

闭环控制自适应光学系统变形镜约束技术的研究

陈善球^{1,2,3} 刘文劲¹ 董理治¹ 王 帅¹ 杨 平¹ 许 冰¹ 叶玉堂²

¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

²电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 611731

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了实现闭环控制自适应光学(AO)系统中的变形镜对倾斜及平移像差的约束,分析了基于限定向量算法对系统动态特性及校正残差的影响,数值仿真结果表明,限定向量算法无法实现约束量的完全抑制,并且严重影响系统的校正效果。提出了基于投影抑制的算法,通过分离像差及在控制电压上实现对变形镜的抑制,采用2种算法利用单变形镜对含有倾斜的像差进行校正的仿真结果表明,采用限定向量算法,变形镜产生了使远场偏移9.3 pixel的整体倾斜时,基于向量投影抑制算法只产生小于0.02 pixel的偏移,并且对前36阶各单阶泽尼克模式的像差校正后具有更高的斯特列尔比。结果表明,基于投影抑制的算法具有更好的约束能力、更低的条件数及具有更优的校正效果。

关键词 自适应光学; 变形镜解耦; 投影抑制

中图分类号 O439; TJ953 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1201002

Constraint Study on Deformable Mirror in Close-Loop Adaptive Optics System

Chen Shanqiu^{1,2,3} Liu Wenjin¹ Dong Lizhi¹ Wang Shuai¹

Yang Ping¹ Xu Bing¹ Ye Yutang²

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

²*School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China*

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

Abstract In order to restrict the deformable mirror to form the tip/tilt and piston aberration in close-loop adaptive optics(AO) system, the dynamic characteristic and the correction error of the system using least square algorithm by adding limitative aberration vector are analyzed, and the simulation result shows that the algorithm not only can not restrict the limitative aberration vector exactly, but also degrade the correction performance. Project-constraint algorithm to restrict the deformable mirror to form tip/tilt and piston aberration via aberration decouple and imposing limitative vector on control voltage is proposed. Simulation correction result for first 36-order aberration indicates only 0.02 pixels offset of far field is generated by deformable mirror via project-constraint algorithm, while 9.3 pixels offset using least square algorithm by adding limitative aberration vector, and higher Strehl ratio is achieved via project-constraint algorithm when correct for first 36-order Zernik mode aberration. The result shows that project-constraint algorithm can restrict effectively, and have better correction performance.

Key words adaptive optics; deformable decoupling; project constraint

OCIS codes 110.1080; 350.1260; 000.3870; 140.3298

1 引言

自适应光学(AO)在天文观测、化学、固体激光净化及相干合成中得到了广泛的应用^[1-4]。在天文观测的

收稿日期: 2015-06-25; 收到修改稿日期: 2015-07-29

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)

作者简介: 陈善球(1981—),男,博士研究生,副研究员,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: greencsq@126.com

导师简介: 许冰(1960—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光净化等自适应光学方面的研究。E-mail: bingxu@ioe.ac.cn

AO 系统中,一般采用倾斜镜与变形镜组合的方式实现整体倾斜与高阶像差的联合校正^[2],其中倾斜镜校正整体倾斜,变形镜完成高阶像差的校正。但是由于变形镜具有整体倾斜的拟合能力,当变形镜产生整体倾斜时,会出现倾斜镜校正变形镜产生倾斜的情况,即双镜之间产生耦合,为了防止产生耦合问题,需要避免变形镜产生倾斜。同时,由于 Shack-Hartmann 传感器对平移像差探测不灵敏,需要防止变形镜拟合平移像差,避免牺牲变形镜的行程及在拟合过程中产生高阶像差。上述的问题需要在 AO 系统的变形镜控制电压上实现对整体倾斜与平移像差的约束。在固体激光相干合成的净化过程^[4]中,由于整体倾斜量的探测与校正是在高阶像差校正之后进行,因此闭环后的 Shack-Hartmann 传感器中依然含有整体倾斜分量,整体倾斜的残差有可能会影响系统高阶像差的校正效果。为防止整体倾斜分量对高阶像差校正效果的影响,通常需要去除传感器的整体倾斜分量,此时探测系统对整体倾斜的探测不灵敏,如果不对变形镜的控制电压做整体倾斜的约束,则会导致闭环控制系统中的变形镜上累积造成整体倾斜的电压,牺牲变形镜的行程量。在化学激光系统中,光斑存在高时间频率的抖动,由于 Shack-Hartmann 波前传感器图像靶面较大,其传感器的频率有限,利用 Shack-Hartmann 波前传感器的信号控制倾斜镜无法完全校正高频的抖动,传感器中仍然存在较大倾斜残差,与固体激光合成系统中类似,这类系统均需要在变形镜实现整体倾斜及平移像差约束的同时,获取对高阶像差理想的校正效果。

