物理学报 Acta Phys. Sin. Vol. 63, No. 14 (2014) 149501

一种自适应光学系统响应矩阵的直接计算方法*

郭友明[1)2)3)] 饶长辉[1)2)†] 鲍华[1)2)] 张昂[1)2)] 魏凯[1)2)]

1) (中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

2) (中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2014 年 3 月 10 日收到; 2014 年 3 月 31 日收到修改稿)

提出了一种自适应光学系统响应矩阵的直接计算方法. 通过分析特征驱动器斜率影响向量的实测值与理论值的相关性估计波前校正器与波前探测器的对准误差, 得到了更接近实际情况的响应矩阵. 实验结果表明, 考虑对准误差后计算出的响应矩阵能够有效地进行闭环校正.

关键词: 自适应光学, 响应矩阵, 对准误差

PACS: 95.75.Qr, 42.68.Wt **DOI:** 10.7498/aps.63.149501

1 引 言

自适应光学 (adaptive optics, AO) 系统能够实时测量并校正大气湍流等因素引入的波前畸变, 已成功应用在天文观测、激光传输和人眼成像等领域[1−3]. AO 系统通常由波前探测[4]、波前处理和波前校正[5] 等部分组成[6]. 波前处理的主要任务为波前复原和波前控制. 在进行波前复原时, 需要使用响应矩阵来表征波前探测器测量信号与波前校正器电压信号的关系. 在目前最常用的由哈特曼波前探测器和变形镜波前校正器组成的AO 系统中, 响应矩阵是变形镜电压向量转化为哈特曼探测器子孔径斜率向量间的关系矩阵. AO 系统的校正能力除与系统的带宽[7,8] 有关外, 还和响应矩阵的测量精度密切相关. 响应矩阵测量精度越高, 其广义逆复原矩阵的精度就越高, 波前复原的精度也就越高, 系统跟踪动态波前畸变的能力也就越强. 目前, 国际上存在的响应矩阵测量方法主要包括区域法、Hadamard 方法、调制法和直接计算法等. 区域法[9,10] 主要通过向变形镜驱动器逐个施加电压并测量相应的斜率响应而获得. 该方法理论简单, 计算量小, 在单元数较少的AO 系统中得到了广泛的应用. 假定变形镜的各驱动器具有相同的最大可行电压, Kasper 等[11] 提出了响应矩阵测量的电压型Hadamard 方法. 该方法施加的电压矩阵主要由Hadamard 矩阵组成, 通过反复地驱动所有驱动器带来的平均效应, 大大减小了测量噪声的影响. 然而受驱动器与子孔径排布及静态像差的影响, 各驱动器的最大可行电压往往不同. 为此, Meimon 等[12] 基于哈特曼探测器各子孔径的线性范围一致的特点提出了斜率型Hadamard 方法. 在测量响应矩阵时, 使各子孔径斜率响应均达到最大值, 以此来提高测量信噪比. 该方法实施的前提是已经具有一个较精确的初始响应矩阵, 用于计算施加给各驱动器的电压. 显然, 其相对于区域法和电压型Hadamard 方法更为复杂. 针对自适应次镜AO 系统无人工标定光源的特点, Wildi 和Brusa[13] 以及Esposito 等[14] 先后提出了响应矩阵测量的调制方法, 它们均可利用恒星作为标定光源, 通过调制与解调充分抑制大气湍流的影响. 另一种高效的获取响应矩阵

* 国家自然科学基金联合基金 (批准号: 11178004)、国家高技术项目和中国科学院光电技术研究所研究生创新基金 (批准号: 2013.2) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: chrao@ioe.ac.cn

的方法为根据预先测得的变形镜影响函数模型及驱动器与子孔径位置匹配关系直接计算响应矩阵，这里称之为响应矩阵的直接计算方法. 这种方法理论上不需要测量每一驱动器的斜率响应，只需要在变形镜制成后运用干涉仪测量各驱动器的面形影响函数，在AO系统完成组装和调试后，再根据光学系统设计参数即可进行直接计算. 运用此方法获得的响应矩阵既可直接用于闭环工作，也可作为其他测量方法的初始响应矩阵. 然而，实际上AO系统由于装调误差，变形镜与波前探测器间一般都存在对准误差，在计算响应矩阵时需要先测得系统的对准误差. 在由曲率传感器和双压电变形镜组成的多应用曲率自适应光学 (multiple application curvature adaptive optics) 系统中，Oberti等[15]提出了利用该系统响应矩阵的对称特性测量变形镜与传感器的对准误差. 然而，该方法对响应矩阵为非方阵的AO系统并不适用，限制了其在基于哈特曼探测器的AO系统上的应用. 为此，本文研究了一种新的直接计算响应矩阵的方法，适用于基于哈特曼波前探测器的AO 系统. 首先，利用所选特征驱动器的斜率影响向量的实测值与理论值的相关性，估计变形镜与哈特曼探测器的对准误差；然后，根据对准误差修正变形镜与哈特曼探测器的匹配关系，再利用实测的变形镜影响函数模型计算出更高精度的响应矩阵. 在中国科学院光电技术研究所595单元AO系统上的实验表明：由于在计算响应矩阵过程中考虑了对准误差，本文所提的方法提高了响应矩阵的测量精度，减小了闭环波前残差. 本文的研究成果对于提升AO系统的校正能力具有重要意义.

