC-SLM 上叠加的离焦像差的均方根 (RMS) 值为 0.25λ，使用 CCD 探测器拍摄得到焦面和离焦面光强分布图像，进行波前复原，根据复原的结果计算得到波前平移量的具体数值。

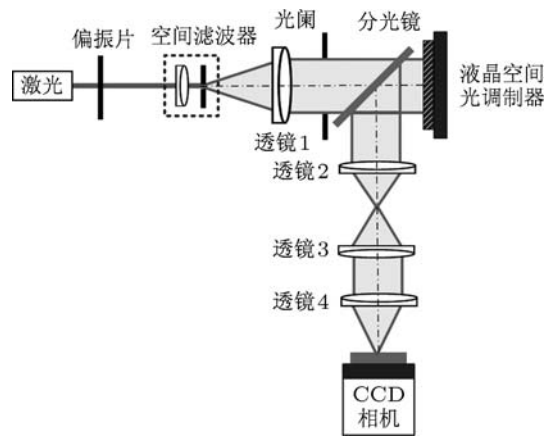


图3 实验光路示意图 SF 为空间滤波器；L1—L4 为透镜；BS 为 50/50 非偏振分光片；LC-SLM 为液晶空间光调制器

3.2 检测结果

由于光路中采用的光阑为圆形，在实验中使用 LC-SLM 生成半圆形台阶，波前平移量 $p_0 \in$

$(-0.5\lambda, 0.5\lambda)$. 当 p_0 为 0.3λ 时, 采用复原得到的波前平移量 p 为 0.2976λ , 与 LC-SLM 加载的平移量的误差 Δp 为 $2.4 \times 10^{-3}\lambda$, 相对误差为 0.8%. 实际测量的实验数据以及相应的计算结果如图 4 所示. 其中图 4(a) 为 LC-SLM 上所加载了波前平移量的液晶面形示意图; 在透镜的焦平面拍摄到的远场光斑图像以及当液晶增加一定量离焦后的离焦光斑图像分别如图 4(b) 和 (c) 所示. 根据文中算法, 并利用图 4(b) 和 (c) 的测量结果复原出的相位分布如

图 4(d) 所示. 由于液晶空间光调制器工作在纯相位调制状态, 因此, 实验计算的波前相位分布就是液晶加载的初始面形, 将二者对减后的残余波前 $\Delta\phi$ 如图 4(e) 所示, 其 RMS 值大小为 $2.07 \times 10^{-2}\lambda$.

LC-SLM 上所加载波前平移量 p_0 , 采用相位差波前检测方法复原得到的波前平移量 p , 二者之间的误差 Δp , 以及残余波前 $\Delta\phi$ 的 RMS 值如图 5 所示.