在对变形镜进行特定像差约束的方法上,Hu 等^[5-6]提出了基于限定向量的最小二乘算法,其原理是在斜率响应矩阵中加入对特定像差的限定向量,61 单元系统的仿真结果表明,能实现单镜对特定像差的校正及双镜之间校正像差的分离,该算法具有优异的并行特性,便于利用可编程逻辑阵列(FPGA)及数字信号处理器(DSP)等硬件系统并行处理,已广泛应用到工程系统中,但是文章并没有研究其动态特性及闭环控制系统中的校正效果。本文分析了限定向量算法的误差,并仿真了在闭环控制系统中的约束效果及闭环校正效果。为实现对抑制量的完全抑制,改善系统的动态特性,提出了基于向量投影抑制的算法,通过在控制电压上去除约束向量空间内的电压,约束变形镜只对高阶像差进行校正;通过对像差进行分离的方式,防止高低阶像差的耦合,实现变形镜对高阶像差的有效校正。

2 变形镜约束的数学原理

2.1 变形镜约束的目标

对于采用 Shack-Hartmann 波前传感器的直接斜率复原算法,哈特曼-夏克波前传感器测量的子孔径斜率向量 G 与斜率响应矩阵 R 及变形镜驱动器的电压向量 V 之间存在变换关系^[7]:

$$G = R \times V. \quad (1)$$

在采用单传感器的系统中,由于变形镜本身具备产生低阶的倾斜量的能力,因此在系统闭环校正过程中,若不对校正器控制信号作约束,变形镜很可能会产生倾斜像差,变形镜与倾斜镜会相互校正产生的倾斜量。由于变形镜驱动器的行程量有限,变形镜产生倾斜会极大地削弱系统对高阶像差的校正能力,同时变形镜拟合的倾斜量或平移像差中存在高阶的误差,使远场成像亮度下降。为了防止变形镜产生倾斜与平移等低阶像差,需要对变形镜施加约束条件,变形镜抑制第 k 阶泽尼克多项式像差 Z_k 的抑制条件为^[6]

$$\sum_{i=1}^n V_i \iint Z_k R_i(x,y) dx dy = 0, \quad (2)$$

式中 V_i 为第 i 个驱动器的电压, R_i 为第 i 个驱动器的影响函数。对于需要抑制平移与倾斜像差的系统而言,取泽尼克多项式的前 3 阶,其表达式为

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^n V_i \iint R_i(x,y) dx dy = 0 \\ \sum_{i=0}^n V_i \iint R_i(x,y) x dx dy = 0. \\ \sum_{i=0}^n V_i \iint R_i(x,y) y dx dy = 0 \end{cases} \quad (3)$$

假定系统每个驱动器的响应函数具有一致的面形响应度,且考虑到实际面形具有高斯分布特性,对(3)

式进行数值积分,则可近似为

$$\begin{cases} C_p \sum_{i=0}^n V_i = 0 \\ C_x \sum_{i=0}^n V_i x_i = 0, \\ C_y \sum_{i=0}^n V_i y_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 x_i 与 y_i 是第 i 个驱动器在单位圆内 x 方向与 y 方向的坐标值, V_i 是第 i 个驱动器的电压值, C_p, C_x, C_y 为常数。(4)式表示变形镜需要约束平移与整体倾斜时对控制电压的要求。取 C_p, C_x, C_y 均为 1, 将(4)式转换成向量模式

$$\begin{cases} \mathbf{V} \cdot \mathbf{p} = 0 \\ \mathbf{V} \cdot \mathbf{x} = 0, \\ \mathbf{V} \cdot \mathbf{y} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 \mathbf{V} 为所有电压组成的电压向量, 而向量 \mathbf{p}, \mathbf{x} 与 \mathbf{y} 为 $\{1\}, \{x_i\}, \{y_i\}$ 元素组合而成的向量, \cdot 表示向量的点积。(5)式表示变形镜对平移, 整体倾斜的约束条件为实际的控制电压在 \mathbf{p}, \mathbf{x} 与 \mathbf{y} 3 个向量上的投影应该为 0。

2.2 限定向量的直接斜率控制算法简介及对系统性能的影响

根据 Hu 等^[5-6]的描述, 采用限定向量算法对变形镜加入约束时, 可将(1)式进行扩展, 获取扩展斜率响应矩阵为^[6]

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{R}_m \end{bmatrix}, \mathbf{G}' = \begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

