

基于自适应光学技术的太阳光栅光谱仪的 像差校正方法研究

郑联慧^{1,2,3,4} 顾乃庭^{1,4} 饶长辉^{1,4} 邱 琪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 610054

³中国科学院大学, 北京 100049

⁴中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

摘要 太阳光栅光谱仪是研究太阳大气分层结构特性的重要仪器,其性能受到大气扰动及系统装配误差等引入的波前像差的限制,需要采用自适应光学进行校正。由于光栅光谱仪中的狭缝对波前像差的滤波作用,使得传统自适应光学无法直接用于光栅光谱仪中。研究了狭缝对自适应光学技术波前校正能力的影响,提出了一种基于狭缝滤波灵敏度的差别校正方法并进行了数值模拟仿真分析。数值仿真结果表明:自适应光学校正后,由像差引起的光谱分辨率衰减量总体上优于1%,从而说明了该校正方法能有效地抑制大气扰动和系统静态像差所引起的光谱展宽,从而提高了光谱分辨率。自适应光学校正后能够有效地提高能量利用率 η ,当狭缝宽度为3倍艾里斑直径时, η 由校正前的约20%提高到了90%以上。

关键词 遥感; 光栅光谱仪; 大气湍流; 狭缝滤波; 自适应光学

中图分类号 O433.1; TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0812002

Study on the Aberration Correction Method of Solar Grating Spectrometer Based on Adaptive Optics

Zheng Lianhui^{1,2,3,4} Gu Naiting^{1,4} Rao Changhui^{1,4} Qiu Qi²

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

²School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

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

⁴Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract Grating spectrometer is one of important tool to study the thermodynamics properties of the solar atmosphere with different height distributions, but its imaging performance will be limited by the wavefront aberration generated by atmospheric turbulence and optical system adjusting errors and so on, so daptive optics (AO) is needed to compensate the influence of the wavefront aberration. However, the traditional adaptive optics can not be directly applied in the grating spectrometer, since the tiny slit will filter the wavefront aberration to a certain extent. The influence of filter slit on the adaptive optics correction is studied. A differential correction method based on the sensitivity of the filter slit is proposed and the numerical simulation is conducted. The results show that after the adaptive optics correction, the spectral resolution is notably improved, and also the energy utilization η is considerably improved, better than 90% with a slit width of 3 times diameter of Airy spot.

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(11178004)

作者简介: 郑联慧(1984—),男,博士研究生,主要从事太阳光谱仪器和自适应光学方面的研究。

E-mail: zhenglianhui2010@sina.com

导师简介: 饶长辉(1971—),男,博士,研究员,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: chrhao@ioe.ac.cn(通信联系人)

Key words remote sensing; grating spectrometer; atmospheric turbulence; filter slit; adaptive optics

OCIS codes 120.4820; 220.4830; 280.4788

1 引 言

太阳磁场是导致太阳大气爆发的根本原因,如太阳黑子、米粒、耀斑及日冕物质抛射等^[1-2]。它们不仅具有非常精细的结构,大约对应于0.1"的空间分辨率,而且还具有高度动态的衍化特性^[3]。尽管对这些精细的动态结构进行了长期的观测,然而由于目前观测仪器分辨率比较有限,这些动态精细结构的物理本质至今尚未被清楚地认识^[4]。为了研究这些精细结构的基本物理反应过程,通常通过确定这些物理反应过程中热力学参数来实现,如磁场、温度、压强、元素丰度等^[5]。而太阳光栅光谱仪是实现这一目标的重要仪器。

太阳光栅光谱仪作为地基式太阳望远镜重要的后端仪器之一,其光谱成像性能严重地受大气湍流引起的动态波前像差和光学系统中的静态像差的影响^[6-7]。波前像差不仅会导致像抖动,从而无法对太阳进行跟踪观测,还会降低光栅光谱仪的光谱分辨率和能量利用率,从而降低了光谱数据的信噪比和时间分辨率。经过多年的研究和发展,自适应光学(AO)技术已经成为校正大气湍流引起的动态波前像差的有效手段^[8-10]。因此通常在太阳望远镜系统集成自适应光学系统,以抑制大气湍流对太阳望远镜系统成像性能的影响。

