

用于白天自适应光学的波前探测方法分析*

李超宏^{1)†} 鲜浩¹⁾ 姜文汉¹⁾ 饶长辉¹⁾

1) 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2006 年 11 月 10 日收到, 2006 年 12 月 11 日收到修改稿)

提出了两种视场偏移哈特曼波前传感器, 用于探测白天条件下强背景中目标信号的波前信息. 给出了哈特曼波前传感器子孔径中焦面上天光背景非均匀性分布特征的实验结果, 详细分析了基于分光棱镜的双焦面视场偏移哈特曼波前传感器的探测误差, 并通过基于倾斜镜的单焦面视场偏移哈特曼波前传感器实验给出了波前测量的结果, 证明视场偏移哈特曼波前传感器能够精确、稳定的测量白天条件下目标信号的畸变波前信息, 同时给出了其在白天条件下探测能力的估算结果及其受限因素. 估算结果表明云南天文台的自适应光学系统在 $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ 天光背景条件下应用视场偏移哈特曼波前传感器能对 5 等星(可视星等值)目标进行准确的波前探测.

关键词: 自适应光学, 波前传感器, 白天工作, 误差分析

PACC: 9265, 4285F, 4280Q, 0620D

1. 引 言

自适应光学(adaptive optics, AO)理论的发展及其工程应用技术日臻成熟, 并已被广泛应用于天文观测上的成像质量校正和激光光束质量改善等多方面. 到目前为止, 除了太阳自适应光学系统以外, 几乎所有的 AO 系统都是在夜间进行天文观测^[1-3]. 很明显目前的 AO 系统工作时段受到很大的限制.

针对夏克-哈特曼波前传感器(Shack-Hartmann wavefront sensor, SHWFS)存在的杂散光、器件噪声等问题, 姜文汉、鲜浩等人提出通过设置一个固定阈值的方法以减轻噪声的影响, 并得到了阈值的设置值^[4,5]. 然而在白天条件下, 进入 AO 系统的天光背景很强且变化迅速, 在子孔径焦平面上分布也不均匀, 因此传统的固定阈值方法很难合理解决 SHWFS 在白天应用所存在的问题.

Beckers 和 Gonglewski 做过一些探索在白天应用 AO 系统的工作, Beckers 的工作是基于超窄带滤波技术的主动波前探测技术, 控制上有一定的难度^[6], 而 Gonglewski 也只是单独的讨论了视场光阑对天光背景的限制问题, 对解决白天强背景条件下波前探测问题而言效果不是很明显^[7]. 并且, 主动波前探测

技术相对被动波前探测技术(直接利用目标自身的发光来进行波前探测)而言, 在控制上更加复杂, 对系统及配套设施(比如激光器功率)有更高的要求. 在目标亮度本身能量能够进行波前探测的条件下被动探测技术控制简单且方便实用, 有更好的应用前景.

中科院光电技术研究所一直在从事自适应光学的理论及其在各个方面应用的研究工作, 李超宏等人提出了通过视场偏移哈特曼波前传感器(field-of-view shifted Shack-Hartmann wavefront sensor, FSWFS)来探测强背景中弱目标信号的畸变波前信息的方法^[8]. 发展了一种可以直接对强背景下目标信号进行实时波前探测的实用技术. 文献[8]仅简单的给出了基于倾斜镜的单焦面 FSWFS 测量波前的斜率信息. 本文在文献[8]的基础上, 拓展了视场偏移哈特曼波前探测的原理, 提出了两种分别应用分光棱镜和扫描振镜的 FSWFS, 从理论上分析了传统哈特曼应用于白天条件下的原理限制, 给出了 FSWFS 的波前探测结果, 并估算了 FSWFS 在白天条件下波前探测能力的数值计算结果及其受限因素.

2. 白天条件下应用 SHWFS 的原理性限制及天光背景的非均匀性

传统 SHWFS 的原理光路图如图 1 所示, 入射波

* 国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号 2005AA845042)资助的课题.