针对倾斜与平移的约束向量, \mathbf{R}_m 为(5)式中的 $\{1\}, \{x_i\}, \{y_i\}$ 的 3 个限定向量 \mathbf{p}, \mathbf{x} 与 \mathbf{y} 组成的矩阵, 则(1)式的表达式扩充后变为

$$\mathbf{G}' = \mathbf{R}' \times \mathbf{V} \quad (7)$$

采用限定向量的直接斜率复原算法, 对于探测的斜率 \mathbf{S} , 其复原的电压 $\hat{\mathbf{V}}$ 为^[5-7]

$$\hat{\mathbf{V}} = \mathbf{R}'^+ \times \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 \mathbf{R}'^+ 为 \mathbf{R}' 的伪逆矩阵。实际的电压为

$$\hat{\mathbf{V}} = \mathbf{R}'_1 \times \mathbf{S}, \quad (9)$$

式中 \mathbf{R}'_1 为 \mathbf{R}'^+ 的去掉最后 3 列的子矩阵。

(7)式所示的限定向量的直接斜率算法, 其本质是基于最小二乘误差下的复原算法, 对于系统已知的斜率 \mathbf{S} , 其复原电压 $\hat{\mathbf{V}}$ 是在下式条件的目标下取得:

$$\min \left\{ \left\| \mathbf{R}'\mathbf{V} - \mathbf{S} \right\|_2 \right\}, \quad (10)$$

加入限定向量后, (10)式的误差包含 2 个部分, 一个是子孔径斜率误差部分 ε_s , 另外一个为约束向量的部分 ε_m :

$$\left\| \mathbf{S}_g - \mathbf{S} \right\|_2^2 = \varepsilon_s + \varepsilon_m = \sum_{i=1}^n (\mathbf{S}_{g,i} - S_i)^2 + \sum_{i=n+1}^{n+3} S_{g,i}^2, \quad (11)$$

根据(7)式, 第 2 部分的 3 项数值为

$$\begin{cases} S_{g,n+1} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{p} \\ S_{g,n+2} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{x}, \\ S_{g,n+3} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{y} \end{cases} \quad (12)$$

式中 $S_{g,n+1}, S_{g,n+2}, S_{g,n+3}$ 分别代表电压向量 \mathbf{V} 在 $\mathbf{p}, \mathbf{x}, \mathbf{y}$ 3 个向量上的投影, 其相对大小反映了变形镜电压在平移、 X 方向倾斜、 Y 方向倾斜上的残余误差的大小。由于校正器件空间校正能力的局限性^[8], 自适应光学系统为不完全校正的系统, 且采用最小二乘法的标准, 因此在实际系统中, (12)式中 3 项始终存在一定的数值, 也就无法对变形镜实现如(5)式所要求的完全约束。同时该数值与系统的误差斜率[(11)式中的第 1 部分]同样视为误差斜率, 因此该数值在复原运算时也会影响系统的第 1 部分的误差斜率, 从而影响闭环效果。

(11)式中 $S_{g,i}$ 为(7)式产生斜率的第 i 个分量, S_i 为实际测量斜率的第 i 个分量。直接斜率法的本质是最小二乘算法,目标是使(11)式中的数值最小;但由于限定向量部分的加入,可能会出现两种情况:如果限定向量的数值相对较大时,则由于第2部分 ε_m 过大,此时会导致第1部分 ε_s 在整个残差中影响较小,导致在 ε_m 减小及斜率误差部分 ε_s 放大的情况下也可获取最小二乘的结果,使闭环后像差更大,造成控制失效;如果限定向量的数值较小,由于限定向量只有3个分量,在子孔径较多的系统中, ε_m 占的比重相对较小,约束主要限制误差斜率 ε_s 上,导致向量约束部分可能含有较大的残余量,造成约束失效。这两种情况在实际系统中都可能出现,由于 Shack-Hartmann 传感器对平移像差的探测不灵敏,在探测特定的斜率时,平移像差的抑制量有可能会较大的数值,此时会出现这种约束向量较大的第1种情况;而在子孔径较多时,由于斜率误差的项数远大于约束向量的3项,此时会出现第2种情况。

实际的自适应光学系统一般采用闭环控制系统,因此(9)式所获取的电压作为系统的残差电压 e , 经过(12)式的控制运算后,得到施加给变形镜的电压为

$$\{v_i^k\} = a\{v_i^{k-1}\} + b\{e_i^k\}. \quad (13)$$

(11)式中第2部分中没有完全抑制的残差经过(13)式的积分有可能会持续累积到比较大的数值,导致系统无法实现稳定的解耦约束。

在动态特性方面,根据矩阵的摄动理论,其电压的变化量 δV 与斜率的变化量 δS 及传递矩阵的条件数 $\text{cond}(\mathbf{R})$ 之间存在关系:

$$\frac{\|\delta V\|}{\|V\|} \leq \text{cond}(\mathbf{R}) \frac{\|\delta S\|}{\|S\|}. \quad (14)$$

系统中探测斜率时存在噪声,复原矩阵的条件数反映了系统对斜率噪声的影响程度,条件数较大时,小的噪声可能会导致大的电压变化,导致控制系统不稳;采用限定向量算法其条件数由不加约束的直接斜率法中的 \mathbf{R} 的条件数变为 \mathbf{R}' 的条件数,一般情况下,后者要远大于前者,这意味着限定向量的加入会严重影响系统的动态特性,使系统不稳定。