然而自适应光学系统之后剩余的望远镜系统和光谱仪系统的装调误差并无法通过自适应光学系统进行校正。由于位于光学系统焦点上的针孔会对波前有一定的滤波作用^[11-12],同理,光栅光谱仪的狭缝很小,也会对波前有一定程度的滤波作用。这就使得传统的自适应光学系统无法直接用于光谱仪系统的像差校正。因此定量的分析狭缝滤波对不同类型、不同大小像差的灵敏度,以及对自适应校正的影响具有重要意义。目前尚未发现对此问题的相关报道,而本文对此做了深入的研究,提出了一种基于狭缝滤波灵敏度的差别校正方法并进行了数值模拟仿真分析。

2 狭缝滤波影响分析

2.1 狭缝滤波后波前像差对 κ 和 η 的影响

光谱分辨率是太阳光栅光谱仪的基本性能参数之一,定义如下:

$$\Delta\lambda = \lambda/w_g \sigma m, \quad (1)$$

式中 λ 是波长, w_g 是被照明的光栅宽度, σ 是刻槽密度, m 是光栅的衍射级次。

实际上,实际的光谱分辨率是根据瑞利准则来加以确定的^[13]。然而波前像差会导致光谱展宽,从而降低光栅光谱仪的光谱分辨率,为了更直接地表示像差对光谱分辨率的衰减, κ 定义如下:

$$\kappa = \frac{\Delta\lambda_\varphi - \Delta\lambda_0}{\Delta\lambda_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中 $\Delta\lambda_\varphi$ 是受像差影响的光谱分辨率, $\Delta\lambda_0$ 是无像差影响时的光谱分辨率, κ 表示由像差影响而引起的光谱分辨率相对衰减量。

另一方面,像差导致了能量衰减,定义如下:

$$\eta = \frac{\int_0^{w_s} \int_0^{l_s} I_\varphi(x,y) dx dy}{\int_0^{w_s} \int_0^{l_s} I_0(x,y) dx dy} \times 100\%, \quad (3)$$

式中 $I_\varphi(x,y)$ 和 $I_0(x,y)$ 分别为有像差影响时的能量和无像差影响时的能量, w_s 和 l_s 分别表示狭缝的宽度和长度,任意的波前 φ 均可用Zernike多项式表示^[14],即 $\varphi(Rr,\theta) = \sum_{j=0}^N a_j Z_j(r,\theta)$,其中, j 为第 j 阶Zernike多项式, N 为总的Zernike多项式阶数, a_j 为第 j 阶Zernike系数, Z_j 为第 j 阶Zernike多项式, R 为孔径的半径, r 为归一化的孔径半径, θ 为矢量 \mathbf{r} 与 x 轴的夹角。

像差对谱线的影响^[2]表示如下:

$$O(\lambda) = I(\lambda) \otimes h(\lambda), \quad (4)$$

式中 $O(\lambda)$ 和 $I(\lambda)$ 分别为实际观测到的光谱谱线和真实的光谱谱线, $h(\lambda)$ 为系统对谱线的调制作用, \otimes 为卷

积算子。由(4)式可知,实际观测到的谱线是真实谱线与系统对谱线调制作用的卷积。

与传统光学系统不同,光栅光谱仪的狭缝宽度很小,因此会对波前像差进行一定程度的滤波,狭缝滤波系统如图1所示。针孔位于望远镜的焦点位置,便实现了低通滤波。滤波后进入光栅光谱仪。