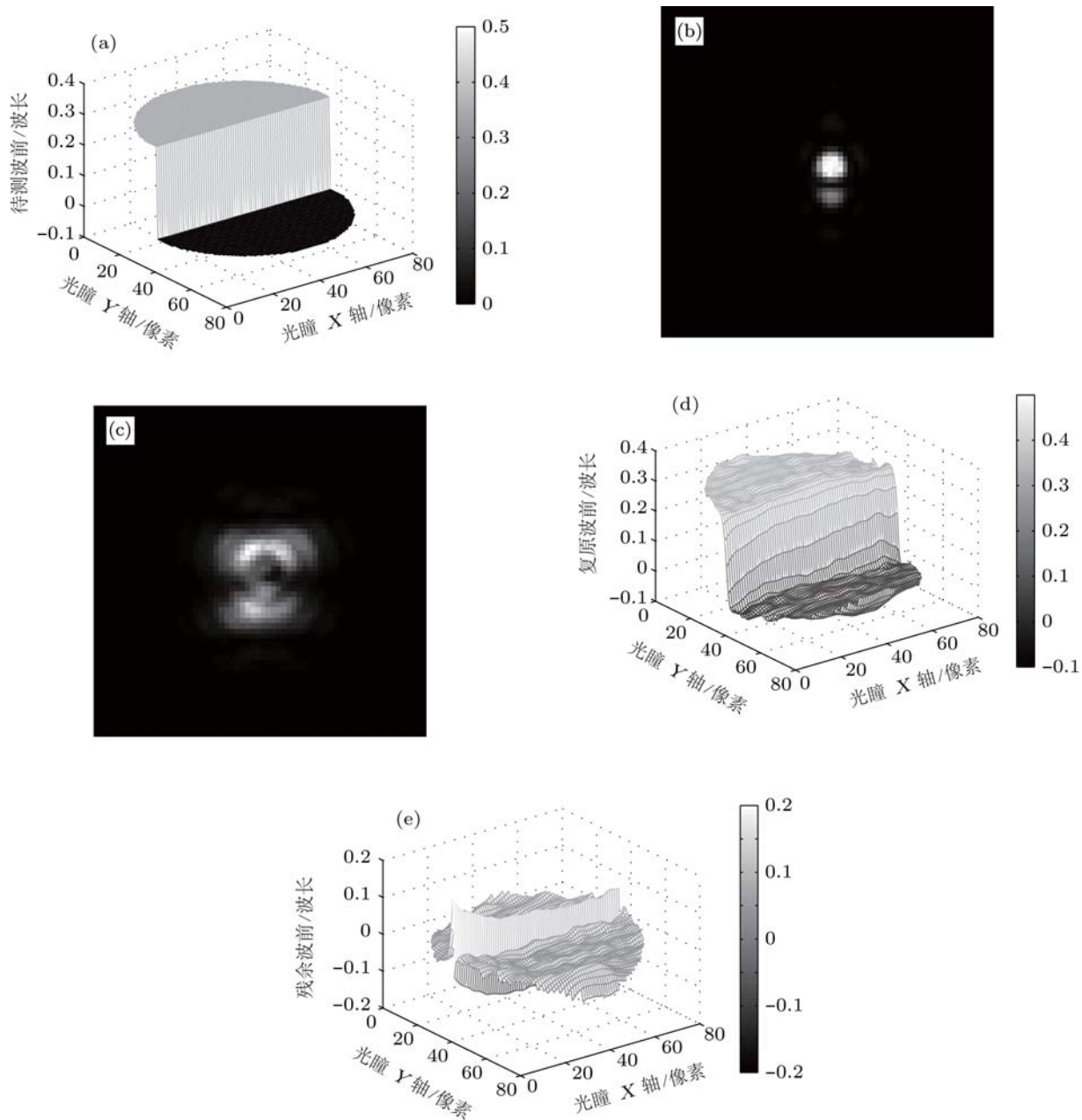


图 4 圆形口径平移误差检测结果 (a) LC-SLM 上加载的波前, 台阶对应的平移量为 $p_0 = 0.3\lambda$; (b) 焦面光强分布; (c) 离焦面光强分布; (d) 复原的波前, 台阶对应的平移量 $p = 0.2976\lambda$; (e) 残余波前 $\Delta\phi$, RMS = $2.07 \times 10^{-2}\lambda$

针对 Keck 望远镜系统共相位检测的研究表明, 当拼接主镜中各个子镜之间的平移误差检测精度高于几分之一甚至十分之一波长时, 拼接型主镜即可达到与相同口径单镜面主镜系统相当的成像质量. 根据图 4 和 5 的实验结果可知, 相位差波前探测器的对平移误差的复原结果与 LC-SLM 上所加载的波前平移量大小比较接近, 复原精度优于 $\lambda/20$. 此实验结果表明, 相位差波前检测方法对平移误差的检测精度能够满足拼接型望远镜系统共相位误差的检测精度要求. 此外, 由于相位差波前测量方法的光路结构简单, 对环境要求不高, 且便于安装和携带, 特别适合大口径拼接型望远镜的主镜共相位检测.