2　595单元AO系统简介

595单元AO系统如图1所示，该系统主要由595单元变形镜、676单元哈特曼探测器等组成. 其中，由632.8 nm波长准直光源产生的平面波经分光镜1透射后，再相继经过凸透镜1、反射镜1、离轴抛物镜后入射到口径为294 mm的变形镜 (驱动器间距d等于10 mm，高斯指数α为2.14，驱动器交连值ω为9.5%) 上，经变形镜反射后，再相继经过离轴抛物镜、反射镜1入射到凸透镜1上，经分光镜1反射后经过由凸透镜2和凸透镜3组成的4F系统，最后经分光镜2透射的部分进入哈特曼波前探测器，而经分光镜2反射的部分再经过反射镜2后进入成像系统. 595单元AO系统的实验装置，如图2所示.

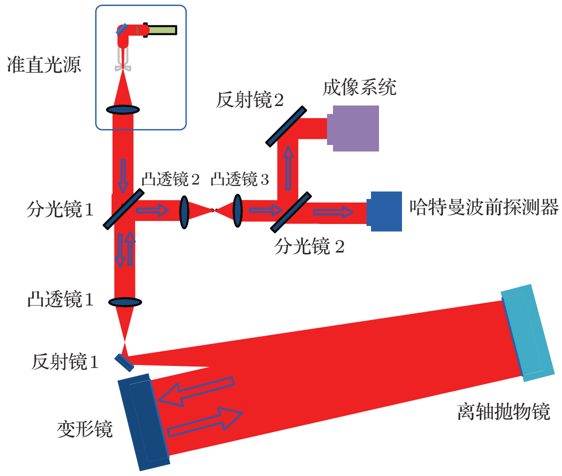

图1　595单元AO系统示意图

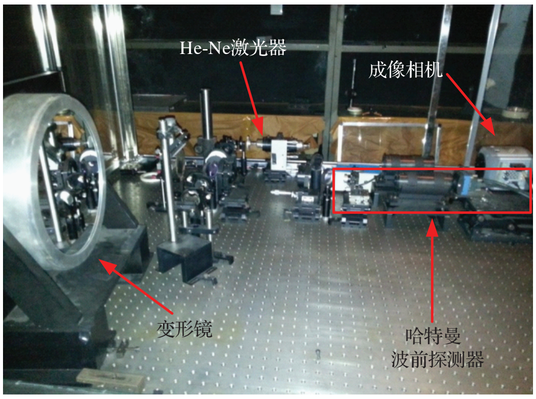

图2　595单元AO系统实验装置图

3　对准误差的影响

AO系统的闭环校正结果与扰动和测量噪声的特性、控制方法、控制参数的整定、响应矩阵的测量精度等均密切相关. 为尽量减小其他因素的影响，只考察响应矩阵测量误差对闭环结果的影响，可分析AO系统的如下闭环补偿过程：每一次闭环迭代都直接校正探测到的斜率误差

$$g(n+1) = g(n) - D\hat{D}^{+}g(n), \tag{1}$$

其中，$g(n)$为n时刻的波前斜率，D为AO系统实际的响应矩阵，$\hat{D}^{+}$为根据测得的响应矩阵求广义逆矩阵得到的复原矩阵. 如实际复原矩阵D^{+}与$\hat{D}^{+}$的关系为

$$D^{+} = \hat{D}^{+} + \Delta D^{+}, \tag{2}$$

其中, ΔD^{+} 为复原矩阵误差. 由 (1), (2) 式可得

$$g(n+1)=(I-DD^{+})g(n)+D\Delta D^{+}g(n), \quad (3)$$

其中, 等式 (3) 中右边第一项为拟合误差, 第二项为响应矩阵测量误差引入的残余波前斜率误差. 假如响应矩阵测量结果为零矩阵, 由于测量结果表明变形镜驱动器对波前斜率无影响, 此时自适应光学系统将不做任何补偿, 等效于复原矩阵的误差为 D^{+}. 根据 (3) 式知, 此时响应矩阵测量误差引入的残余波前斜率的平方和为

$$\sigma_0^2=\mathrm{trace}\{DD^{+}[g(n)g(n)^{\mathrm{T}}](DD^{+})^{\mathrm{T}}\}, \quad (4)$$