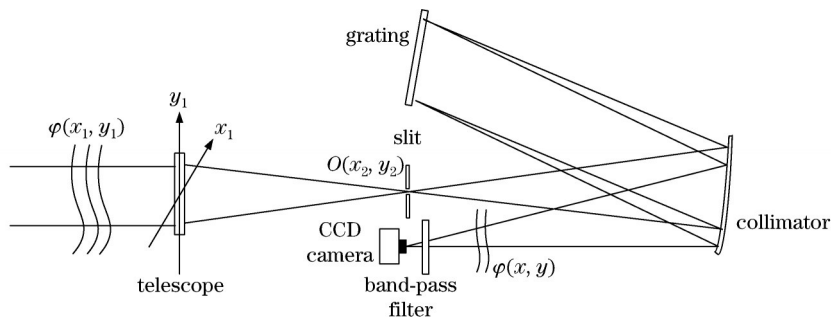


图1 狭缝滤波系统示意图

Fig.1 Diagram of the filter of the slit

望远镜系统的点扩展函数表示如下:

$$h_{tel}(x, y) = \left| \mathcal{F} \left\{ A_1 \exp[i\varphi(x_1, y_1)] \right\} \right|^2, \quad (5)$$

式中 A_1 和 $\varphi(x_1, y_1)$ 分别为振幅和波前像差, $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 为傅里叶变换算子。

根据光学原理,经过狭缝滤波后,

$$h_s(x_2, y_2) = \left| \mathcal{F} \left\{ A_1 \exp[i\varphi(x_1, y_1)] \right\} \text{sinc}(x_2/w_s) \text{sinc}(y_2/l_s) \right|^2, \quad (6)$$

式中 $\text{sinc}(x_2/w_s)$ 和 $\text{sinc}(y_2/l_s)$ 分别表示如下:

$$\text{sinc}(x_2/w_s) = \begin{cases} 1, & |x_2| \leq 0.5w_s \\ 0, & \text{others} \end{cases},$$

$$\text{sinc}(y_2/l_s) = \begin{cases} 1, & |y_2| \leq 0.5l_s \\ 0, & \text{others} \end{cases}.$$

由(6)式可知,随着 w_s 和 l_s 的减小,波前的相位起伏减小。考虑极限情况,当 w_s 和 l_s 趋于零时, $\text{sinc}(x_2/w_s)\text{sinc}(y_2/l_s)$ 将趋于 1,此时经过狭缝滤波后得到一个平面波。

整个光学系统的点扩展函数表示如下:

$$h(x, y) = h_s(x, y) \otimes h_{sp}(x, y) = \mathcal{A} \left\{ \left| \mathcal{F} \left\{ A_1 \exp[i\varphi(x_1, y_1)] \right\} \right|^2 \right\} \otimes \left| \mathcal{F} \left\{ A \exp[i\varphi(x, y)] \right\} \right|^2, \quad (7)$$

式中 $\varphi(x, y)$ 为望远镜系统和光谱仪系统的波前像差, $\mathcal{A}\{\cdot\}$ 为成像函数。

设沿 x 坐标方向为光栅的色散方向,根据线色散的定义,则坐标与谱线的对应关系如下:

$$x = D_1 \lambda, \quad (8)$$

式中 D_1 为光栅光谱仪的线色散。

像差对光谱谱线的调制作用 $h(\lambda)$ 表示如下:

$$h(\lambda) = \int h(x, y) dy_{|x=D_1\lambda} = \int \mathcal{A} \left\{ \left| \mathcal{F} \left\{ A_1 \exp[i\varphi(x_1, y_1)] \right\} \right|^2 \text{sinc}(x/w_s) \text{sinc}(y/l_s) \right\} \otimes \left| \mathcal{F} \left\{ A \exp[i\varphi(x, y)] \right\} \right|^2 dy_{|x=D_1\lambda}. \quad (9)$$

此时观测到的光谱谱线表示如下:

$$O(\lambda) = I(\lambda) \otimes h(\lambda) = I(\lambda) \otimes \int \mathcal{A} \left\{ \left| \mathcal{F} \left\{ A_1 \exp[i\varphi(x_1, y_1)] \right\} \right|^2 \text{sinc}(x/w_s) \text{sinc}(y/l_s) \right\} \otimes \left| \mathcal{F} \left\{ A \exp[i\varphi(x, y)] \right\} \right|^2 dy_{|x=D_1\lambda}. \quad (10)$$