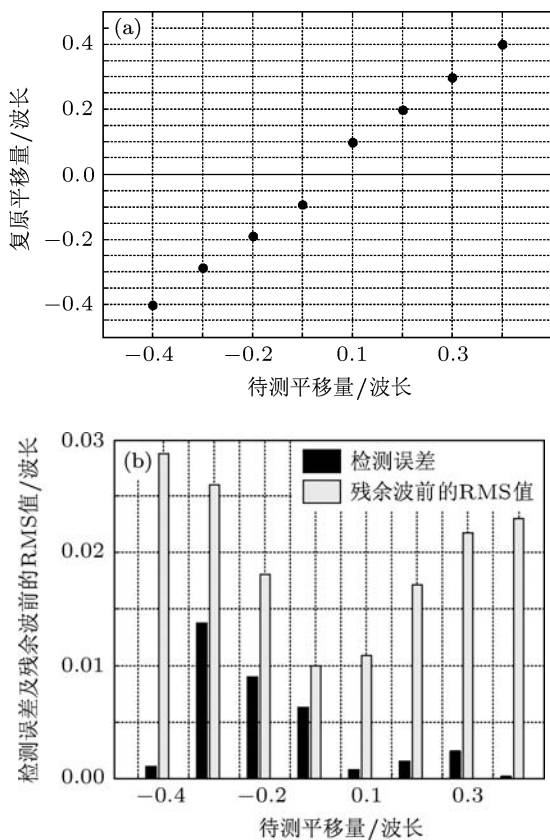


图5 平移误差检测结果

4 误差分析

平移误差的外形类似于一个台阶, 为典型的非连续像差, 频谱范围较大, 在复原结果中高频成分损失较为严重, 导致检测精度降低, 复原像差在口径边缘处以及台阶处有一定坡度, 与原始面型有一定差异. 导致平移误差复原精度降低的主要因素包

括系统像差、杂散光、采样率和 CCD 传感器读出噪声等.

在实验中, 光学系统自身的像差会叠加于待测平移误差之上, 实验所采集的光强图像实际上是平移量与系统像差叠加后的畸变波前的光强分布图像, 使得平移量的检测结果不准确. 系统像差主要源于元件加工误差, 器件变形、光学镜片的表面粗糙度等因素, 这类像差依靠光学设计的手段是无法完全校正的. 此外, 相位差波前检测方法需要采集焦面光强图像用于复原待测平移量, 通常要求 CCD 探测器的光敏面严格位于成像透镜的焦平面处, 而在实际检测中, 若 CCD 光敏面与成像透镜的焦平面存在一个偏离误差, 就相当于给待测平移误差引入了一个离焦像差. 因此, 在进行平移量的检测之前, 需利用相位差波前检测方法测量出系统误差和 CCD 探测器位置摆放引入的离焦像差, 在波前复原结果中加以校正, 从而得到待测平移误差的大小.

相位差波前检测方法需根据焦面和离焦面光强分布图像来复原待测波前, 当远场光斑的较高级衍射斑光强较弱, 能量分散时, CCD 探测器的噪声将淹没一部分高阶衍射斑的光强分布信息, 从而导致复原波前中高频信息丢失、检测精度降低. 下文将通过数值模拟的方法针对 CCD 读出噪声对复原精度的影响进行分析. 为了更具有对比性, 模拟中我们采用与实验中相同的系统参数, 即波前平移量大小为 0.3λ , 离焦像差 RMS 值为 0.25λ . 将 CCD 探测器读出噪声均值与光强峰值之比记为 β , 噪声方差与峰值光强之比记为 γ , 根据 β 和 γ 值衡量噪声强度. 文中分析对比了无读出噪声以及不同噪声强度下, 复原的波前平移量及其残余波前. CCD 探测器的噪声强度 (β, γ) 和残余波前 $\Delta\varphi$ 的 RMS 误差 (记为: RMS-E) 如表 1 所示.