† E-mail: laoeight@hotmail.com

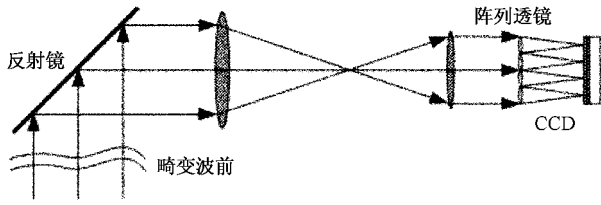


图 1 传统夏克-哈特曼波前传感器原理光路图

前被阵列微透镜分割并在子孔径焦面上成像,根据下式计算各子孔径内聚焦光斑的位置信息^[9]:

$$x_i = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{nm} I_{nm}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{nm}}, y_i = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N y_{nm} I_{nm}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{nm}}. \quad (1)$$

每个子孔径焦面的探测区域为 $M \times N$ 像素, I_{nm} 是 CCD 第 (n, m) 个像素上所接收到总信号的光强, (x_{nm}, y_{nm}) 是第 (n, m) 个像素对应的横纵坐标,所探测到的信号的平均质心位置信息可以描述为^[10]

$$\bar{x}_c = \frac{1}{1 + BSR} \bar{x}_s + \frac{BSR}{1 + BSR} \bar{x}_B, \quad (2)$$

其中 BSR 为子孔径靶面上探测到的背景信号强度与目标信号强度的比值即背信比, \bar{x}_c 是子孔径内探测到的总信号的平均质心位置, \bar{x}_s 是子孔径内目标信号的真实质心位置, \bar{x}_B 是子孔径内背景信号的质心位置.

$$BSR = \frac{\sum_{nm} B_{nm}}{\sum_{nm} S_{nm}},$$

$$x_s = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{nm} S_{nm}}{\sum_{nm} S_{nm}},$$

$$x_B = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{nm} B_{nm}}{\sum_{nm} B_{nm}}, \quad (3)$$

S 和 B 分别是子孔径内目标信号和背景信号的总光强.

当 SHWFS 在白天条件下工作时,背信比 BSR 一般很大,因此从(2)式可以看出探测到的质心位置将远离目标信号的真实质心位置,图 2 很直观地描述了一个问题.

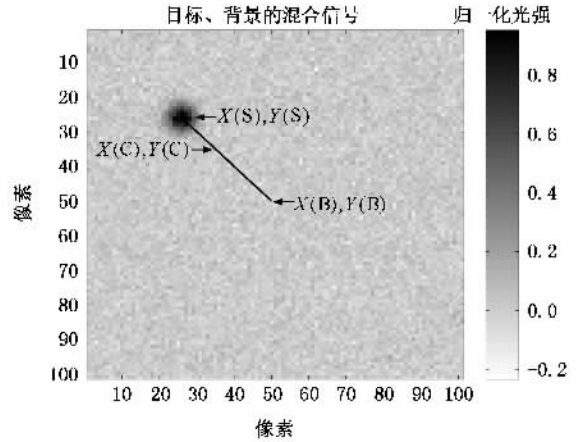


图 2 由强背景辐射引起的质心对探测到的目标信号质心位置的影响($X(S), Y(S)$ 是真实目标质心位置 ($X(B), Y(B)$ 是背景辐射质心位置 ($X(C), Y(C)$ 是探测器在强背景条件下检测到的质心位置,很明显,在强背景条件下探测到的质心位置已经远离了真实目标的质心位置)