设 λ_+ 和 λ_- 是 $O(\lambda) = 0.5P$ 的两个实数解,其中, P 为 $O(\lambda)$ 的最大值,则无像差影响时, $\Delta\lambda$ 表示如下:

$$\Delta\lambda = \lambda_+ - \lambda_-. \quad (11)$$

当有像差影响时, $\Delta\lambda_\varphi$ 表示如下:

$$\Delta\lambda_\varphi = \lambda_{+\varphi} - \lambda_{-\varphi}, \quad (12)$$

式中 $\lambda_{+\varphi}$ 和 $\lambda_{-\varphi}$ 分别表示波前像差 $\varphi \neq 0$ 时,半峰全宽的两个实数解。

因此,像差对光谱分辨率的影响表示如下:

$$\kappa = \frac{(\lambda_{+\varphi} - \lambda_{-\varphi}) - (\lambda_+ - \lambda_-)}{\lambda_+ - \lambda_-} \times 100\% . \quad (13)$$

另一方面,像差的存在会引起能量利用率的衰减表示如下:

$$\eta = \int \frac{h(x,y)_{\varphi \neq 0}}{h(x,y)_{\varphi = 0}} dx dy. \quad (14)$$

2.2 基于狭缝滤波灵敏度的差别校正方法

对于一个特定太阳光栅光谱成像装置而言,能就不同类型像差对光谱展宽的影响进行定量分析,根据各自敏感程度确定太阳自适应光学系统波前校正权重;假设采用 Zernike 多项式表示波前像差,当波前场均方根(RMS)取单位大小时,第 1~N 阶 Zernike 波前像差引起的太阳光栅光谱成像装置光谱轮廓的展宽程度表示为向量 $\beta = [\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_{N-1}, \beta_N]$;狭缝对不同类型像差的滤波效果也存在差异,对于特定宽度狭缝而言,当对不同类型像差 RMS 取单位大小时,其对不同类型像差滤波引起太阳光栅光谱成像装置光谱轮廓的展宽程度表示为向量 $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_{N-1}, \alpha_N]$;因此,根据 β 和 α 得出不同类型像差对太阳光栅光谱成像装置光谱轮廓展宽程度表示为向量 $\gamma = [\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_{N-1}, \gamma_N]$,

$$\gamma_i = \beta_i \times \alpha_i, \quad (15)$$

式中 $1 \leq i \leq N$;根据狭缝对不同类型像差滤波效果存在的差异性,其引起的太阳光栅光谱成像装置光谱轮廓的展宽程度也不同,因此在使用自适应光学进行波前校正时,对不同类型像差取不同的校正权重因子,表示为向量 $\xi = [\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_{N-1}, \xi_N]$,且满足

$$\xi_1 + \dots + \xi_N = 1. \quad (16)$$

设此时波前探测器探测到的波前像差为 Φ ,其被分解为各阶 Zernike 像差的组合,即

$$\Phi = \sum_{j=1}^N a_j \times Z_j, \quad (17)$$

式中 Z_j 表示第 j 阶 Zernike 多项式, a_j 为 Z_j 的 Zernike 系数;由(16)式和(17)式组成为新的待校正波前 Φ' ,即

$$\Phi' = \sum_{j=1}^N \xi_j \times a_j \times Z_j. \quad (18)$$

2.3 基于狭缝滤波灵敏度差别校正权值的确定方法

选择性校正的权重因子确定方法如下:设波前像差由 M 阶 Zernike 多项式组成,当 $\kappa \leq \delta$ (δ 为像差容差)时对应的各阶 Zernike 系数为 ρ_i 。由于一个实际的波前是由多种像差随机组成,不妨设一个随机波前是由 N 阶 Zernike 像差组成,且 $N \leq M$ 。则当 $\kappa \leq \delta$ 时所对应的波前可表示为

$$\Phi_\kappa = \sum_{j=1}^N \sigma_j \times Z_j, \quad (19)$$

式中 σ_j 为当 $\kappa \leq \delta$ 时所对应的波前所对应的 Zernike 系数,

$$\sigma_j = \begin{cases} \frac{\rho_j}{\sum_{j=1}^N \rho_j}, & |\rho_j| \geq 0.01 \\ \rho_j, & \text{others} \end{cases} .$$

