

自适应光学系统最优模式增益的快速估计方法*

陈克乐¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾ 周家辉¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 韩文雨¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 饶学军¹⁾²⁾郭友明^{1)2)3)4)†} 饶长辉¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

1) (中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

2) (中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

4) (中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

5) (光场调控科学技术全国重点实验室, 成都 610209)

(2023 年 2 月 28 日收到; 2023 年 5 月 11 日收到修改稿)

在自适应光学系统中, 最优模式控制方法首先通过对波前像差进行模式分解, 再分别施加不同带宽的比例积分控制以实现较统一带宽模式控制更优的闭环效果. 最优模式增益通常需要基于自适应光学系统的传递函数模型、实测的扰动和噪声的功率谱密度进行遍历求解获取, 这一过程通常需要较长的时间. 由于大气湍流统计特性的时变性, 所求解的最优模式增益的时效性难以保证. 为此, 本文提出了一种基于二次曲线拟合的最优模式增益快速估计方法, 仅通过 3 个数据点的闭环残差计算来估计单项模式的最优增益. 仿真和实验结果表明, 所提方法可以较准确地求解最优模式增益, 有效抑制高阶波前像差. 同时, 由于算法的时间复杂度降低, 相比于基于参数遍历的方法, 最优模式增益估计过程所花费的时间缩短了约 95.3%, 有利于保证最优模式增益的时效性.

关键词: 自适应光学, 波前控制, 最优模式增益**PACS:** 95.75.Qr, 47.27.Rc, 42.60.Lh**DOI:** 10.7498/aps.72.20230290

1 引言

随着天文观测对成像分辨率要求的提高, 大口径地基望远镜通常都要装备自适应光学 (adaptive optics, AO) 系统^[1–5]. AO 系统一般由波前探测器、波前控制器和波前校正器 3 个部分组成^[6], 波前控制器将波前传感器测量得到的误差信号根据波前相位共轭原理计算生成为波前校正器需要电驱动信号, 进而实现对波前畸变的闭环控制. 因此, AO 系统本质上是一个负反馈闭环控制系统, 波前控制算法对系统的稳定性和像差的补偿能力尤为重要.

经典的比例积分 (proportional and integral, PI) 控制由于控制策略简单、需要调整的参数少、易于工程实现, 是目前 AO 系统中最常用的控制算法. 然而 PI 控制算法多依赖人为经验调试, 控制参数固定且不能够根据扰动的变化自动调整^[7], 无法让 AO 系统的校正能力达到最佳效果^[8,9]. 为此, 学者们提出了针对 PI 控制算法的改进措施. 1994 年, Gendron 和 Léna^[10] 提出了对 Zernike 模式的 PI 增益系数进行优化的控制方法, 并于 1995 年通过实际系统对该算法进行了实验验证^[11], 该方法的核心思路是对每一项 Zernike 模式最优带宽的遍历检索. Dessenne 等^[12,13] 在模式优化控制算法的基

* 国家自然科学基金 (批准号: 12173041, 11733005)、中国科学院青年创新促进会 (批准号: 2020376) 和中国科学院光电技术研究所前沿部署项目 (批准号: C21K002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guoyouming@ioe.ac.cn

基础上利用递归最小二乘法对每一种模式控制回路对应的 PI 控制参数进行迭代, 实现了离线状态下的最优控制. 2016 年, Poyneer 等^[14]将最优模式增益控制算法应用于双子座望远镜对高阶模式的扰动抑制上, 实现了在线的最优模式控制, 但其最优模式增益的估计方法不详. 2020 年, Wang 等^[15,16]通过云南天文台的 1 m 新真空太阳望远镜自适应光学系统数据, 进行了针对振动抑制的线性二次高斯控制和基于参数遍历法的最优模式控制仿真分析. 以上方案或具体方法未知, 或由于计算复杂度、遍历时间较长, 难以在实际工程中有效应对快速时变的大气湍流扰动.

为进一步提升 AO 系统的校正能力, 克服最优增益计算时间延迟造成的有效性下降, 提升天文望远镜的在线观测能力, 本文提出了一种 PI 控制最优增益的快速估计方法. 第 2 节通过对波前 Zernike 模式的复原方法及波前闭环控制残差的功率谱分析方法的介绍, 推演了最优模式增益的二次多项式拟合快速估计方法. 第 3 节根据丽江高美古观测站 1.8 m 自适应望远镜 AO 系统的实测数据, 验证了本文拟合法的准确性及可行性. 第 4 节比较了经典 PI、基于参数遍历法和二次多项式拟合法的最终模式控制在 1.8 m 自适应望远镜实验平台上的实际控制效果, 并对其控制性能进行了评价分析.