2.3 基于向量投影抑制的算法

为了防止误差电压的累积作用,同时保持 AO 系统的条件数,采用向量投影抑制算法。其基本思想在于,考虑到系统对不含整体倾斜的高阶像差的校正,直接斜率法是误差斜率上的最小二乘解,此时变形镜控制电压中的倾斜分量较小,而探测不灵敏的平移像差对远场成像影响较小,即使在平移抑制量残差比较大的情况下,去除产生平移模式的电压对远场成像影响也不大,因此在效果上趋近于利用变形镜直接校正不含倾斜的高阶像差的效果;尽管静态的整体倾斜不影响远场的成像质量,但是整体倾斜的残差会影响直接斜率法的评价标准 ε_s , 从而可能会影响高阶像差的校正效果,算法一方面去除了整体倾斜对高阶像差校正的影响;另一方面,在控制电压上施加电压的约束,避免了采用不加约束的直接斜率法抑制误差的累积。其方法为通过对系统高阶像差的分离,采用直接斜率法进行求解,最后在控制电压上去除约束向量空间的电压值,获取去除约束后的电压作为控制电压。

对于由传感器测量的 X 方向斜率 S_{ox} 与 Y 方向斜率 S_{oy} 斜率组合的斜率向量为 \mathbf{S} 的系统,对去除 X 与 Y 方向后的平均斜率 \bar{S}_{ox} 与 \bar{S}_{oy} 后的高阶部分的斜率 S_x 与 S_y 为

$$S_x = S_{ox} - \bar{S}_{ox}, S_y = S_{oy} - \bar{S}_{oy}. \quad (15)$$

重新组合后利用(1)式中的复原矩阵获取变形镜的误差电压,误差电压经过闭环控制后,根据(5)式,需要去除控制电压 V 在 p , x 与 y 组成的子空间上投影,其投影向量分别为

$$V_x = \frac{(V, x)}{(x, x)} x, V_y = \frac{(V, y)}{(y, y)} y, V_p = \frac{(V, p)}{(p, p)} p. \quad (16)$$

为防止变形镜产生倾斜与平移等像差,对实际施加的控制电压上进行约束,取子空间的正交补空间的向量,考虑到驱动器的分布具有对称性,3个约束向量为正交向量,因此实际施加的电压 V_t 为去除投影后的电压向量为

$$V_r = V - V_x - V_y - V_z, \quad (17)$$

式中的实际施加的电压能够满足(5)式中对平移、整体倾斜抑制的要求,与限定向量的直接斜率法相比,该算法下系统的条件数能保持不变,没有误差累积的效应。但是采用限定向量复原算法在实时复原计算时只需执行(9)式,采用投影抑制的算法则需要3步操作:

- 1) 去除整体误差斜率的整体倾斜部分,如(15)式所示;
- 2) 执行直接斜率复原算法;
- 3) 执行(16)、(17)式以满足(5)式的要求。

算法由原来的1步矩阵向量相乘的算法改变为3步算法,破坏了原有的流水线操作,会给采用流水线操作的处理系统^[9]提出新的要求,由于投影抑制算法的第1步的斜率是在全部斜率全部完成后,才能获取第2步参与复原的斜率数据,因此对于在第1个子孔径斜率计算完成时开始进行复原运算的架构而言,可能增加接近于1个相机采样周期 T 的延迟;同时第3步需要所有电压进行数据融合,这对采用多板并行计算的架构而言,需要增加多板通信的功能,会给系统的设计提出新的要求。然而,目前的基于通用中央处理器(CPU)的处理系统,其低延迟是基于高性能计算的基础^[10],且系统对计算部分采用顺序处理的方式,处理系统能够提供足够的计算能力,以满足系统新算法的要求。对于4 m级望远镜系统所要求的1000单元AO系统,其增加的计算时间小于 $10 \mu\text{s}$ 。系统的控制带宽主要由系统延迟决定,根据参考文献[1],全部延迟近似为 $2T + \tau$,其中 τ 为处理延迟。对于2000 Hz的系统,其增加部分的时间所占比例小于1%,因此采用向量投影抑制算法对于采用CPU架构的波前处理,其对控制带宽的影响基本可以忽略。

3 数值仿真分析

以227个驱动器、192个子孔径的变形镜组成的自适应光学系统为例进行了仿真分析,研究基于向量投影抑制算法的校正效果;并对比上述3种算法的校正效果。图1显示了系统哈特曼-夏克传感器与变形镜驱动器的布局关系,图中的方格表示传感器的位置,黑点表示驱动器的位置,圆表示通光口径。