此时待校正波前表示如下:

$$\Delta\Phi_\kappa = \Phi - \Phi_\kappa = \sum_{j=1}^N a_j \times Z_j - \sum_{j=1}^N \sigma_j \times Z_j. \quad (20)$$

3 数值模拟仿真

3.1 像差容差要求

像差容差 δ 用于衡量所能接受的最大光谱分辨率衰减量,即当 $\kappa \leq \delta$ 时,像差对光谱分辨率和能量利用率的影响可忽略。当斯特列尔比优于90%时,经过数值计算得 $\kappa \leq 2\%$,即像差容差 $\delta=2\%$ 。

3.2 像差对 κ 的影响

为了验证像差对光谱分辨率和能量利用率的影响,进行了模拟实验,波前像差用Zernike多项式来表示,像差分别为1~36阶像差。设真实的谱线 $I(\lambda)$ 为高斯分布,不妨设其均值和方差分别为0和0.31,数值模拟结果如图2所示。结果表明:不同类型像差对 κ 的影响不同,并且都随着像差的增大而增大。

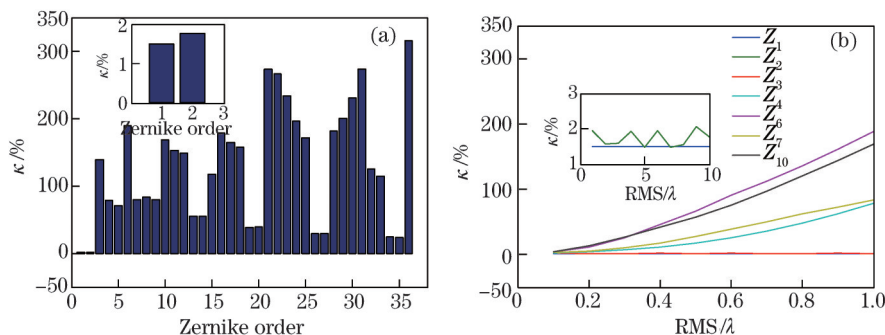


图2 (a)不同类型Zernike像差对 κ 的影响(RMS:1 λ); (b)不同大小Zernike像差对 κ 的影响(RMS:0.1 λ ~1 λ)

Fig.2 (a) Influences of different types of Zernike aberration on κ (RMS:1 λ); (b) influences of different magnitudes of Zernike aberration on κ (RMS:0.1 λ ~1 λ)

与传统光学系统不同,光谱仪的狭缝很小,对波前有一定的滤波作用。在模拟实验中分别计算了狭缝宽度为 $1.22\lambda f/D(1d_\lambda)$, $2.44\lambda f/D(2d_\lambda)$ 和 $3.66\lambda f/D(3d_\lambda)$,其中, λ , f 和 D 分别为波长、望远镜等效焦距和入瞳直径, d_λ 为艾里斑直径。经过狭缝滤波后,像差对 κ 的影响如图3所示。数值模拟结果表明:在狭缝滤波后,不同类型像差对 κ 的影响不同,但与滤波前相比,滤波后 κ 变小,表明狭缝滤波能抑制光谱展宽;滤波后, κ 不再随着像差的增大而增大。

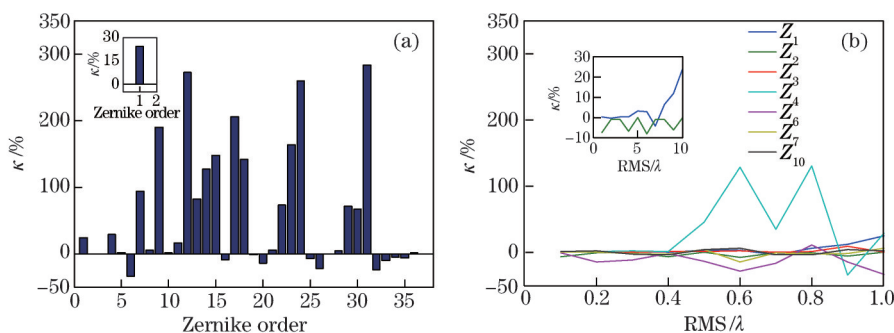


图3 经宽度为 $1.22\lambda f/D$ 的狭缝滤波后,(a)不同类型Zernike像差对 κ 的影响(RMS:1 λ)和(b)不同大小像差对 κ 的影响(RMS:0.1 λ ~1 λ)