2 最优模式控制方法

2.1 波前模式复原方法

波前畸变像差一般可以通过一组正交的二维多项式 (波前模式) 表示, Noll^[17]提出基于单位圆上的 Zernike 多项式描述大气湍流造成的波前相位变化. Zernike 模式法重构波前的本质就是要建立 Zernike 模式与波前传感器测得斜率之间的关系, 即

$$\mathbf{g} = \mathbf{D}\mathbf{a} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

其中, \mathbf{g} 为斜率向量, \mathbf{a} 为 Zernike 模式系数向量, \mathbf{D} 为 Zernike 模式的斜率响应矩阵, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为测量噪声. 进一步, Zernike 模式系数就可以表示为

$$\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{D}^+ \mathbf{g}, \quad (2)$$

其中, \mathbf{D}^+ 为 \mathbf{D} 的广义逆矩阵, 通过求解最小二乘方程组, 就可得到对应模式系数的估计 $\hat{\mathbf{a}}$ ^[18].

2.2 闭环控制残差的功率谱分析方法

大气湍流引入的波前相位变化通常包含整体倾斜和高阶像差. 在 AO 系统控制回路闭环设计中, 具有延时情况下的波前传感器传递函数为

$$h_{\text{wfs}}(f) = \text{sinc}(\pi f T_e) \cdot e^{-i\pi f T_e},$$

积分控制器的传递函数为

$$h_{\text{itc}}(f, a_i) = a_i \cdot \frac{T_e e^{-2i\pi f \tau}}{2i\pi f},$$

其中 T_e 为采样周期, τ 为时间延迟, a_i 为模式系数^[19].

因此, 系统的开环传递函数为

$$h_{\text{ol}}(f, a_i) = h_{\text{wfs}}(f) \cdot h_{\text{itc}}(f, a_i). \quad (2a)$$

系统的误差传递函数的幅值平方表示为

$$H_{\text{cor}}(f, a_i) = \left| \frac{1}{1 + h_{\text{ol}}(f, a_i)} \right|^2. \quad (2b)$$

系统的闭环传递函数的幅值平方表示为

$$H_n(f, a_i) = \left| \frac{h_{\text{ol}}(f, a_i)}{1 + h_{\text{ol}}(f, a_i)} \right|^2. \quad (2c)$$

系统的闭环残余方差 σ^2 为湍流补偿残余方差 σ_{sa}^2 与测量噪声引入的闭环噪声方差 σ_{sn}^2 之和^[20,21], 即

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \sigma_{\text{sa}}^2 + \sigma_{\text{sn}}^2 = \int_0^\infty H_{\text{cor}}(f, a_i) F_a(f) df \\ &+ \int_0^\infty H_n(f, a_i) F_n(f) df, \end{aligned} \quad (2d)$$

其中 F_a 为大气湍流扰动功率谱密度, F_n 为测量噪声功率谱密度. 随着控制带宽的增大, 湍流补偿残余方差 σ_{sa}^2 减小, 但测量噪声方差 σ_{sn}^2 增大, 最终闭环残余方差 σ^2 呈现出先减小后增大的特点. 因此, 理论上每一种模式均可以找寻最优闭环带宽使得 σ^2 最小, 也就是本文中存在的最终增益, 进而实现控制回路闭环校正能力最优.

2.3 最优模式增益的快速估计方法

在实时在线系统中, 对所有的波前模式进行控制参数遍历求解最优理论增益需要较大的时间成本和内存成本, 且随着步长的缩短、检索范围的扩大, 将会给实时处理机带来繁重的计算负担. 为了降低最优模式增益积分 (optimized model gain integrator, OMGI) 控制方法的时间复杂度, 保证系统的有效运行, 本文提出了一种快速寻优的多项式拟合法.

根据望远镜自适应光学控制系统本身的特性,在经典的比例积分控制策略下,若增益系数加载量过小,则系统的调节速度缓慢,无法应对快速时变的大气湍流扰动,体现在波前校正效果微弱,时域误差的均方根 (RMS) 值偏大;而当增益系数过大时,噪声会被更多地引入闭环误差中,同样会使时域误差的均方根 (RMS) 值变差. 图 1 展示了丽江 1.8 m 自适应望远镜系统中随着增益控制系数的变大,第 3, 6, 15, 35 阶 Zernike 模式对应的时域误差 RMS 值的变化曲线.

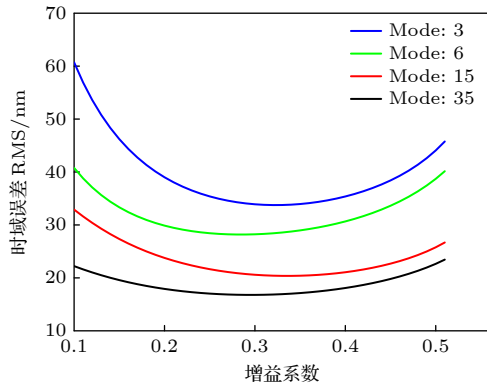


图 1 增益系数与 Zernike 模式时域误差的关系
Fig. 1. Relations between gain and Zernike modal error.