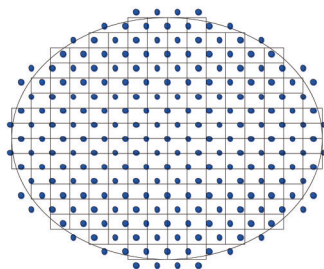


图1 夏克-哈特曼传感器与驱动器配置图

Fig.1 Configuration of Shack-Hartmann wave-front sensor and actuation position

3.1 不带倾斜时的校正效果及对平移的约束能力对比

根据胡诗杰等^[6]提出的限定向量算法,加入(4)式中的限定向量后,复原矩阵 R 、 R^+ 、 R_1 条件数分别为30、122、18246,可见在加入限定向量后,系统复原矩阵的条件数大幅增加。对限定向量算法,直接斜率法及投影抑制算法3种算法的校正情况进行仿真,输入像差为第4阶到第36阶泽尼克多项式的组合像差,闭环后有部分驱动器饱和,以模拟真实系统的校正情况;对闭环控制的参数取 $a=1, b=-0.2$ 进行闭环控制,在闭环过程中限制变形镜的控制电压(实际施加电压放大100倍)在 $\pm 3 \text{ V}$ 之内,超出部分取边界值。取闭环后远场图像的峰值与没有像差时远场图像的峰值之比,即斯特列尔比^[11]作为评价指标。采用3种算法闭环开始后的前100 frame斯特列尔比如图2(a)所示,采用直接斜率法与采用投影抑制算法的算法闭环后均具有稳定的斯特列尔比,而限定向量的算法,由于条件数过大,闭环后斯特列尔比呈现下降趋势,表现出不稳定的特性,表明限定向量算法影响了系统校正的动态特性。研究闭环后变形镜的电压约束情况,表1显示了第100 frame时变形镜电压上(5)式中的抑制向量的残差,采用直接斜率法的算法,由于传感器对变形镜产生的平移探测不灵敏,因此在平移像差的约束即(12)式中的 $S_{g,n+1}$ 上,含有较大的值,此时所有控制电压平均值为 0.59 V ,体现在图2(c)的电压分布上,64%的控制电压分布在 0.7 V 附近;采用限定向量算法,体现在图2(b)的电压分布上,平均电压为 0.26 V ,表1的

结果显示了平移抑制量下降,然而倾斜部分的约束项 $S_{g,n+2}$ 、 $S_{g,n+3}$ 却在增加。而采用投影抑制的算法,相对于其他2种算法,具有更小的抑制残差,其抑制残差是由于电压饱和限压引起的。体现在图2(d)的电压分布上看,采用投影抑制算法,变形镜上抑制了平移像差与倾斜像差的产生,在控制电压分布上,50%的变形镜的控制电压在 ± 0.4 V 范围内,变形镜具有更优的电压分布。仿真结果说明,限定向量算法中限定向量的引入加大了系统的条件数,破坏了系统的动态效果,使系统校正效果不稳定,并且由于积分效应,并没有实现对约束项的完全抑制;而投影抑制算法能够有效地抑制平移的产生,并且不改变远场成像质量。

为改善限定向量算法矩阵的条件数,对限定向量 R_m 乘以系数0.1,此时条件数变为183。图3(a)显示了采用限定向量 R_m 乘以系数0.1(即 $C_p = 0.1, C_x = 0.1, C_y = 0.1$)的算法校正后的效果,尽管在第15 frame时限定向量算法具有高于其他两种算法的斯特列尔比,但依然呈现出不稳定的特性,其斯特列尔比随后持续下降。图3(b)显示了对平移像差的约束的变化趋势,可以看出由于积分的累积效应,第100 frame时对平移像差的约束 $S_{g,n+1}$ 为93.22 V,正在趋近于表1中不加约束的直接斜率法135.93 V,大于表1中限定向量的系数为1时对平移的抑制60.14 V,表明在加入小的系数后,约束条件在变弱。两种情况下的仿真结果表明,约束条件会使系统的斜率残差耦合在一起,过强的约束条件会使校正效果变差,使控制失效;而过弱的约束条件会使系统无法抑制倾斜与平移像差的产生,在经过积分效果的累积后,使约束失效。

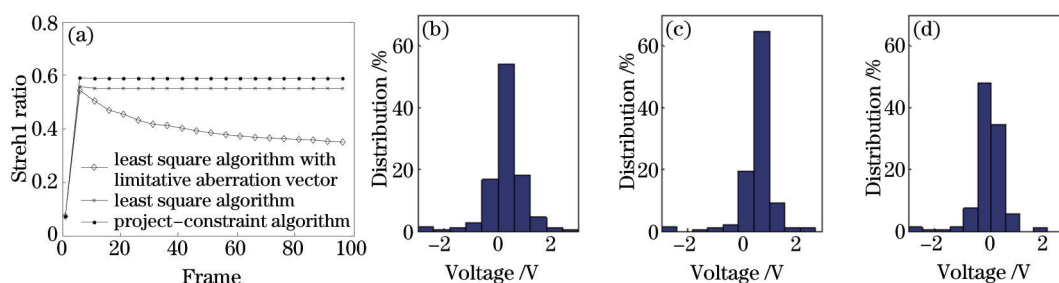


图2 (a)闭环校正后的100 frame斯特列尔比曲线;(b)限定向量算法、(c)直接斜率法与(d)向量投影抑制算法闭环控制100 frame时的控制电压分布

Fig. 2 (a) Strehl ratio of 100 continuous frames from the beginning of close-loop; voltage distribution of 100 continuous frames from the beginning of close-loop using (b)least square algorithm with limitative aberration vector,