Fig.3 Influences of (a) different types of Zernike aberration (RMS:1 λ) and (b) different magnitudes of Zernike aberration (RMS:0.1 λ ~1 λ) on κ , with a slit width of $1.22\lambda f/D$

3.3 像差对 η 的影响

像差对 η 的影响如图4所示。数值模拟结果表明,不同像差对 η 的影响是不同的,并且随着像差的增大而降低;对于相同类型、相同大小的波前像差而言, η 随着狭缝宽度的增大而增大。

3.4 狭缝滤波对单阶Zernike像差校正的影响

使用自适应光学校正后, $\kappa=2\%$,不同Zernike阶数的波前像差容差及能量利用率如图5所示。数值模拟结果表明:狭缝滤波能降低自适应光学校正要求。狭缝越小,对波前像差的滤波能力就越强,对自适应光学校正能力的需求就越低。像差的存在会导致能量的衰减,如图5(b)所示。数值模拟结果表明:当狭缝宽度为 $1d_\lambda(1.22\lambda f/D)$ 时,自适应光学校正后像差容差满足 $\kappa=2\%$,此时能量利用率 η 得到了稳定的显著的提升, η 由

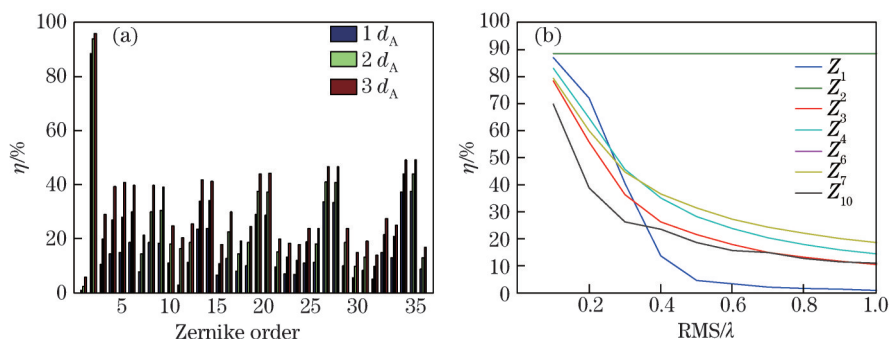


图 4 (a) 不同类型和(b)不同大小像差对 η 的影响

Fig.4 Influences of the aberration with (a) different types and (b) different magnitudes on η

校正前的 20% 提升到 60%。此外,能量利用率 η 随着狭缝宽度的增大而增大。当狭缝宽度为 $2d_A(2.44\lambda/D)$ 时, η 得到了稳定的显著提升且优于 70%。

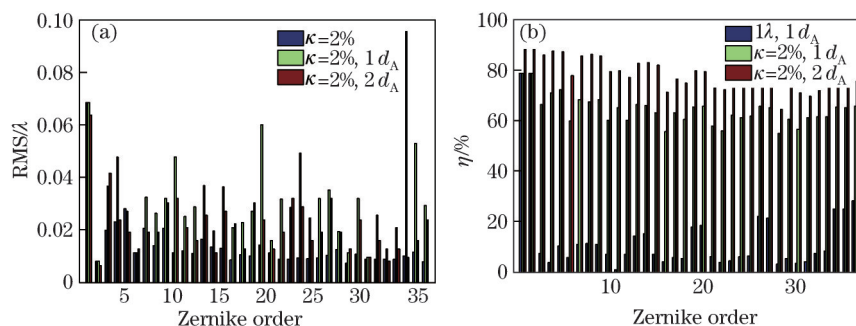


图 5 狭缝滤波对自适应光学校正的影响。(a) 像差容差;(b) η

Fig.5 Influences of the filter slit on the AO correction. (a) Aberration tolerance; (b) η