显然,当遍历检索步长足够小时,增益系数与时域误差的关系曲线可以近似成一个关于纵轴对称的二次曲线. 基于二次曲线的特征,若要计算每一阶 Zernike 模式对应的最优增益,便可直接选取 3 个合理的增益系数,并计算其对应的时域误差,通过 3 组数据进行二次多项式拟合,最后计算得到单项 Zernike 模式下的最优增益系数. 而 3 组合理增益系数的选择,需要尽可能保留增益系数与时域误差关系曲线的中心特征和边缘特征. 一般情况下,首先选取 PI 控制的人为经验增益系数 (0.2) 及其时域误差作为拟合曲线中心特征的一组数据,随后基于遍历检索的增益区间 (本文的遍历区间是 0.1—0.5) 与中心特征数据的选择,根据二分法选取另外两组拟合边缘特征 (本文边缘特征增益系数的选择为 0.15, 0.35 及其时域误差) 的数据. 通过二次多项式拟合的方法,实际获取模式最优增益系数仅需要 4 次运算,相比于传统的最优模式增益积分控制策略,大大降低了计算过程中的时间复杂度. 最优模式增益的快速估计执行机制如图 2 所示.

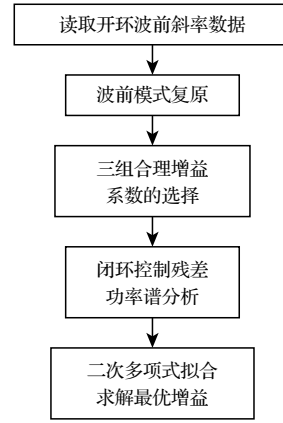


图 2 最优模式增益快速估计流程图
Fig. 2. Fast estimation of optimal modal gain.

3 实验平台与仿真

为了检验二次多项式拟合寻优策略的有效性,以丽江高美古观测站 1.8 m 自适应望远镜自适应光学系统实测数据为例 [22,23], 通过对测量得到的波前斜率数据进行重演仿真来对控制算法进行验证.

1.8 m 自适应望远镜主要由 241 单元变形次镜 (UDSM-241) 和具备 192 个子孔径的夏克-哈特曼波前传感器构成 [24], 通过模式控制法校正前 135 项模式. 图 3 和图 4 分别展示了 UDSM-241 的机械结构以及夏克-哈特曼波前传感器子孔径的分布.

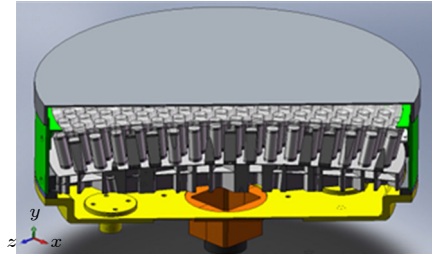


图 3 UDSM-241 结构图
Fig. 3. Sketch of the UDSM-241.

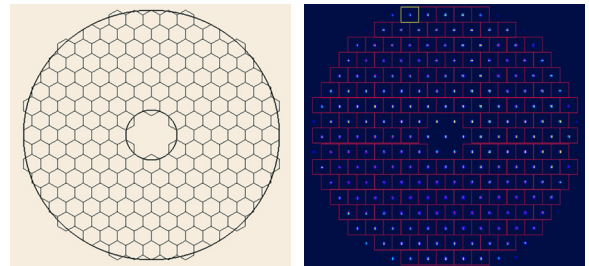


图 4 夏克-哈特曼波前传感器子孔径的分布图
Fig. 4. Sub-aperture layout of the Shack-Hartmann wavefront sensor.

整个重演仿真过程是基于 Intel(R) Core(TM) i7-10875 H CPU@2.30 GHz 的系统进行运算. 使用的数据为 1.8 m 自适应望远镜于 2023 年 1 月 8 日采集的波前斜率数据对, 为了充分体现一段时间内的波前响应特性, 每组数据对中包含 10^4 帧数据, 采样帧频是 2 kHz.

在实际对恒星的观测实验中, 通过试凑法得到的经验控制增益系数为 0.2—0.3. 因此, 本次针对系统开环波前斜率数据的重演仿真, 计算了增益系数在 0.1—0.5 时光学系统的波前误差 RMS 值. 根

据表 1 中的信息可知, 基于人为经验的增益系数设定, 最多可以把该仿真条件下的波前误差 RMS 值抑制到 102.6 nm.

根据 OMGI 控制理论, 以 0.01—0.50 为增益系数的检索范围, 0.01 为步长, 对系统的高阶 Zernike 模式采用参数遍历法获得各项模式对应的最优增益系数及最优控制带宽如图 5 所示, 整个重演仿真用时 7.08 s. 进而根据 2.3 节提出的二次多项式拟合法计算模式的最优增益系数, 其中图 6 给出了第 6, 15, 35, 65 项模式的整体拟合结果. 图 7

表 1 不同增益系数下波前误差 RMS 值对比

Table 1. Comparison of wavefront RMS value with different gain.