而当响应矩阵测量结果为非零矩阵时, 残余的波前斜率的平方和为

$$\sigma_1^2=\mathrm{trace}\{D\Delta D^{+}[g(n)g(n)^{\mathrm{T}}](D\Delta D^{+})^{\mathrm{T}}\}. \quad (5)$$

根据 Meimon 等 [12] 的研究, 大气湍流引入的波前斜率误差满足,

$$\langle g(n)g(n)^{\mathrm{T}}\rangle=d^2\times \boldsymbol{I}_m, \quad (6)$$

其中, $\langle\ \rangle$ 表示求期望; m 为斜率数目; d 为常数, $\boldsymbol{I}_m$ 为 m 阶的单位阵. 根据 (4), (6) 式及矩阵迹的性质, 有

$$\langle\sigma_0^2\rangle=\mathrm{trace}\{\langle g(n)g(n)^{\mathrm{T}}\rangle\}, \quad (7)$$

(7) 式表明: 在响应矩阵测量结果为零矩阵时, 响应矩阵测量误差引入的残余波前斜率的平方和的期望等于待校正波前斜率的平方和的期望. 根据 (4), (5) 和 (7) 式, 若将响应矩阵测量误差引入的残余斜率平方和的期望与待校正斜率平方和的期望之比定义为影响矩阵的测量误差 J, 则

$$J=\frac{\langle\sigma_1^2\rangle}{\langle\sigma_0^2\rangle}, \quad (8)$$

再根据 (4), (5) 和 (6) 式有

$$J=\frac{\mathrm{trace}\{D\Delta D^{+}(D\Delta D^{+})^{\mathrm{T}}\}}{\mathrm{trace}\{DD^{+}(DD^{+})^{\mathrm{T}}\}}. \quad (9)$$

分析 (8) 式可知, 当 $J>1$ 时表示响应矩阵测量误差引入的残余斜率平方和很有可能大于待校正斜率的平方和. 这表示利用该响应矩阵进行闭环可能会导致系统不稳定. 图 3 为根据 595 单元 AO 系统实际参数计算出的变形镜中心相对于哈特曼波前探测器中心在 X 和 Y 方向的偏离对准误差与 J 之间的关系

其中, d_{s} 为哈特曼子孔径的尺寸. 对于 595 单元 AO 系统, 其对准误差的测量精度要小于 $0.1d_{\mathrm{s}}$, 否则将可能严重影响 AO 系统的闭环校正能力. 特别是当 J 较大时, 很可能会导致系统不稳定.

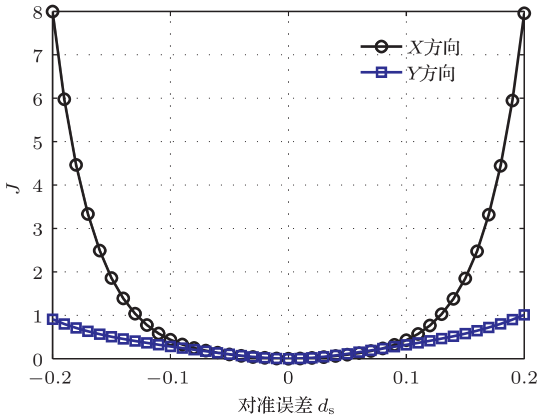

图 3 595 单元 AO 系统响应矩阵测量误差与对准误差的关系

4 响应矩阵的直接计算方法

4.1 无对准误差时响应矩阵的直接计算法

根据 AO 系统光波前相位补偿的设计关系, 变形镜凸起的面形将引起波前在哈特曼探测器上产生 2 倍凹下的面形. 因此, 根据驱动器与子孔径设计关系及变形镜驱动器面形影响函数可得系统的响应矩阵为

$$\begin{aligned}
&D_\mathrm{syn}(j,i)_{2N_{\mathrm{sub}}XN_{\mathrm{act}}}\\
&=-\frac{\lambda K\iint\limits_{S_j}\frac{\partial V_i(x,y)}{\partial x}\mathrm{d}x\mathrm{d}y}{\pi A_j}\\
&D_\mathrm{syn}(j+N_{\mathrm{sub}},i)_{2N_{\mathrm{sub}}XN_{\mathrm{act}}}\\
&=-\frac{\lambda K\iint\limits_{S_j}\frac{\partial V_i(x,y)}{\partial y}\mathrm{d}x\mathrm{d}y}{\pi A_j}\\
&i=1,2,\cdots,N_{\mathrm{act}}\\
&j=1,2,\cdots,N_{\mathrm{sub}},
\end{aligned} \quad (10)$$