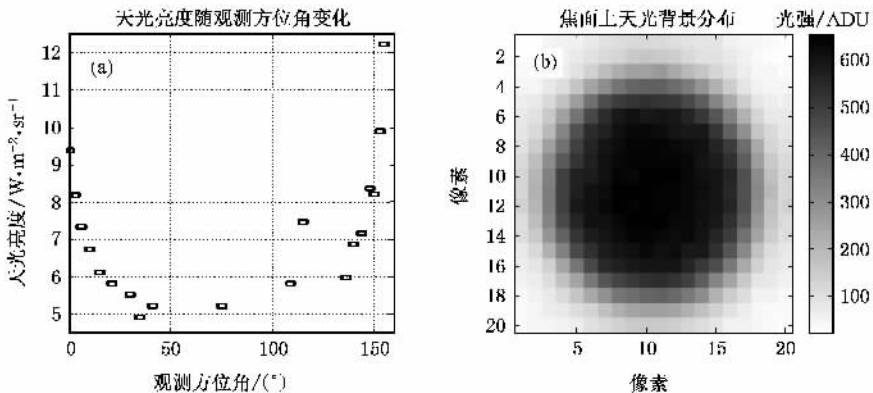


图 3 天光背景在 SHWFS 焦面上非均匀性特征的实验结果 (a) 表示天光背景亮度随不同观测时间的观测方位角变化而变化,观测天顶角 30° ,太阳天顶角 70° ,太阳方位角 256° ,响应波长 $400 \text{ nm} \sim 1100 \text{ nm}$ (b) 表示天光背景在子孔径焦面上的空间非均匀性分布特点

另外,天光背景在 SHWFS 内成像除了具有光强很大的特点之外,还有很大的非均匀性.天光背景在 SHWFS 内的成像非均匀性表现在两方面,即时间上的非均匀性和空间分布上的非均匀性,前者表示天光背景光强在不同的观测时间所对应不同的观测天区一般不相同,后者表示子孔径焦面上天光背景的光强分布受系统装配误差、渐晕和衍射效应的限制也会呈现很大的不均匀性.因此,天光背景的非均匀性问题成为白天波前探测的一个难点.图 3 给出了通过实验实测的天光背景的非均匀性问题.图 3(a)表明天光背景光强随观测方位角变化,图 3(b)表明天

光背景光强在子孔径内焦面上的非均匀性分布.

3. 两种视场偏移哈特曼波前传感器

文献[8]简要地给出了通过两个 SHWFS 实现 FSWFS 的原理及其探测误差,在本文中,考虑到减小系统误差和设计更加紧凑实用的原则,设计了两种基于分光棱镜的双焦面 FSWFS 和基于扫描振镜的单焦面 FSWFS,如图 4 所示.在图 4 中,实线表示目标光信号,虚线表示背景光信号.

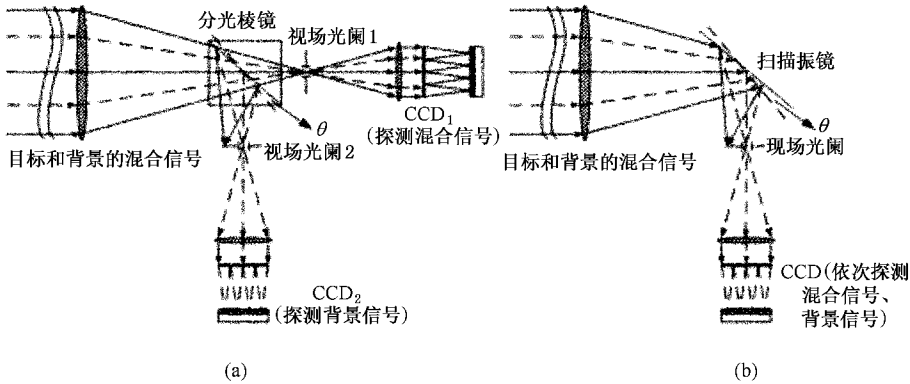


图 4 两种视场偏移哈特曼波前传感器的原理光路图 (a)是基于分光棱镜的双焦面 FSWFS (b)是基于扫描振镜的单焦面 FSWFS

3.1. 基于分光棱镜的双焦面 FSWFS 的工作原理

在图 4(a)中,当分光棱镜相对原始位置(即在原始位置时,两路 CCD 接收到的总信号完全相同)有一个小角度 θ 的偏转,并恰好可以使得目标光偏出 CCD₂ 所对应的视场光阑时, CCD₂ 所探测到的信号即为消除了有效目标信号的天光背景信号, CCD₁ 探测到的信号则为有效目标信号和天光背景信号的混合信号,两路 CCD 信号所对应像素相减即为消除了背景光信号的有效目标信号. CCD₁ 上接收到的信号为

$$I_{\text{CCD}_1} = S + B + \sigma_1. \quad (4)$$

在分光棱镜转过一个视场偏移角 θ 后, CCD₂ 上接收到的信号为

$$I_{\text{CCD}_2} = B + \sigma_2. \quad (5)$$

(4)式减(5)式即得消除了强天光背景的清晰目标信号

$$I = I_{\text{CCD}_1} - I_{\text{CCD}_2} = S + (\sigma_1 - \sigma_2), \quad (6)$$

其中 σ_1 和 σ_2 分别是两个探测器上因器件噪声引起的噪声信号, S 和 B 分别是进入 FSWFS 的有效目标信号和天光背景信号.