增益系数	开环	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
波前误差 RMS/nm	580.4	109.8	102.6	105.9	118.5	151.6

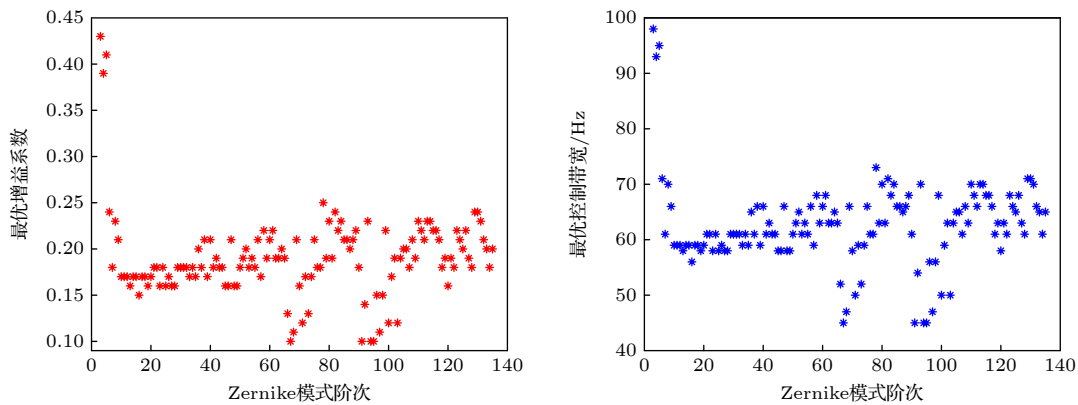


图 5 高阶模式对应的最优增益系数和最优控制带宽 (仿真)

Fig. 5. Optimal gain and control bandwidth of higher-order modes (simulation).

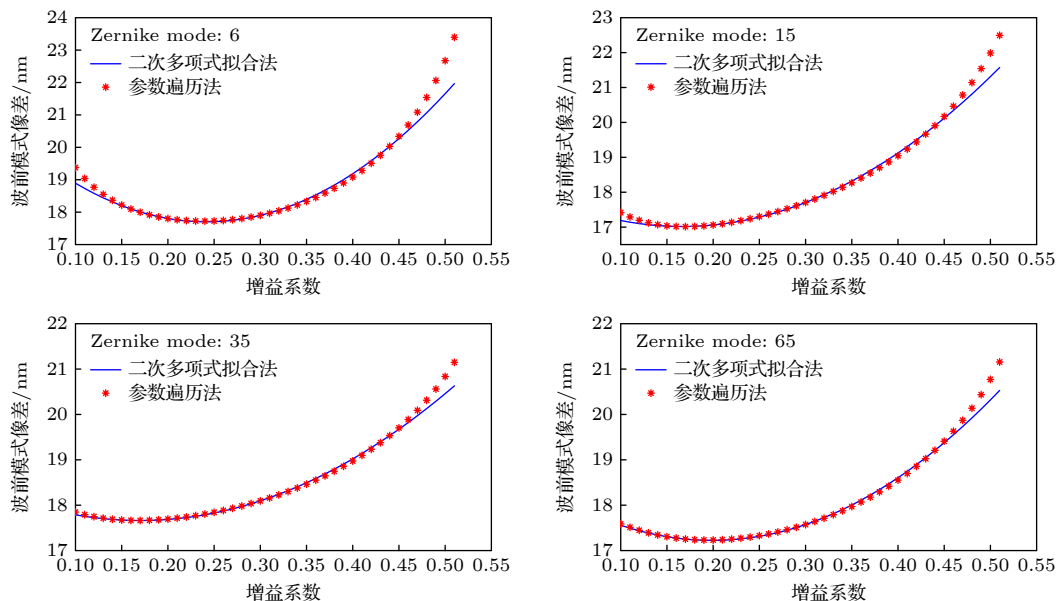


图 6 第 6, 15, 35, 65 项模式的整体拟合结果

Fig. 6. Overall fitting results of models 6, 15, 35 and 65.

为高阶各模式增益系数的拟合对比. 通过二次多项式拟合可以得到与参数遍历极为接近的增益系数, 而改进后的寻优过程仅耗时 0.33 s, 控制计算时间缩短了约 95.3%. 对比两者校正后的静态像差, 其中参数遍历法的结果为 99.7 nm, 二次多项式拟合法为 99.8 nm. 结果表明, 本文提出的二次多项式拟合法在极大程度缩短了运算时间的同时, 保证了波前像差的校正精度.