其中, N_{sub} 为哈特曼探测器的有效子孔径数目; N_{act} 为变形镜有效驱动器的数目; λ 为波长; K 为驱动器施加单位电压时在其中心位置所产生的相位变化; S_j 为第 j 个子孔径在变形镜光瞳面的相位共轭区域, A_j 为该区域的面积; $V_i(x,y)$ 为驱动器对变形镜面形的影响函数 [16], 它表示了向变形镜的一个驱动器施加电压时, 镜面形变的分布, 一般

由如下方式拟合

$$V_i(x,y) = \exp\left\{[\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}/d]^\alpha \ln\omega\right\}, \quad (11)$$

其中, d为变形镜驱动器间距, α为高斯指数, ω为驱动器交连值, (x_i, y_i) 为第i号驱动器的位置坐标. 根据等式(10)可知, 响应矩阵的第i列实质上表征了第i号驱动器单独加单位电压对各子孔径斜率的影响.

4.2 对准误差测量

由装调误差引起的变形镜与哈特曼探测器的对准误差主要包括变形镜中心相对于哈特曼探测器中心的水平方向偏离、竖直方向偏离以及变形镜的旋转误差. 对准误差将导致各驱动器相对于其设计位置的偏离并改变变形镜与哈特曼探测器的设计匹配关系, 因此, 如不考虑对准误差就利用4.1的方法计算响应矩阵会导致较大的误差. 为解决上述问题, 需先测量对准误差, 具体步骤如下.

1) 特征驱动器选取: 先从变形镜中选取四个驱动器, 根据它们相对于设计位置的偏离来计算对准误差. 595单元AO系统的驱动器与子孔径间的匹配设计关系如图4所示, 其中圆代表驱动器, 小正方形代表子孔径. 选取变形镜的a_1 (78号), a_2 (89号), a_3 (507号)及a_4 (518 号)驱动器作为特征驱动器. 其中, a_1与a_4, a_2与a_3分别关于变形镜中心对称, 以简化变形镜中心位置偏离的计算.

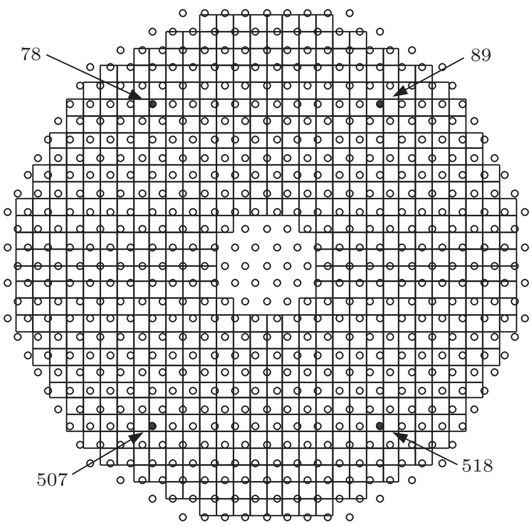

图4 595单元AO系统驱动器与子孔径排布及特征驱动器位置示意图

2) 生成各种偏离下的响应矩阵模板: 将设计关系中的所有驱动器位置沿水平方向移动$\Delta d = [-d_s - 0.9d_s, \cdots, d_s]$, 利用4.1中的计算方法得到相应的响应矩阵模板$D_1$, $D_2, \cdots, D_{21}$; 同理, 将设计关系中的所有驱动器位置沿竖直方向移动Δd, 可得到相应的响应矩阵模板D_{22}, $D_{23}, \cdots, D_{42}$.