在(6)式的基础上,入射信号波前的斜率信息可以通过

$$g_{xi} = \frac{\Delta x}{\lambda f} = \frac{x_i - x_0}{\lambda f}, \quad g_{yi} = \frac{\Delta y}{\lambda f} = \frac{y_i - y_0}{\lambda f} \quad (7)$$

计算,其中 (x_0, y_0) 是标定波前在子孔径焦面上的参考质心位置,当入射波前相对标定波前有像差时,入射波前的质心位置 (x_i, y_i) 则偏离参考质心位置,而入射波前的质心位置 (x_i, y_i) 可以通过(1)式计算得到.根据(7)式,斜率向量 G 就可以计算出来,再根据已经成熟应用于 SHWFS 的波前复原算法就可以计算出入射波前的畸变信息了^[11].

同时,为了不因分光棱镜的存在而降低 FSWFS 对目标信号的探测能力,我们提出使双焦面 FSWFS 的两路 CCD 工作于不同的采样频率 F_1 和 F_2 ,同时为保证两路 CCD 探测到的背景信号强度相同,可以使分光棱镜的分光比设置为

$$P_2/P_1 = F_1/F_2, \quad (8)$$

P_2 和 P_1 分别是分光棱镜的反射光能量和透射光能量. 一般情况下, 对天光背景的采样频率要比对目标信号的采样频率低得多, 因此(8)式中的分光比值可以设置得很小, 这样基本上不会降低 FSWFS 的探测能力.

3.2. 基于扫描振镜的单焦面 FSWFS 的工作原理

在图 4(b)中, 基于双焦面 FSWFS 的视场偏移原理, 高速光学扫描振镜在两个不同的位置之间来回切换. 扫描振镜在原始位置(原始位置时 CCD 接收到的信号为有效目标和背景的混合信号)时, CCD 采集一帧混合信号图像, 当扫描振镜在驱动电压作用下转过视场偏移角 θ 时, CCD 采集一帧消除了目标信号的背景信号, 前后两帧图像相减即得消除了天光背景的清晰目标信号.

3.3. 两种 FSWFS 的优缺点

基于分光棱镜的双焦面 FSWFS 具有静态工作, 控制简单的优点, 缺点是要求两路阵列微透镜高度一致, 并且两路 CCD 响应特性尽量相同, 因此在实际中可能会存在一定的工程误差.

基于扫描振镜的单焦面 FSWFS 相对双焦面 FSWFS 而言, 它能够避免双焦面 FSWFS 因为两个阵列透镜焦面不一致所带来的系统误差, 但在目标信号测量过程中也会因为对背景信号的测量而被间歇地打断, 因此系统测量的带宽会一定受到一定程度的影响, 但这个影响可以通过对背景信号的低频采样而降至最低. 在长波段的应用方面, 一种叫做“光束转换 (beam switching)”的类似技术曾经在天文和红外观测方面被用于消除宇宙和大气背景辐射^[12].

4. FSWFS 的探测误差分析

下面我们以双焦面 FSWFS 为基础进行误差分析, 误差分析的结果将同样适用于单焦面 FSWFS. CCD 是目前应用比较广泛、成熟的电荷耦合器件, 但它还是存在很多不可避免的噪声问题, 包括光子散粒噪声、暗电流噪声、电路噪声、读出转移电荷噪声等^[10, 13]. 在本文中, 为简化分析, 在考虑 CCD 芯片制冷条件下, 把 CCD 总的噪声归结为方差为 σ_r^2 的读出噪声. CCD₁ 上所接收图像的总的噪声起伏可以

描述为

$$\sigma_n^2 = \sigma_r^2 + \sigma_{sp}^2 + \sigma_{bp}^2, \quad (9)$$

其中 σ_r^2 是 CCD 读出噪声的方差, σ_{sp}^2 和 σ_{bp}^2 分别是由有效目标信号和背景信号引起的光子起伏噪声. 并且, 由 CCD 光电转换引起的光子起伏噪声服从泊松分布特征^[14, 15].