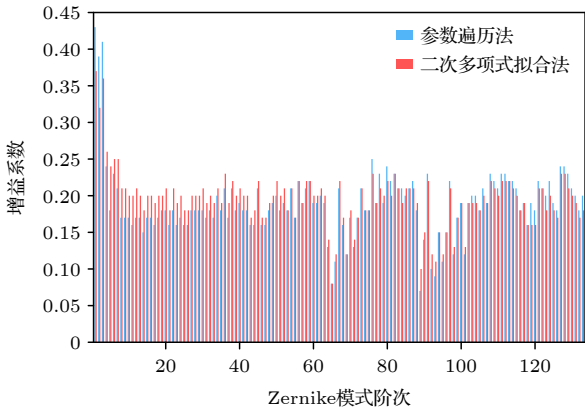


图 7 高阶各项模式最优增益系数的拟合对比 (仿真)
Fig. 7. Comparison of optimal gain of higher-order modes (simulation).

4 实验结果与数据分析

基于以上的理论分析和仿真结果, 本节将 3 种增益系数的获取方案实际应用于 1.8 m 自适应望远镜的 AO 系统中, 并对其控制性能进行评价. 首先利用波前传感器的测量值和实时处理机对变形次镜波前信息的统计值, 估计大气视宁度. 随后根据闭环波前斜率数据对系统的高阶回路校正性能实施了对比计算.

实验于 2023 年 1 月 11 日 21 点左右开展, 由于需要避免低阶倾斜模式的振动误差和高阶模式存在的模态耦合误差, 因此视宁度的估计实际上拟合了 3—15 阶开环 Zernike 模式的方差. 从图 8 可以得知, 实验过程中的大气相干长度 r_0 约为 3.3 cm, 大气湍流较强, 观测环境较为恶劣. 图 9 给出了在该实验条件下, 通过参数遍历法获取的 3—135 项 Zernike 模式的最优增益系数及最优控制带宽. 图 10 展示了参数遍历法与本文方法的高阶各模式增益系数拟合对比.

图 11(a) 为系统在开环、增益系数为 0.2、通过参数遍历法和二次多项式拟合法加载各模式增益

系数对应的平均 Zernike 模式功率谱密度 (power spectral density, PSD) 曲线对比图; 图 11(b) 是其对应的累计功率谱密度 (cumulated power spectral density, CPSD) 曲线的对比. 其中开环高频部分的能量衰减服从指数为 $-8/3$ 的幂律, 在测量噪声的影响下, PSD 曲线的波动在 700 Hz 后趋于稳定, 此部分的噪声可以等效成白噪声的影响.

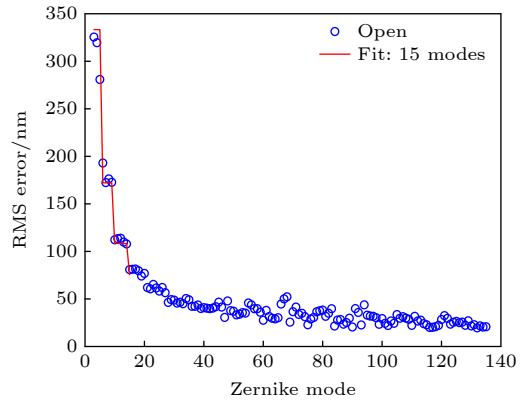


图 8 Zernike 模式波前像差及大气相干长度 $r_0 = 3.3$ cm
Fig. 8. Zernike wavefront error and atmospheric coherence length $r_0 = 3.3$ cm.

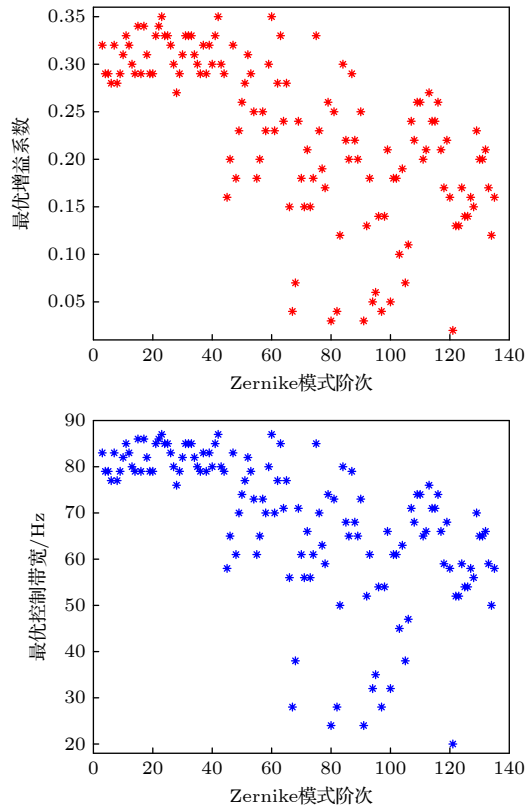


图 9 高阶模式对应的最优增益系数和最优控制带宽 (实验)
Fig. 9. Optimal gain and control bandwidth of higher-order modes (experiment).