3) 测量对准误差:

① 分别测量各特征驱动器单独施加单位电压时在哈特曼探测器上引起的斜率影响向量$\boldsymbol{g}_{a1}$, $\boldsymbol{g}_{a2}$, $\boldsymbol{g}_{a3}$, $\boldsymbol{g}_{a4}$;

② 利用互相关运算得到$\boldsymbol{g}_{a_1}$, $\boldsymbol{g}_{a_2}$, $\boldsymbol{g}_{a_3}$, $\boldsymbol{g}_{a_4}$与D_1, $D_2, \cdots, D_{42}$中各特征驱动器对应斜率影响向量的互相关因子, 再根据相关因子的最大值所对应的X方向和Y方向的偏离量获取a_1, a_2, a_3, a_4号驱动器相对于设计位置的偏离$(\mathrm{d}x_{a_1}, \mathrm{d}y_{a_1})$, $(\mathrm{d}x_{a_2}, \mathrm{d}y_{a_2})$、$(\mathrm{d}x_{a_3}, \mathrm{d}y_{a_3})$、$(\mathrm{d}x_{a_4}, \mathrm{d}y_{a_4})$.

③ 根据$(\mathrm{d}x_{a_k}, \mathrm{d}y_{a_k})$ $(k = 1, 2, 3, 4)$, 获取变形镜光瞳面中心相对于哈特曼探测器的光瞳面中心在X方向偏离Δx与Y方向偏离Δy

$$\Delta x = \frac{\mathrm{d}x_{a_1} + \mathrm{d}x_{a_2} + \mathrm{d}x_{a_3} + \mathrm{d}x_{a_4}}{4}, \quad (12)$$

$$\Delta y = \frac{\mathrm{d}y_{a_1} + \mathrm{d}y_{a_2} + \mathrm{d}y_{a_3} + \mathrm{d}y_{a_4}}{4}; \quad (13)$$

④ 各驱动器坐标与变形镜光瞳面中心位置的坐标差为

$$\begin{aligned} x_i' &= x_i - x_c \\ y_i' &= y_i - y_c \end{aligned} \quad i = 1, 2, \cdots, N_{\mathrm{act}}, \quad (14)$$

其中, (x_c, y_c)为变形镜光瞳面中心位置(在595单元变形镜上为第298号驱动器的中心位置).

令中间变量$\mathrm{d}x_r(k)$与$\mathrm{d}y_r(k)$为

$$\begin{aligned} \mathrm{d}x_r(k) &= \mathrm{d}x_{a_k} - \Delta x \\ \mathrm{d}y_r(k) &= \mathrm{d}y_{a_k} - \Delta y \end{aligned} \quad k = 1, 2, 3, 4, \quad (15)$$

则根据几何关系, 各特征驱动器相对于变形镜光瞳中心位置的旋转角度$\Delta\theta_a$为

$$\Delta\theta_a(k) = \arcsin\left(\frac{x'_{a_k}\mathrm{d}y_r(k) - y'_{a_k}\mathrm{d}x_r(k)}{x'^2_{a_k} + y'^2_{a_k}}\right) \quad k = 1, 2, 3, 4, \quad (16)$$

变形镜光瞳面的平均角度旋转即为

$$\Delta\theta = \frac{\sum_{k=1}^{4}\Delta\theta_a(k)}{4}. \quad (17)$$

这样就获得了变形镜光瞳面中心相对于哈特曼探测器光瞳面中心的偏离 $(\Delta x, \Delta y)$ 以及变形镜光瞳面相对于哈特曼探测器光瞳面的角度旋转误差 $\Delta\theta$.

4.3 考虑对准误差后响应矩阵的计算

根据 Δx, Δy 及 $\Delta\theta$ 可得考虑对准误差以后的变形镜各驱动器的坐标 (x_{mi}, y_{mi}). 计算方法为:

当 i 从 1 取值到 N_{act}

若 $\sqrt{x_i'(k)^2 + y_i'(k)^2} \neq 0$, 则

$$x_{mi} = \sqrt{x_i'^2 + y_i'^2}\cos\left(\arccos\left(\frac{x_i'}{\sqrt{x_i'^2 + y_i'^2}}\right) + \Delta\theta\right) + \Delta x + x_{\mathrm{c}},$$

$$y_{mi} = \sqrt{x_i'^2 + y_i'^2}\sin\left(\arcsin\left(\frac{y_i'}{\sqrt{x_i'^2 + y_i'^2}}\right) + \Delta\theta\right) + \Delta y + y_{\mathrm{c}}; \tag{18}$$

若 $\sqrt{x_i'(k)^2 + y_i'(k)^2} = 0$, 则

$$x_{mi} = \Delta x + x_{\mathrm{c}},$$

$$y_{mi} = \Delta y + y_{\mathrm{c}}; \tag{19}$$

再利用 4.1 中的方法就能得到新匹配关系下的 AO 系统的响应矩阵 $\boldsymbol{D}_m$, 然后对 $\boldsymbol{D}_m$ 求广义逆矩阵即得复原矩阵 $\boldsymbol{R}_m$.