(c) least square algorithm and (d) project-constraint algorithm

表1 第100 frame变形镜上的电压约束残差

Table 1 Constraint error of voltage on deformable mirror of the 100th frame

Algorithm	$S_{g,n+1}$	$S_{g,n+2}$	$S_{g,n+3}$
Least square algorithm /V	135.93	-5.02	-7.00
Least square algorithm with limitative aberration vector /V	60.14	17.32	10.08
Project-constraint algorithm /V	1.14	1.03	0.50

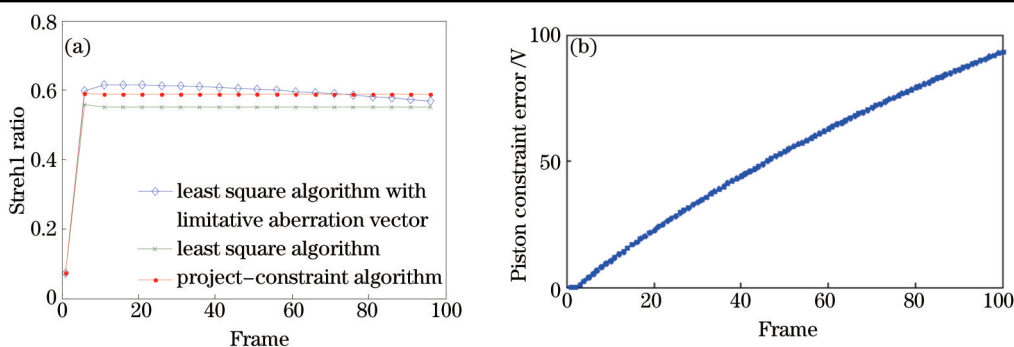


图3 (a)限定向量乘以系数0.1的限定向量算法、直接斜率法与投影抑制算法,闭环校正后的100 frame的斯特列尔比曲线;

(b)变形镜电压的平移抑制误差的变化曲线

Fig.3 (a) Strehl ratio of 100 continuous frames from the beginning of close-loop, the limitative aberration multiplying by the coefficient of 0.1 for the limitative aberration vector,least square algorithm and project-constraint algorithm;

(b) constraint error on piston aberration from the beginning of close-loop

对第4阶至第36阶像差的单阶像差的校正效果进行分析,从图2及图3可以看出,在闭环校正后第10 frame校正效果已经趋于稳定状态,因此对3种算法闭环后第10 frame的斯特列尔比进行分析,图4显示了分别采用3种算法(限定向量算法的系数为0.1)对每阶像差进行校正后第10 frame的斯特列尔比,可以看出,在没有整体倾斜残差并选取合适的限定向量参数的情况下,3种算法的斯特列尔比接近。

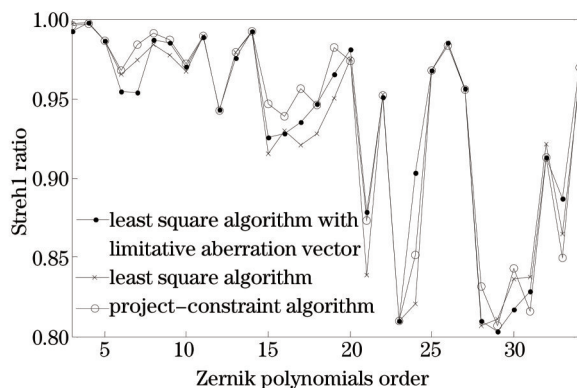


图4 采用限定向量算法(R_m 系数为0.1),直接斜率法与投影抑制算法对第4阶至第36阶泽尼克模式像差闭环控制第10 frame时的校正效果

Fig.4 Correction performance of the 10th frame in close-loop for aberration from the 4th-order to the 36th-order Zernik mode, using least square algorithm with limitative aberration vector (with coefficient R_m of 0.1), least square algorithm and project-constraint algorithm