3.5 狭缝滤波对大气湍流相位屏校正的影响

按照 Kolmogorov 理论产生 $D/r_0=14$ 的大气湍流相位屏,该相位屏由 3~36 阶 Zernike 像差组成,不包括倾斜像差,其中, r_0 是大气视宁度参数。由于大气湍流具有统计特性,因此生成一组 200 frame 大气湍流相位屏。大气湍流相位屏 $D/r_0=14$ 对 κ 的影响如图 6 所示。数值模拟结果表明:当大气湍流 $D/r_0=14$ 时, κ 最大约为 120%,最小约为 20%。

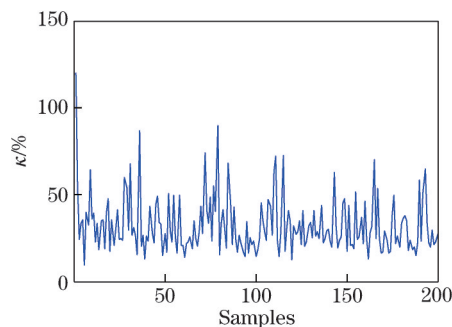
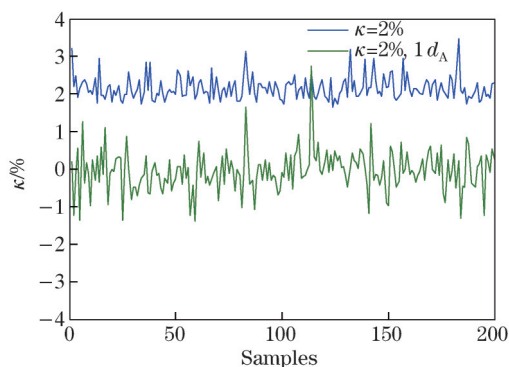
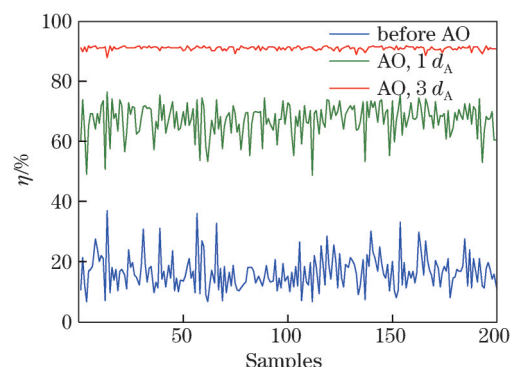


图 6 $D/r_0=14$ 对 κ 的影响

Fig.6 Influence of $D/r_0=14$ on κ

自适应光学校正对 κ 的影响如图 7 所示。数值模拟结果表明:滤波前,自适应光学校正后 $\kappa \approx 2\%$,基于狭缝滤波灵敏度的差别校正方法校正后,总体上 $\kappa \leq 1\%$,从而说明了采用该方法,不仅能够有效地降低自适应光学的校正要求,同时,还能更有效地抑制由像差引起的光谱展宽,从而提高光谱分辨率。

自适应光学校正对 η 的影响如图 8 所示,校正后 $\kappa \approx 2\%$ 。数值模拟结果表明:自适应光学校正后能够有效地提高能量利用率,当狭缝宽度为 $1d_A(1.22\lambda/D)$ 时, η 由校正前的约 20% 提高到了约 70%。此外,当狭缝宽度为 $3d_A(3.66\lambda/D)$ 时,此时能量利用率得到了稳定的提高,且 η 优于 90%。

图7 自适应光学校正对 κ 的影响Fig.7 Influence of AO correction on κ 图8 自适应光学校正对 η 的影响Fig.8 Influence of AO correction on η