根据第 3 节 FSWFS 的基本原理, 假定分离出来的目标信号图像中的各种噪声之间不存在相关性, 并且认为是加性噪声, 则通过 FSWFS 分离出来目标信号图像的信噪比表达式可以表述为

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= N_s [(N_s + 2N_b) + 2N_r^2]^{-1/2} \\ &= K^{-1/2} \cdot W_s^{1/2} \left(1 + \frac{2c}{L^2} \text{BSR}\right)^{-1/2} \\ &\quad \times \left(1 + \frac{2K^{-1} \cdot W_r^2}{W_s + W_b}\right)^{-1/2}, \quad (10) \end{aligned}$$

其中, N_s 和 W_s 分别为有效目标信号在子孔径内各像素上分布的最大值即峰值信号光子数和 ADU (数字 CCD 读出的单位数), N_b 和 W_b 分别是天光背景信号在子孔径内各像素上分布的平均光子数和 ADU 数, N_r 和 W_r 分别是读出噪声的均方差光子数和 ADU 数. c 表示子孔径内有效目标信号总的光子数与峰值信号所对应像素的光子数比值, L 是每子孔径所对应横(纵)向像素数, K 表示 CCD 的光电转换效率, 单位为 ADU/光子(在本文中, 测量得到所用 CCD 的光电转换效率因子为 $K = 1.6$ ADU/光子).

随着背景光强的逐渐增加, (10)式中所描述的读出噪声 N_r 相对于目标信号和背景信号的总的光子起伏噪声而言会越来越小, 当 $(N_s + 2N_b) \gg 2N_r^2$ 近似条件得以满足时, (10)式中信噪比的表达式可以改写为

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \frac{N_s}{(N_s + 2N_b)^{1/2}} \\ &= K^{-1/2} \cdot W_s^{1/2} \left(1 + \frac{2c}{L^2} \text{BSR}\right)^{-1/2}. \quad (11) \end{aligned}$$

Hardy 曾经得到过目标信号到达角方差与信噪比的理论关系^[16]

$$\sigma_1 = \frac{3\pi\lambda}{16d} \frac{1}{\text{SNR}}, \quad (12)$$

其中 λ 是有效目标信号的中心波长(假定目标光为单色光), d 是子孔径直径.

把(11)式代入(12)式, 我们得到有效目标信号质心位置测量的均方差

$$\sigma_c = K^{-1/2} \cdot \frac{3\pi f \lambda}{16ld} W_s^{-1/2} \left(1 + \frac{2c}{L^2} BSR\right)^{1/2}, \quad (13)$$

其中 f 是子孔径焦距, l 是像素尺寸.

5. 实验结果

根据第 3 节提到的 FSWFS 的基本原理以及 3.3 节讨论的两种 FSWFS 的优缺点,我们在实验室内用高速倾斜镜(TM)来实现单焦面 FSWFS.用一个 CCD 实现分次测量,第一次测量目标、背景的混合信号,然后根据图 4 中提出的视场偏移方法,在哈特曼波前传感器之前用倾斜镜来实现视场偏移以偏移出目标信号,再测量消除了目标信号的背景信号,通过前后两次信号的相减处理,就可以得到消除了背景直流分量的目标信号.实验装置如图 5 所示.