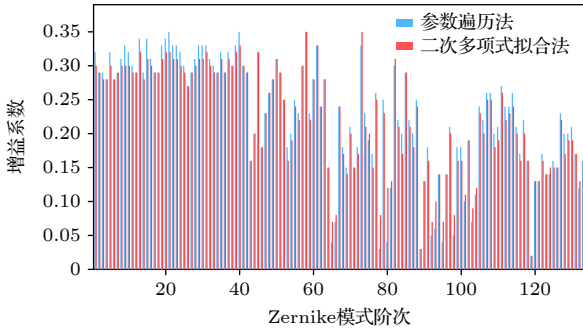


图 10 高阶各项模式最优增益系数的拟合对比(实验)
Fig. 10. Comparison of optimal gain of higher-order modes (experiment).

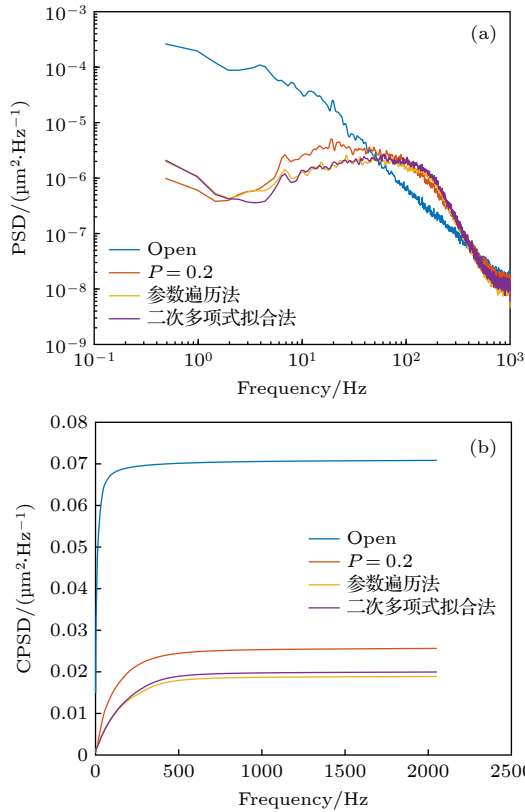


图 11 PSD 曲线 (a) 和 CPSD (b) 曲线对比
Fig. 11. Comparison of PSD (a) curves and CPSD (b) curves.

图 12 展示了系统波前传感器的采样帧频为 2 kHz 时, 增益系数为 0.2、参数遍历增益系数控制与二次多项式拟合增益系数控制对应的误差传递函数曲线. 从这 3 条曲线与 0 dB 线的交叉频率来看, 增益系数为 0.2 时的抑制带宽约为 72 Hz, 而后两种方法的抑制带宽接近 98 Hz, 略高于人为经验设置的增益系数为 0.2 时的控制方案.

图 13 是系统开环与 3 种控制方案动态波前像差 RMS 值的比较, 在 AO 系统处于开环状态时, 系统的平均动态波前像差 RMS 值为 800.1 nm; 当

AO 系统在增益系数为 0.2 的状态下闭环时, 系统的平均动态波前像差 RMS 值可校正到 294.2 nm, 用参数遍历与二次多项式拟合计算的增益系数闭环分别能使平均波前像差 RMS 值减小到 216.6 nm 和 228.2 nm.

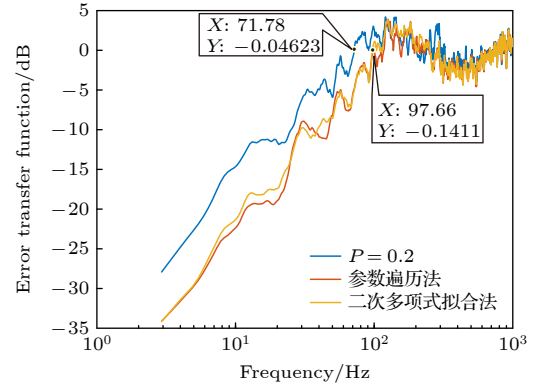


图 12 误差传递函数曲线对比
Fig. 12. Comparison of error transfer function curves.

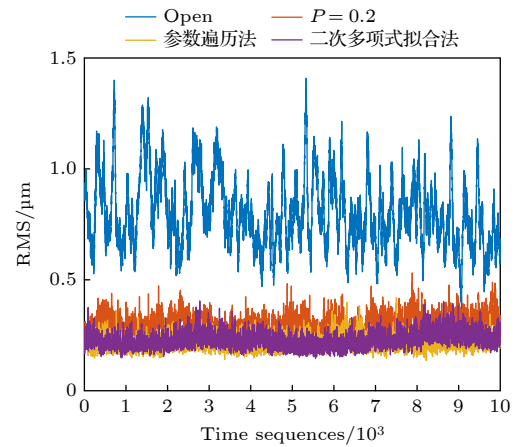


图 13 高阶波前像差 RMS 值的比较
Fig. 13. Comparison of RMS values of higher-order wavefront aberration.