5 实验结果

在 595 单元 AO 系统上, 进行了响应矩阵的直接计算方法验证实验. 首先利用手工调整使变形镜与哈特曼探测器大致对准. 然后按照第 4 部分测量对准误差, 得到了各特征驱动器实测斜率影响向量与不同偏离量下理论斜率影响向量间的相关因子, 如图 5 所示. 其中图 5 (a) 为 X 方向, (b) 为 Y 方向下的结果. 不难看出 78, 89, 507, 518 号驱动器相对于设计位置在 X 方向的偏离分别为 0, $-0.1d_{\mathrm{s}}$, $-0.3d_{\mathrm{s}}$, 0, 在 Y 方向的偏离分别为 $-0.2d_{\mathrm{s}}$, $-0.2d_{\mathrm{s}}$, $-0.3d_{\mathrm{s}}$, $0.2d_{\mathrm{s}}$. 再根据 (12) 和 (13) 式可知变形镜与哈特曼探测器的对准误差为 X 方向偏离 $-0.1d_{\mathrm{s}}$, Y 方向偏离 $-0.125d_{\mathrm{s}}$, 最后可得角度旋转误差为 0.0049 rad. 继续按照第 5 部分中的步骤便可得到考虑此对准误差下的响应矩阵 $\boldsymbol{D}_m$, 如图 6 所示. 对该响应矩阵求广义逆矩阵即可得对应的复原矩阵 $\boldsymbol{R}_m$.

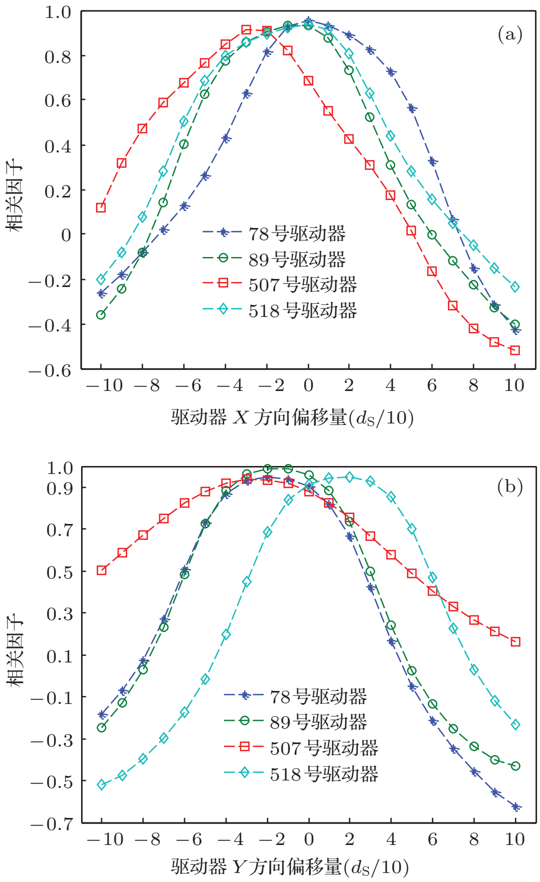

图 5 特征驱动器实测斜率影响向量与不同偏离量下理论斜率影响向量相关因子 (a) X 方向; (b) Y 方向

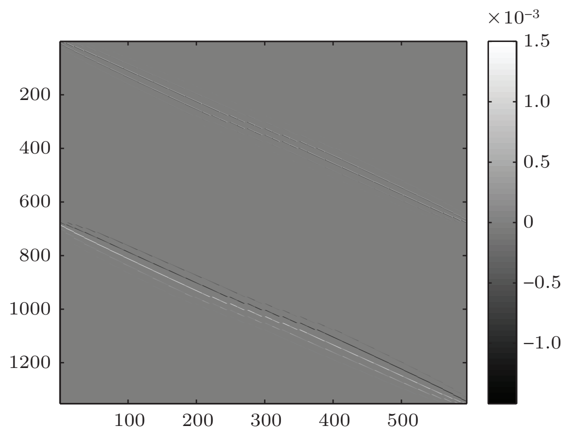

图 6 595 单元 AO 系统响应矩阵的直接计算结果

为了对比验证上述方法的优越性, 下面改变所测得的对准误差, 并在新条件下计算相应的响应矩阵用于闭环校正. 为此, 对计算响应矩阵所使用的驱动器位置 (x_{mi}, y_{mi}) 做如下调整:

1) 保持其他条件不变, 沿 X 方向分别做 $-d_{\mathrm{s}}/10$, $-2d_{\mathrm{s}}/10$, $-4d_{\mathrm{s}}/10$, $d_{\mathrm{s}}/10$, $2d_{\mathrm{s}}/10$, $4d_{\mathrm{s}}/10$ 的移动;

2) 保持其他条件不变, 沿 Y 方向分别做

$-d_s/10$, $-2d_s/10$, $-4d_s/10$, $d_s/10$, $2d_s/10$, $4d_s/10$ 的移动;

3) 保持其他条件不变, 以变形镜中心位置驱动器所在轴为转轴, 分别做 −1/3 度, −2/3 度, −3/3 度, 1/3 度, 2/3 度, 3/3 度旋转.

在每种位置调整下, 利用驱动器的新位置计算相应的响应矩阵和复原矩阵. 利用比例积分控制使 AO 系统闭环工作, 在保证控制参数不变的情况下, 分别利用这些复原矩阵和前面得到的 $\boldsymbol{R}_m$ 闭环校正 AO 系统的静态像差. 其中, 闭环迭代每次执行 300 步. 利用不同复原矩阵闭环测试时, 由于变形镜驱动器的蠕变、零漂等原因, 初始静态像差略有不同. 为不影响比较效果, 将迭代过程中的波前相位残余误差 RMS 值利用其初始值归一化. X 与 Y 方向偏离下的闭环校正结果分别如图 7 和图 8 所示. 其中, 偏离为 0 的曲线代表使用 $\boldsymbol{R}_m$ 做闭环的结果. 可见使用 $\boldsymbol{D}_m$ 对应的复原矩阵闭环所得到的 RMS 在稳定后将获得最小值, 而无论将计算 $\boldsymbol{D}_m$ 时使用的驱动器位置沿 X、Y 方向的正或负方向做移动均将影响闭环校正效果, 如果移动过大, 甚至可能导致闭环不稳定. 旋转变形镜光瞳面条件下 RMS 与闭环迭代步数的关系如图 9 所示, 其中, 角度旋转为 0 的曲线代表使用 $\boldsymbol{R}_m$ 作闭环的结果. 可见准确测量旋转误差有助于提高响应矩阵的测量精度以减小闭环波前相位残余误差.