表1 CCD 探测器的读出噪声强度 (β, γ) 和残余波前 $\Delta\varphi$ 的 RMS-E

β	γ	$\Delta\varphi$: RMS-E λ
0	0	2.57×10^{-11}
1/500	1/1000	1.31×10^{-3}
1/50	1/100	2.97×10^{-2}
1/25	1/50	3.54×10^{-2}

CCD 探测器无读出噪声, 以及读出噪声 $\beta = 1/50, \gamma = 1/100$ 时, 波前平移量的复原波前、残余波前如图 6 所示, 其中 (a) 和 (c) 为复原的波前平移量, (b) 和 (d) 为相应的残余波前

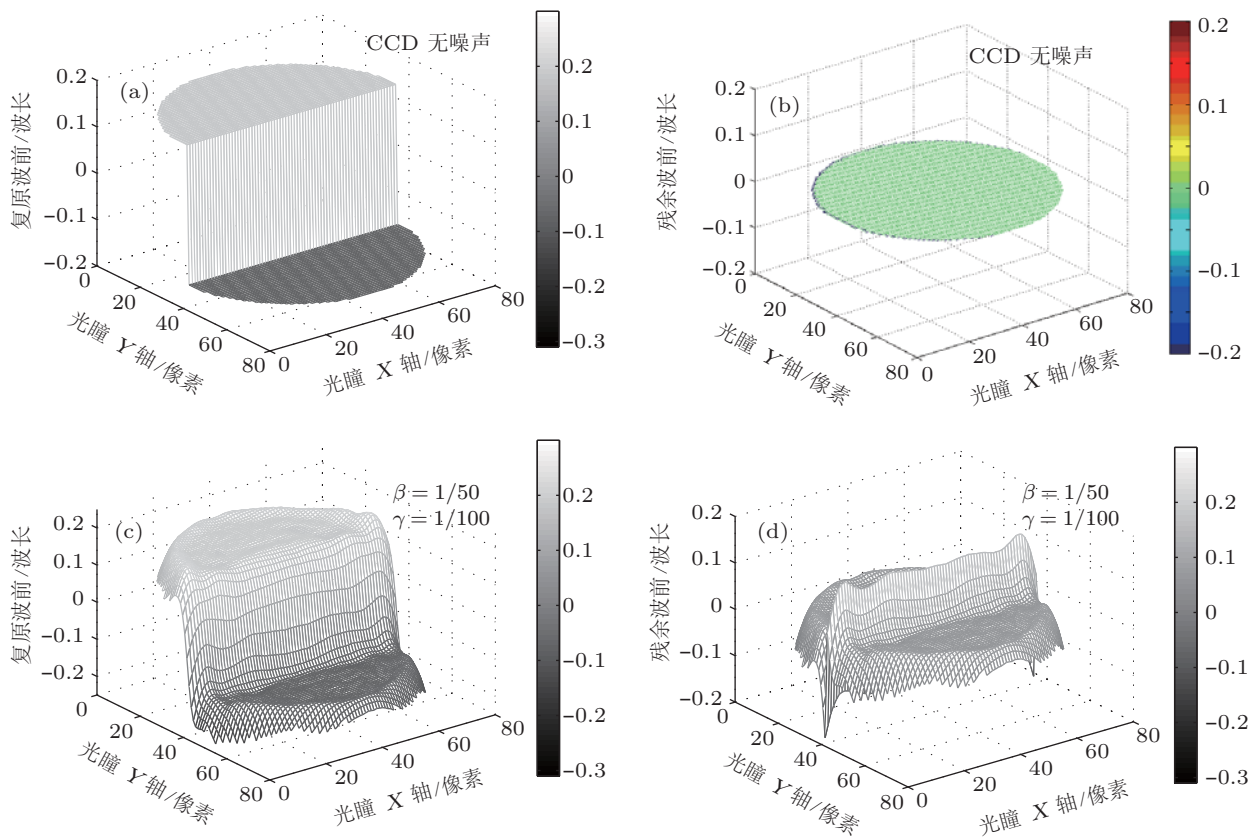


图6 不同噪声强度下, 平移误差复原结果 (a) 复原的平移波前; (b) 残余波前, $\Delta\varphi$ RMS = $2.57 \times 10^{-11}\lambda$; (c) 复原的平移波前; (d) 残余波前, $\Delta\varphi$: RMS = $2.97 \times 10^{-2}\lambda$