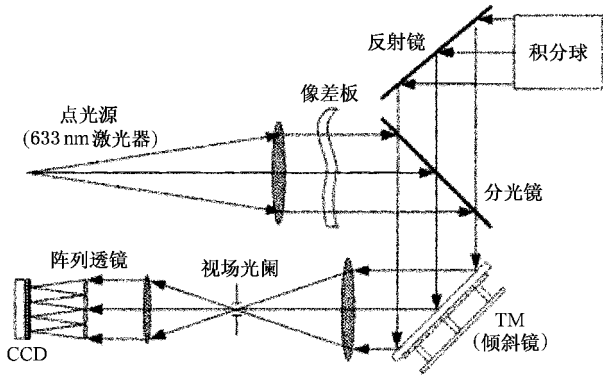


图 5 通过倾斜镜实现的单焦面视场偏移哈特曼波前传感器实验装置

我们用 633 nm 氦氖激光模拟目标信号,用积分球模拟背景信号;微透镜阵列尺寸为 23×23 ,有效子孔径数 400,每一个子孔径为一个 0.51 mm 的方孔,在本实验中,每一个子孔径对应焦面 19 个像素.

目标光在通过一个像差已知的像差板后,与积分球发出来的背景光耦合成目标与背景的混合信号.经倾斜镜反射后进入缩束系统,这样 CCD 接收到的就为有效目标和背景的混合信号.图 6 给出了在背信比 56.7 时实验所采集到的混合信号图像.

实验中所用像差板的参考波前图像如图 7 所示.

在图 6 所描述的背景比为 56.7 时,经过 FSWFS 减背景处理后的信号再经过波前复原算法复原出来的波前信息如图 8 所示.

在背信比 56.7 条件下,经过 FSWFS 测量后的

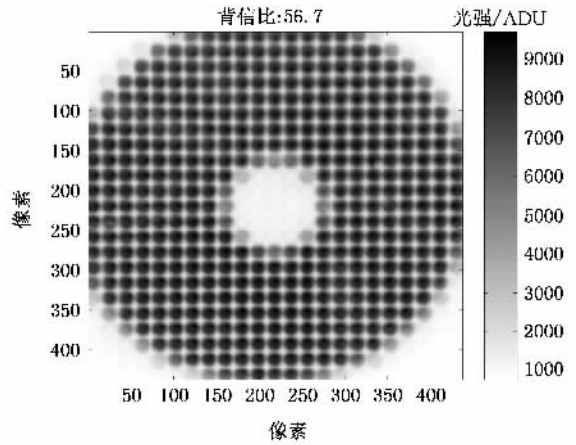


图 6 有效目标信号和扩展背景信号的混合信号图像(背景比 BSR = 56.7,有效目标信号隐藏在强背景中)

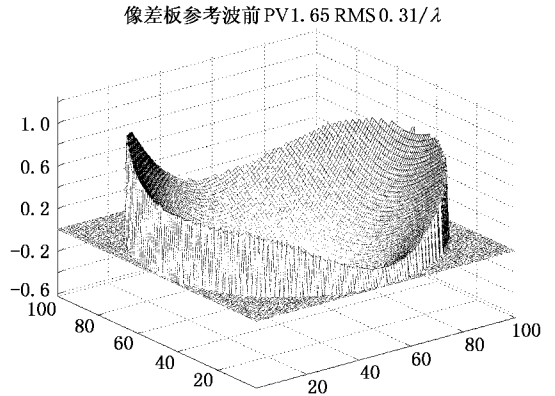


图 7 实验所用像差板(目标信号)的参考波前信息

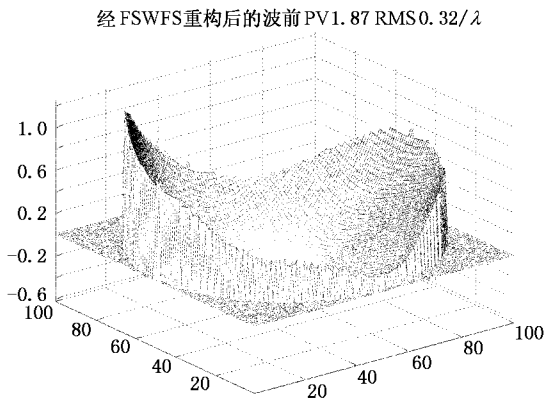


图 8 通过单焦面 FSWFS 探测目标信号后再重构出来的波前信息

有效目标信号的误差波前描述在图 9(a)中,没有经过 FSWFS 减背景处理,而直接通过对 SHWFS 采集到的信号(淹没在强背景中)图像进行减固定水平阈

值的方法进行波前测量的误差波前描述在图 9(b)中.