以上结果表明, 在同样的大气环境下, 参数遍历法与本文提出的二次多项式拟合法求解得到的增益系数较传统 PI 控制在校正力上均有显著的提升, 同时由于二次多项式法相较于参数遍历法的计算用时极大程度缩短, 更容易满足望远镜对实时性的需求.

5 结 论

本文针对在 AO 系统上应用最优模式增益控制算法性能受限的问题, 根据 AO 系统的波前复原

方法以及对波前闭环控制残差的功率谱分析,设计了一种最优模式增益快速估计的方法,该方法可以较为准确地拟合所有项 Zernike 模式的最优增益.通过在丽江 1.8 m 自适应望远镜平台上的仿真实验,所提方法在校正能力方面相比于传统 PI 控制算法有大幅提升,可以获得更高的控制带宽.同时,相比于最优模式增益遍历算法,极大程度地节约了控制运算的时间开销,对于控制模式较多的 AO 系统十分有利(对于未来千单元级以上的 AO 系统,本文提出的方法对最优增益更新速度可到秒级,而遍历法只能实现分钟级).

参考文献

- [1] Jiang W H 2018 *Opto. Electron. Eng.* **45** 7 (in Chinese) [姜文汉 2018 *光电工程* **45** 7]
- [2] Rao C H, Zhu L, Zhang L Q, Rao X J, Bao H, Kong L, Guo Y M, Zhong L B, Ma X A, Li M, Wang C, Zhang X J, Fan X L, Wang X Y, Fan M W, Chen D H, Feng Z Y 2018 *Opto. Electron. Eng.* **45** 22 (in Chinese) [饶长辉, 朱磊, 张兰强, 饶学军, 鲍华, 孔林, 郭友明, 钟立波, 马学安, 李梅, 王成, 张小军, 樊新龙, 王晓云, 凡博文, 陈东红, 冯忠毅 2018 *光电工程* **45** 22]
- [3] Rao C H, Gu N T, Rao X J, et al. 2020 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **63** 109631
- [4] Luo Q, Huang L H, Gu N T, Rao C H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094201
- [5] Guo Y M, Zhong L B, Min L, Wang J Y, Wu Y, Chen K L, Wei K, Rao C H 2022 *Opto-Electron. Adv.* **5** 200082
- [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] Li X Y, Jiang W H, Wang C H, Xian H 2001 *Acta Opt. Sin.* **21** 283 (in Chinese) [李新阳, 姜文汉, 王春红, 鲜浩 2001 *光学学报* **21** 283]
- [8] Yan Z J, Li X Y, Rao C H 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0101003 (in Chinese) [颜召军, 李新阳, 饶长辉 2011 *光学学报* **31** 0101003]
- [9] Yan Z J, Li X Y, Rao C H 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0301002 (in Chinese) [颜召军, 李新阳, 饶长辉 2013 *光学学报* **33** 0301002]
- [10] Gendron E, Léna P 1994 *Astron. Astrophys.* **291** 337
- [11] Gendron E, Léna P 1995 *Astron. Astrophys. Suppl. S.* **111** 153
- [12] Dessenne C, Madec P Y, Rousset G 1997 *Opt. Lett.* **22** 1535
- [13] Dessenne C, Madec P Y, Rousset G 1998 *Appl. Opt.* **37** 4623
- [14] Poyneer L A, Palmer D W, Macintosh B, et al. 2016 *Appl. Opt.* **55** 323
- [15] Wang J Y, Guo Y M, Kong L, Zhang L Q, Gu N T, Chen K L, Rao C H 2020 *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **496** 5126
- [16] Wang J Y, Guo Y M, Kong L, Chen K L, Rao C H 2020 *Laser & Optoelectr. Pro.* **57** 230101 (in Chinese) [王佳英, 郭友明, 孔林, 陈克乐, 饶长辉 2020 *激光与光电子学进展* **57** 230101]
- [17] Noll R 1976 *J. Opt. Soc. Am. A* **66** 207
- [18] Gao W W, Shen J C, Li B M, Liang C 2010 *Spectrosc. Spect. Anal.* **30** 2232 (in Chinese) [高玮玮, 沈建新, 李邦明, 梁春 2010 *光谱学与光谱分析* **30** 2232]
- [19] Guo Y M, Ma X Y, Rao C H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 069502 (in Chinese) [郭友明, 马晓燮, 饶长辉 2014 *物理学报* **63** 069502]
- [20] Rao C H, Jiang W H 1996 *High Power Laser Partic. Beams* **8** 469 (in Chinese) [饶长辉, 姜文汉 1996 *强激光与粒子束* **8** 469]
- [21] Li X Y, Jiang W H 2000 *Acta Opt. Sin.* **20** 1328 (in Chinese) [李新阳, 姜文汉 2000 *光学学报* **20** 1328]
- [22] Wei K, Zhang X J, Xian H, Ma W L, Zhang A, Zhou L C, Guan C L, Li M, Chen D H, Chen S Q, Liao Z, Rao C H, Zhang Y D 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 1019
- [23] Guo Y M, Zhang A, Fan X L, Rao C H, Wei L, Xian H, Wei K, Zhang X J, Guan C L, Li M, Zhou L C, Jin K, Zhang J B, Deng J J, Zhou L F, Chen H, Zhang X J, Zhang Y D 2016 *Opt. Lett.* **41** 5712
- [24] Guo Y M, Wu Y, Li Y, Rao X J, Rao C H 2022 *MNRAS* **510** 4347