由上述内容可知, CCD 读出噪声将导致平移误差的阶梯形状在复原结果中出现平滑, 检测精度降低, 且残余波前随 CCD 读出噪声的增强而增大。

5 讨论

两相邻子镜在接缝处的平移量为 δ , 由于 2π 模糊问题, 当波长为 λ 的单色点光源进行测量时, 测量结果 $p \in (-0.5\lambda, 0.5\lambda)$. 如果平移量 δ 超过 $\pm 0.25\lambda$, 采用单色光源将无法检测, 此时可采用双波长、多波长或宽光谱光源进行检测. 下文的讨论中采用双波长方法进行大动态范围拼接平移量的检测算法。

当单色点光源的波长为 λ_1 时, 测量结果为 p_1 , 检测结果与实际平移量的数值关系如下:

$$\delta = (p_1 + n_1\lambda_1)/2, \quad (6)$$

其中 n_1 为整数, $n_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. 同理, 当单色点光源的波长为 λ_2 , 有

$$\delta = (p_2 + n_2\lambda_2)/2, \quad (7)$$

其中 p_2 是波前检测结果, n_2 为整数, $n_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$.

由 (6) 和 (7) 式有

$$\Delta p = p_1 - p_2 = n_2\lambda_2 - n_1\lambda_1. \quad (8)$$

由于波长 λ_1 和 λ_2 为已知量, 令 $c = \lambda_2/\lambda_1$. 在选择 λ_1 和 λ_2 时, 假设 c 满足

$$1 < c < 1.5, \quad (9)$$

必定存在一个整数 N 满足

$$(N+1)/N \leq c \leq N/(N-1). \quad (10)$$

根据 (8) 和 (10) 式, 利用 χ^2 极小化方法, 可求得 n_1 和 n_2 的整数解, 根据 (6) 或 (7) 式, 就可以计算出待测平移量 δ . 拼接镜相邻子镜之间的平移量检测的动态范围扩展为

$$\begin{cases} -N\lambda_1/4 < \delta < N\lambda_1/4 & N \in \text{odd}, \\ -(N-1)\lambda_2/4 < \delta < (N-1)\lambda_2/4 & N \in \text{even}. \end{cases} \quad (11)$$

当 Δp 较小时, 根据以上几个表达式的限制计算出来的 n_1 和 n_2 值是准确的, 而当 Δp 比较大时, 计算出来的 n_1 和 n_2 未必能够保证准确性。

1999年, Chanan 等^[2] 在 Keck 望远镜系统上进行了双波长窄带算法的验证实验. 实验中采用了两

个单波长光束, 波长 λ_1 和 λ_2 分别为 651 和 852 nm, 实验结果表明平移量的动态范围扩展至 $(-0.75\lambda_2, 0.75\lambda_2)$, 大于单波长测量时的 $(-0.25\lambda_2, 0.25\lambda_2)$. 以上实验结果是基于修正型夏克 - 哈特曼传感器的检测结果计算得到的, 我们将在以后的工作中将双波长检测方法以及宽带光源检测方法应用于相位差波前检测方法中, 以此扩展平移误差检测的动态范围.