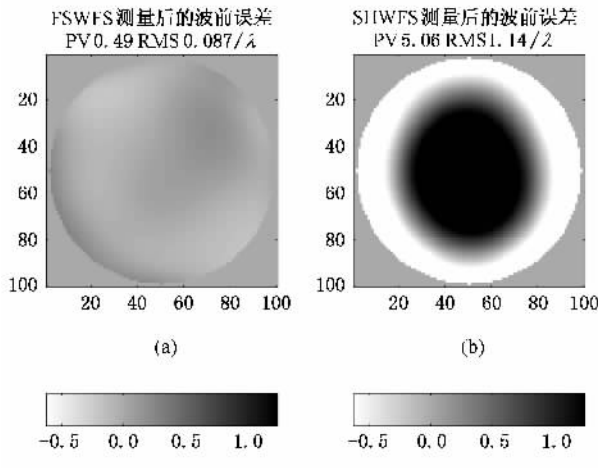


图 9 分别通过单 FSWFS 和传统 SHWFS 减固定阈值方法探测后的误差波前信息 (a)是通过单焦面 FSWFS 进行视场偏移减背景处理探测目标后计算得到的误差波前信息 (b)是通过传统 SHWFS 采用减固定水平阈值方法探测目标后计算得到的误差波前信息

从图 9 可以很明显的看出,在背信比 56.7 条件下,通过传统 SHWFS 采用减固定水平阈值的方法提取信号而得到的波前探测误差太大,也就是在强背景条件下传统 SHWFS 再无法进行合理、准确的波前探测,而采用 FSWFS 减背景处理方案,能在背信比 56.7 条件下合理、精确地提取有效目标信号,波前探测误差均方值小于 0.09λ ,具有一定的探测精度.

通过改变积分球输出光强的大小,我们还得到了在各种不同的背信比条件下 FSWFS 探测目标信号的平均波前测量误差及其误差起伏特性,每一个背信比条件下的平均波前测量误差为在此背信比条件下连续 20 帧波前测量误差的平均值,连续 20 帧波前测量误差的起伏大小作为其误差起伏特性.实验结果描述在图 10 中.图 10 表明,在不同的背景强度条件下,其波前测量误差的起伏误差小于 0.02λ ,具有很高的测量稳定性.

6. FSWFS 在白天条件下的探测能力估算

为了估计 FSWFS 用于 AO 系统后在白天条件下的探测能力,我们以云南国家天文台的 1.2 m AO 系统作为参考^[12,17],云南天文台 1.2 m AO 系统基本光路图如图 11 所示.即假定把本实验中所实用的 FSWFS 安装在云南天文台上,对其在可见光波段进

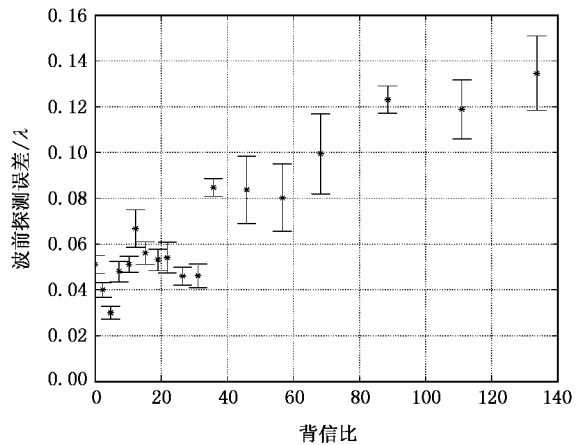


图 10 在不同背景强度条件下,通过 FSWFS 计算得到的平均波前测量误差及其误差起伏均方值随背信比的变化曲线

行白天波前探测的能力进行估算.云台 1.2 m AO 系统主镜直径 1060 mm,有效视场 $75.2 \mu\text{rad}$,对应望远镜入瞳处子孔径横向尺寸 46 mm,该系统在夜间(默认 0 背景)工作的极限可视星等值为 6,即在 0 背景下只能对亮于或等于 6 等星的目标进行可靠、准确的波前探测.同时,在以该系统的光学参数为参考条件下,我们得到在图 6 所描述的背信比 56.7 曝光时间 0.04 s 条件下,计算得到有效目标信号的可视星等值为 4.3,积分球输出光强转化到望远镜入瞳处为 $30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ 的等效天光背景强度.