Fast estimation method of optimal modal gain for adaptive optical system*

Chen Ke-Le¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾ Zhou Jia-Hui¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ Han Wen-Yu¹⁾²⁾³⁾⁴⁾Rao Xue-Jun¹⁾²⁾ Guo You-Ming^{1)2)3)4)†} Rao Chang-Hui¹⁾²⁾³⁾⁴⁾1) (*Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)2) (*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)4) (*School of Electronic, Electrical and Commutation Engineering, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)5) (*National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chengdu 610209, China*)

(Received 28 February 2023; revised manuscript received 11 May 2023)

Abstract

In an adaptive optical system, the optimal modal control method refers to applying proportional integral control of different bandwidths to the wavefront aberrations after modal decomposition to achieve better closed-loop results than the unified bandwidth modal control. The optimal modal gain usually needs to be obtained by ergodic solution based on the transfer function model of the adaptive optical system, the measured disturbance power spectral density, and the noise power spectral density, which usually takes a long time. Owing to the time-varying statistical characteristics of atmospheric turbulence, it is difficult to ensure the timeliness of the optimal modal gain. Therefore, we propose a method of fast estimating optimal modal gain based on quadratic polynomial fitting. In the method, it is only necessary to choose three reasonable gain coefficients and calculate their corresponding closed-loop residual errors respectively in order to estimate the optimal gain of single mode. The simulated slope data used in this work are cited from Lijiang 1.8 m adaptive telescope system, which consists of a 241-unit deformable secondary mirror and a Shaker-Hartmann wavefront sensor with 192 sub-apertures, with the first 135-order modes corrected by modal method. Our experiment is to test directly on-line on this system. The results show that under the same atmospheric environment, the proposed method can accurately estimate the optimal modal gain in a very short time and effectively suppress the high-order wavefront aberration. At the same time, owing to the reduced time complexity of the algorithm, the improved optimal modal gain estimation method takes only 0.33 s. Comparatively, it will take 7.08 s to obtain the optimal modal gain coefficient by using the parameter traversal method. Therefore the time spent on obtaining the optimal modal gain is shortened by about 95.3%, which is easier to meet the real-time requirements of the telescope, and beneficial to the adaptive optics system with more high-order modes. For the future adaptive optics system with more than one-thousand units, the proposed method can update the optimal gain to the second level, while the traversal method can only reach the minute level.

Keywords: adaptive optics, wavefront control, optimal modal gain

PACS: 95.75.Qr, 47.27.Rc, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.72.20230290

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12173041, 11733005), the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. 2020376), and the Frontier Research Fund of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. C21K002).

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

自适应光学系统最优模式增益的快速估计方法

陈克乐 周家辉 韩文雨 饶学军 郭友明 饶长辉

Fast estimation method of optimal modal gain for adaptive optical system

Chen Ke-Le Zhou Jia-Hui Han Wen-Yu Rao Xue-Jun Guo You-Ming Rao Chang-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 139502 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230290

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230290>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种结合图像复原技术的自适应光学系统控制方法

A method of controlling adaptive optical system combined with image restoration technology

物理学报. 2020, 69(6): 068701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191536>

基于瀑布型多重网格加速的复指数波前复原算法

Complex exponential reconstruction algorithm accelerated by cascadic multigrid method

物理学报. 2019, 68(10): 104209 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182137>

人造钠信标角度非等晕性的实验研究

Experimental investigation of angular anisoplanatism for sodium beacon

物理学报. 2018, 67(9): 099501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172686>

基于直角锥面变形镜的薄管激光光束质量提升新方法

Novel method of improving beam quality of thin-wall tube laser based on right-angle cone deformable mirror

物理学报. 2021, 70(17): 179501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210603>

基于物理信息神经网络的光斑质心计算

Calculation of spot centroid based on physical informed neural networks

物理学报. 2022, 71(20): 200601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220670>

用于超快束匀滑的动态波前调控新方案

Novel dynamic wavefront control scheme for ultra-fast beam smoothing

物理学报. 2018, 67(17): 174206 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172527>