4 结 论

提出了一种基于狭缝滤波灵敏度的差别校正方法,并进行了数值模拟仿真。数值模拟结果表明:滤波前,直接采用自适应光学校正后 $\kappa \approx 2\%$ 。采用基于狭缝滤波灵敏度的差别校正方法校正后,总体上 $\kappa \leq 1\%$,从而说明了采用该方法,不仅能够有效地降低自适应光学的校正要求,同时还能更有效地抑制由像差引起的光谱展宽,从而提高了光谱分辨率;自适应光学校正后能够有效地提高能量利用率,当狭缝宽度为 $1d_\lambda \cdot (1.22\lambda f/D)$ 时, η 由校正前的约20%提高到了约60%,当狭缝宽度为 $3d_\lambda (3.66\lambda f/D)$ 时,此时能量利用率得到了稳定的提高,且能量利用率 η 优于90%。

参 考 文 献

- 1 Volkmer R, von der Lühse O, Denker C, *et al.*. GREGOR solar telescope: Design and status[J]. *Astronomische Nachrichten*, 2010, 331(6): 624–627.
- 2 Lin Yuanzhang. Introduction to Solar Physics[M]. Beijing: Science Press, 2000.
林元章. 太阳物理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- 3 Collados M, Calcines A, Díaz J J, *et al.*. A high-resolution spectrograph for the solar telescope GREGOR[C]. SPIE, 2008, 7014: 70145Z.
- 4 van Noort M J, van der Voort L H M R. High-resolution observations of fast events in the solar chromosphere[J]. *Astrophysical Journal*, 2006, 648(1): L67–L70.
- 5 Chae J, Park H M, Ahn K, *et al.*. Fast imaging solar spectrograph of the 1.6 meter New Solar Telescope at Big Bear Solar Observatory[J]. *Solar Physics*, 2013, 288(1): 1–22.
- 6 An Yan, Liu Ying, Sun Qiang, *et al.*. Design and development of optical system for portable Raman spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0330001.
安 岩, 刘 英, 孙 强, 等. 便携式拉曼光谱仪的光学系统设计及研制[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0330001.
- 7 Yu Jiandong, Liang Zhongzhu, Liang Jingqiu, *et al.*. Research and design of prefixing objective with large aperture in imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0222002.
于建冬, 梁中翥, 梁静秋, 等. 成像光谱仪大孔径前置物镜设计研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0222002.
- 8 Rao Changhui, Jiang Wenhan, Ling Ning. Anisoplanatism limitations for low-order mode correction adaptive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(11): 1486–1493.
饶长辉, 姜文汉, 凌 宁. 低阶模式校正自适应光学系统的非等晕限制[J]. *光学学报*, 2000, 20(11): 1486–1493.
- 9 Rao C H, Zhu L, Rao X J, *et al.*. Performance of the 37-element solar adaptive optics for the 26 cm solar fine structure telescope at Yunnan Astronomical Observatory[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(31): G129–G135.
- 10 Rao C H, Zhu L, Gu N T, *et al.*. An updated 37-element low-order solar adaptive optics system for 1-m New Vacuum Solar Telescope at Full-shine Lake Solar Observatory[C]. SPIE, 2012, 8447: 844746.
- 11 Bai Fuzhong, Rao Changhui. Effect of pinhole diameter on measurement accuracy of self-referencing interferometer wavefront sensor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(6): 4056–4064.

- 白福忠, 饶长辉. 针孔直径对自参考干涉波前传感器测量精度的影响[J]. 物理学报, 2010, 59(6): 4056-4064.
- 12 Bai Fuzhong, Rao Changhui. Phase shift characteristic measurement and static distortion compensation for liquid crystal spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1487-1491.
- 白福忠, 饶长辉. 液晶空间光调制器相移特性测量与静态畸变补偿[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1487-1491.
- 13 Palmer C. Diffraction Grating Handbook[M]. 6th edition. New York: Newport Corporation, 2005.
- 14 Roddier F. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy[J]. Progress in Optics, 1981, 19: 281-376.

栏目编辑: 史 敏