3.2 带倾斜残差时的像差校正效果及对倾斜的约束能力

对系统中存在整体倾斜残差的情况进行仿真对比分析,分析3种算法对泽尼克多项式第4阶至第36阶的高阶像差的校正能力,其中每一阶的像差中都包含了 X 与 Y 方向的倾斜像差(系数取4),限定向量算法的系数为0.1。图5显示了在有倾斜残差的情况下,采用限定向量的直接斜率法与投影抑制的算法对第4阶至第36阶泽尼克多项式生成的像差校正后的第10 frame时的斯特列尔比曲线,从图5中可以看出,整体倾斜的存在会影响系统对高阶像差的校正效果,采取分离整体倾斜的向量投影抑制算法,其各阶像差校正后的斯特列尔比均高于采用限定向量算法或者采用直接斜率法的斯特列尔比,且与图4中没有整体倾斜残差时校正效果相当;而采用直接斜率法与限定向量算法,其效果相比没有整体倾斜时的校正效果大幅降低。结果表明,直接利用探测系统中的斜率数据,系统中的整体倾斜会对闭环效果造成影响,导致直接斜率法及限定向量的直接斜率法,校正后的斯特列尔比相对于没有倾斜时的斯特列尔比均有下降;而投影抑制算法,对整体倾斜进行了预处理,其校正后的斯特列尔比与不带倾斜残差时的校正效果相当。

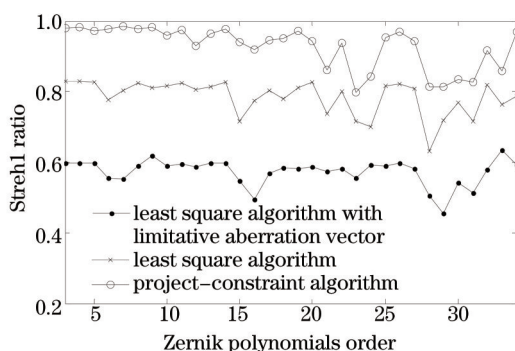


图5 投影抑制算法,直接斜率法与限定向量算法分别对4~36阶的单阶像差(系数取0.7)与 X 、 Y 方向(系数取4)的组合像差校正后的远场图像的斯特列尔比

Fig.5 Strehl ratio of corrected far field image for aberration of each combined 4~36-order Zernik mode (with coefficient of 0.7) with tip/tilt (with coefficient of 4)

将3种算法对倾斜的抑制效果进行分析,图6显示了对第12阶泽尼克多项式与 X 、 Y 方向倾斜组合像差的校正,采用限定向量算法、直接斜率法与投影抑制算法3种算法闭环后远场光斑位置的变化图。其中远场图像接收靶面大小为128 pixel \times 128 pixel,因此远场图像的中心位置为(65 pixel, 65 pixel)。在变形镜完全抑

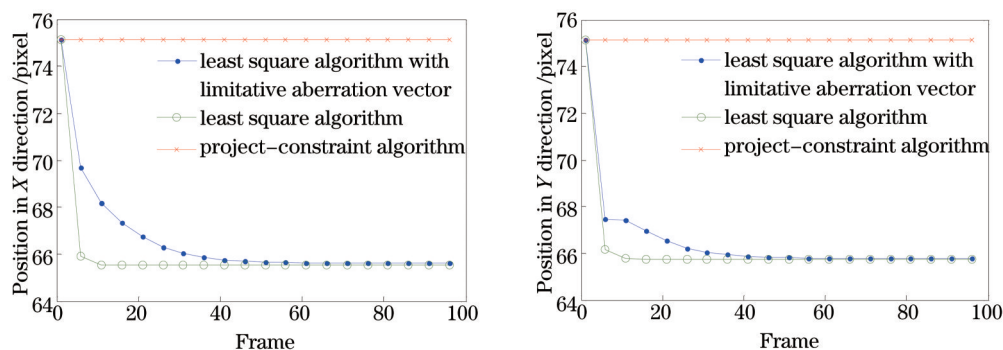


图6 对第12阶泽尼克多项式与整体倾斜组合的像差进行校正,采用限定向量算法、直接斜率法与投影抑制两种算法下远场光斑位置X方向与Y方向变化图

Fig.6 Pixel offsets in X direction and Y direction of corrected far field image for the 12th order Zernik mode aberration combined with tip/tilt, using least square algorithm with limitative aberration vector, least square algorithm and project-constraint algorithm

制倾斜的理想情况下,由于像差的对称性,光斑位置不会变化。从图中可以看出,直接斜率法及限定向量的直接斜率法,其远场的中心位置均发生了变化,由于限定向量的约束作用,限定向量算法校正倾斜像差的偏离速度比直接斜率法慢,但是由于积分的累积作用,变形镜中最终累积了倾斜量的校正,无法实现不校正倾斜量的约束条件,导致了约束条件的失效,变形镜校正了系统中的倾斜量。采用限定向量算法,第100 frame时光斑位置相对于原始位置变化了9.3 pixel的偏移量;而投影抑制算法能实现完全的约束,其校正过程中,光斑位置偏移量小于0.02 pixel。仿真结果表明,采用向量投影抑制算法,尽管在探测系统中去除了整体倾斜的探测,但由于在控制电压上实现了倾斜的约束,结果在获取较高的斯特列尔比的同时,能实现稳定的倾斜约束。