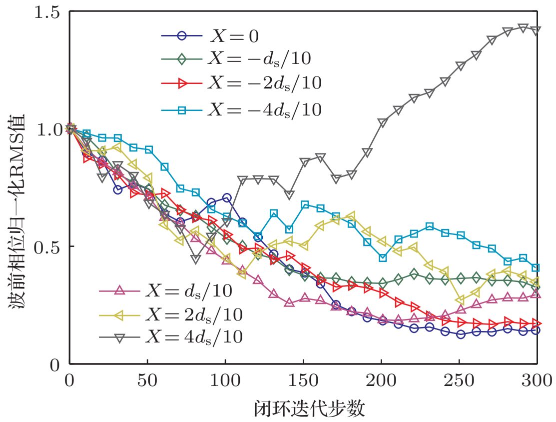

图 7 (网刊彩色) X 方向误差下波前相位归一化 RMS 值与闭环迭代步数的关系

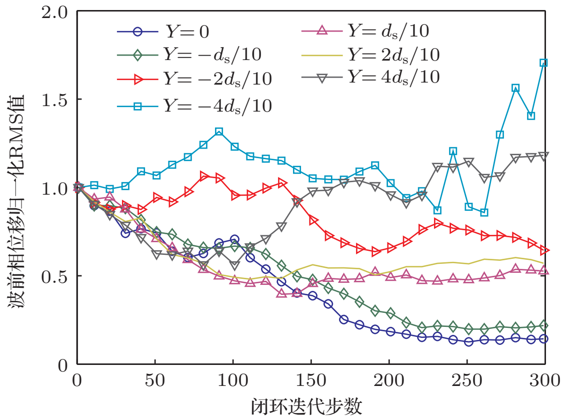

图 8 (网刊彩色) Y 方向误差下波前相位归一化 RMS 值与闭环迭代步数的关系

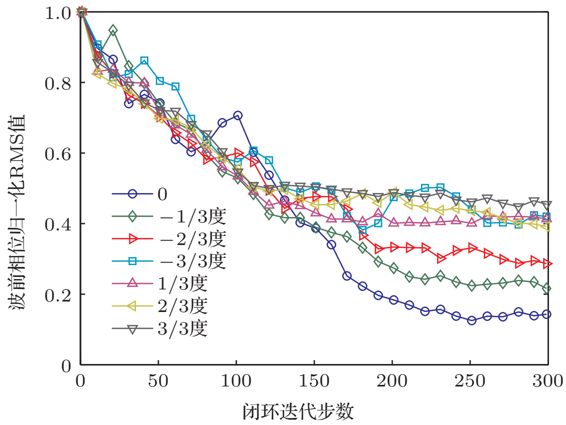

图 9 (网刊彩色) 旋转误差下波前相位归一化 RMS 值与闭环迭代步数的关系

6 结 论

本文提出了一种 AO 系统响应矩阵的直接计算方法, 详细介绍了如何利用特征驱动器的实测斜率影响向量测量变形镜与哈特曼探测器的对准误差. 该方法能够有效克服对准误差对响应矩阵计算结果的影响. 通过实验验证了所提方法的优越性. 本文的结果将有助于扩展 AO 系统响应矩阵的测量途径, 特别适用于单元数较多的 AO 系统响应矩阵的高效测量.

感谢中国科学院光电技术研究所的姜文汉院士对作者研究工作的指导以及帮助.

参考文献

[1] Li C H, Xian H, Jiang W H, Rao C H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4289 (in Chinese) [李超宏, 鲜浩, 姜文汉, 饶长辉 2007 物理学报 **56** 4289]

[2] Jiang W H, Rao X J, Ling N, Wang C, Yang Z P, Zhang Y D 2000 *Proc. SPIE* **4124** 148

[3] Fernandez E J, Iglesias I, Artal P 2001 *Opt. Lett.* **26** 746

[4] Luo Q, Huang L H, Gu N T, Rao C H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094201

[5] Ning Y, Zhou H, Yu H, Rao C H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1089

[6] Ning Y, Yu H, Zhou H, Rao C H, Jiang W H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4717 (in Chinese) [宁禹, 余浩, 周虹, 饶长辉, 姜文汉 2009 物理学报 **58** 4717]

[7] Guo Y M, Ma X Y, Rao C H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 134207 (in Chinese) [郭友明, 马晓燠, 饶长辉 2013 物理学报 **62** 134207]

[8] Guo Y M, Ma X Y, Rao C H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 069502 (in Chinese) [郭友明, 马晓燠, 饶长辉 2014 物理学报 **63** 069502]

[9] Boyer C, Michau V, Rousset G 1990 *Proc. SPIE* **1237** 406

[10] Jiang W H, Li H G 1990 *Proc. SPIE* **1271** 82

[11] Kasper M, Fedrigo E, Looze D P, Bonnet H, Ivanescu L, Oberti S 2004 *J. Opt. Soc. Am. A* **21** 1004

[12] Meimon S, Petit C, Fusco T 2010 *AO4ELT Conference* **07009** 07009-p1

[13] Wildi F, Brusa G 2004 *Proc. SPIE* **5490** 164

[14] Esposito S, Tubbs R, Puglisi A, Oberti S, Tozzi A, Xompero M, Zanotti D 2006 *Proc. SPIE* **6272** 62721C-1

[15] Oberti S, Bonnet H, Fedrigo E, Ivanescu L, Kasper M, Paufique J 2004 *Proc. SPIE* **5490** 139

[16] Rao X J, Ling N, Jiang W H 1995 *Acta Phton. Sin.* **10** 1446 (in Chinese) [饶学军, 凌宁, 姜文汉 1995 光学学报 **10** 1446]

Direct computation of the interaction matrix of adaptive optical system*

Guo You-Ming[1)2)3)] Rao Chang-Hui[1)2)†] Bao Hua[1)2)] Zhang Ang[1)2)] Wei Kai[1)2)]

1) (*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

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

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 10 March 2014; revised manuscript received 31 March 2014)

Abstract

The interaction matrix of an adaptive optical system is directly computed. In this method, based on the correlation between the measured and theoretical slope influence vectors of the selected actuators, the misalignment between the wavefront sensor and wavefront corrector is first estimated, and then an interaction matrix more close to the real one is obtained. Experimental results show that with considering the misalignment, the interaction matrix acquired by direct computation becomes more effective in closed-loop correction, and the slope residual error is reduced.

Keywords: adaptive optics, interaction matrix, misalignment

PACS: 95.75.Qr, 42.68.Wt **DOI:** 10.7498/aps.63.149501

* Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11178004), the Hi-Tech Project of China and the Graduate Student Innovation Foundation of the Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2013.2).

† Corresponding author. E-mail: chrao@ioe.ac.cn