6 结论

通过实验验证了将相位差波前检测方法用于拼接系统平移误差检测的可行性. 实验使用单色点光源作为成像目标, 采用 LC-SLM 产生待测

平移误差, 将 CCD 探测器靶面放置于焦面处, 采集焦面光强分布图像. 在 LC-SLM 上叠加离焦像差, 从而获得离焦面光强分布. 实验检测了不同大小的平移误差, 实验结果表明, 相位差波前检测技术对平移误差的检测精度可达到 $\lambda/20$, 这一检测精度满足拼接型望远镜系统的共相位精度要求. 由于系统像差、杂散光、采样率和 CCD 传感器读出噪声等因素的影响, 将相位差波前检测方法用于平移误差检测时, 其复原波前的形状及检测精度存在不足之处, 后续工作将针对波前复原算法进行改进, 以求提高平移误差的检测精度; 也将开展双波长或宽带光源的检测工作, 以此来扩展平移误差检测的动态范围.

-
- [1] Chanan G A, Troy M, Dekens F, Michaels S, Nelson J, Mast T, Kirkman D 1998 *Appl. Opt.* **37** 140
- [2] Chanan G, Ohara C, Troy M 2000 *Appl. Opt.* **39** 4706
- [3] Chanan G, Troy M, Sirko E 1999 *Appl. Opt.* **38** 704
- [4] Roddier F 1988 *Appl. Opt.* **27** 1223
- [5] Esposito S, Pinna E 2003 *Proc. SPIE* **5169** 72
- [6] Wang J X, Bai F Z, Ning Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 029501 (in Chinese) [王建新, 白福忠, 宁禹 2011 物理学报 **60** 029501]
- [7] Herbert W K 1991 *Analysis of Optical Structures* San Diego, US, July 23–24 1991
- [8] Gonsalves R 1982 *Opt. Eng.* **2** 829
- [9] Gonsalves R, Chidlaw R 1979 *Proc. SPIE* **207** 32
- [10] Paxman R G, Fienup J R 1988 *J. Opt. Soc. A* **5** 914
- [11] Luo L, Wang L, Cheng W D, Shen M Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6708 (in Chinese) [罗林, 王黎, 程卫东, 沈忙作 2006 物理学报 **55** 6708]
- [12] Kendrick R L, Acton D S, Duncan A L 1994 *Appl. Opt.* **33** 6533
- [13] Bolcar M R, Fienup J R 2005 *Proc. SPIE* **5896-14** 126
- [14] Mugnier L M, Sauvage J F, Fusco T, Cornia A, Dandy S 2008 *Opt. Express* **22** 18406
- [15] Blanchard P M, Fisher D J, Wood S C, Greenaway A H 2000 *Appl. Opt.* **39** 6649
- [16] Joseph W G (Translated by Qing K C *et al*) 2006 *Introduction to Fourier Optics* (Beijing: Electronics Industry Press) pp114–150 (in Chinese) [Joseph W G 著 (秦克诚等人译) 2006 《傅里叶光学导论》(北京: 电子工业出版社) 第 114—第 150 页]
- [17] Cai D M, Ling N, Jiang W H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 897 (in Chinese) [蔡冬梅, 凌宁, 姜文汉 2008 物理学报 **57** 897]

Experimental study on phase diversity wavefront sensing technology in piston error detection

Luo Qun^{1)2)3)†} Huang Lin-Hai²⁾³⁾ Gu Nai-Ting²⁾³⁾
Li Fei¹⁾²⁾³⁾ Rao Chang-Hui²⁾³⁾

1) (*College of Opto-Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

2) (*The Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

3) (*The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

(Received 10 May 2011; revised manuscript received 20 June 2011)

Abstract

Phase diversity wavefront sensing technology has been implemented successfully in many domains because of its simple and compact optical configuration, lower environment requirement, better measurement accuracy, and so on. In this paper, the co-phasing technique for segment primary mirrors is studied by using the phase diversity wavefront sensing technology, and the corresponding experimental optical system is also set up. The experimental results show that the measurement accuracy of phase diversity wavefront sensing technology for piston error is better than $\lambda/20$ and that it can be used to detect the piston errors of segment mirrors.

Keywords: phase diversity wavefront sensing, piston error, segment mirrors

PACS: 95.75.Qr, 42.68.Wt, 42.30.-d, 02.30.Zz

† E-mail: littlepuppet_luo@sina.com