在输入的像差中加入模拟化学激光器中的高频抖动,研究其校正后的效果;其中像差为离焦像差,每两帧之间存在反方向的X与Y方向的倾斜(系数为4)的高频整体倾斜,图7显示了3种算法下,校正后的斯特列尔比的曲线,投影抑制算法具有最高的稳定的斯特列尔比,不受倾斜抖动的影响,限定向量算法与直接斜率法校正后的斯特列尔比均出现抖动,表明这2种算法会受到整体倾斜残差的影响,同时限定向量的加入影响了实际的校正效果;而投影抑制算法始终能获得稳定的斯特列尔比。仿真结果表明,采用像差分离与投影抑制算法能有效地去除高频抖动带来的影响,相比限定向量算法具有更好的对高阶像差的校正效果。

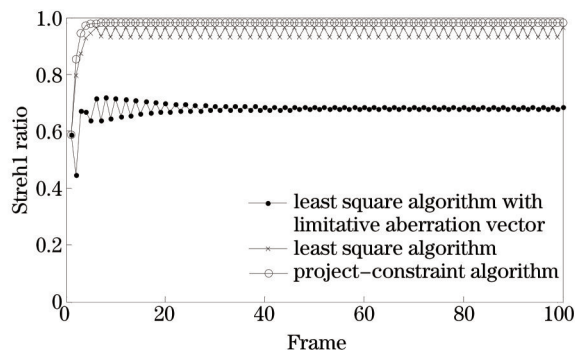


图7 高频抖动的倾斜残差下,限定向量算法、直接斜率法与投影抑制算法对离焦像差校正后的斯特列尔比变化曲线

Fig.7 Strehl ratio of corrected far field image for aberration combined defocus mode with high frequency tip/tilt

after using least square algorithm with limitative aberration vector, least square algorithm and project-constraint algorithm

4 结 论

针对AO闭环控制系统中变形镜的约束问题,分析了限定向量算法的误差及动态特性,仿真结果表明,限定向量因子的大小会影响系统的条件数、校正效果及约束能力;当因子过小时,闭环系统中积分环节会导致约束量残差的累积并最终导致约束失效;而当因子过大时,会导致系统校正效果变差。对系统含有整体倾斜及不含整体倾斜的对比仿真结果表明,系统中的整体斜率会影响系统高阶像差的校正,采用分离像差

及对控制电压进行向量投影抑制的算法,在保持条件数与直接斜率法时不变的情况下,可以消除整体倾斜误差对系统高阶像差校正的影响,在实现高斯特列尔比目标的同时,可以满足对系统约束条件的要求。对前4到36阶泽尼克模式像差的校正效果表明,相比限定向量算法,向量投影抑制算法具有更稳定的控制效果及更优的约束能力。结果表明,向量投影抑制算法能在有效校正高阶像差的同时,实现对变形镜倾斜及平移像差的约束,使自适应光学系统的校正效果不受整体倾斜残差的影响。

参 考 文 献

- 1 Hardy J W. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes[M]. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- 2 Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui, *et al.*. Progress on adaptive optics of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900102.
姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900102.
- 3 Su Yi. Physics problems in high energy laser system[J]. Physics, 2005, 34(8): 583-588.
苏毅. 高能激光系统中的物理问题[J]. 物理, 2005, 34(8): 583-588.
- 4 Liu Zejin, Zhou Pu, Tao Rumao, *et al.*. Analysis of beam combination technology of high power LD pumped laser array[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900113.
刘泽金, 周朴, 陶汝茂, 等. 高能固态激光阵列光束合成技术浅析[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900113.
- 5 Hu Shijie, Xu Bing, Zhang Xuejun, *et al.*. Double-deformable-mirror adaptive optics system for phase compensation[J]. Applied Optics, 2006, 45(12): 2638-2642.
- 6 Hu Shijie, Xu Bing, Wu Jian, *et al.*. Aberration decoupling analysis for double deformable mirrors adaptive optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(12): 1687-1692.
胡诗杰, 许冰, 吴健, 等. 双变形镜自适应光学系统像差解耦研究[J]. 光学学报, 2005, 25(12): 1687-1692.
- 7 Jiang Wenhan, Li Huagui. Hartmann-Shack wave-front sensing and wave-front control algorithm[C]. SPIE, 1990, 1271: 82-93.
- 8 Cai Dongmei, Ti Peipei, Jia Peng, *et al.*. Effects of etch holes on optical properties of micro electro mechanical system deformable mirror[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0612001.
蔡冬梅, 迺培培, 贾鹏, 等. 释放孔对微机电系统变形镜光学性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0612001.
- 9 Wang C, Li M, Wang C, *et al.*. Real time implementing wave-front reconstruction for adaptive optics[C]. SPIE, 2004, 5639: 199-204.
- 10 Chen S, Zhao E, Xu B, *et al.*. A compact multi-core CPU based adaptive optics real-time controller[C]. SPIE, 2014, 9280: 928012.

栏目编辑: 史敏