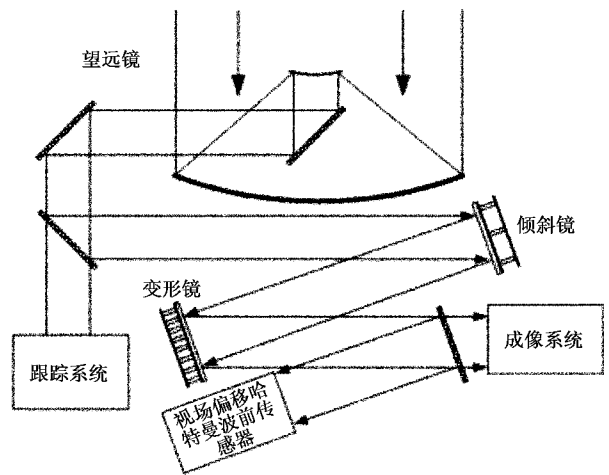


图 11 云南天文台 1.2 m AO 系统原理光路图

FSWFS 的探测能力可以根据(10)和(11)式所得到的信噪比与背信比的理论关系进行数值计算,并且在本节所做数值计算均忽略了系统探测器的饱和影响,即探测器输出与输入光强呈线性正比关系.我

们给定一个系统 0 背景时的极限探测可视星等值为 6 在 0 背景时系统极限探测星等时的目标信噪比定义为系统所能探测的最低信噪比 SNR_{min} 。当天光背景亮度固定为 $10 W/m^2 \cdot sr$ ($10 W/m^2 \cdot sr$ 为白天条件下晴空时的一般天光亮度)时 随着目标亮度的不断减弱 根据(10)式 FSWFS 提取出的目标信号信噪比将随之下降 我们定义信噪比下降到 SNR_{min} 时所对应的目标可视星等值为在 $10 W/m^2 \cdot sr$ 天光背景亮度时 FSWFS 的探测能力. 图 12 给出了在不同天光背景强度下 FSWFS 所能探测到的目标可视星等变化曲线数值计算结果. 从图 12 可以看出,在系统 0 背景极限探测星等值为 6 并且天光背景亮度 $10 W/m^2 \cdot sr$ 时 FSWFS 的探测能力为 5 等,即对高于或等于此等亮度的目标 FSWFS 能在白天条件下对其进行准确、可靠的波前探测.

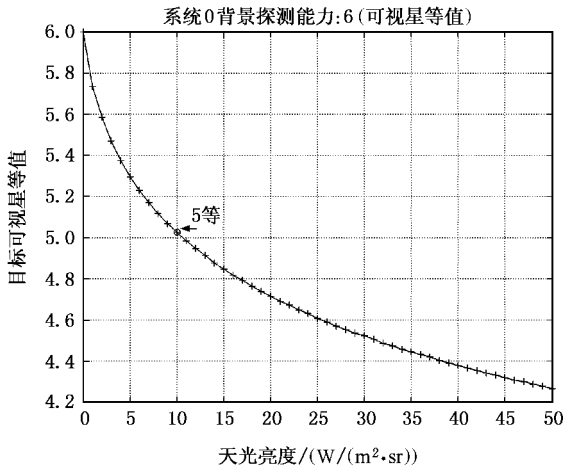


图 12 FSWFS 的探测能力数值计算结果(系统 0 背景时极限探测能力的可视星等值为 6)

同时 我们改变系统的 0 背景极限探测能力 以天光背景亮度 $10 W/m^2 \cdot sr$ 时 FSWFS 所能探测到的目标可视星等值为其探测能力 得到了在系统 0 背景极限探测能力变化的条件下 FSWFS 的不同探测能力曲线数值计算结果如图 13 所示.

结合图 13 和图 12 的计算结果可以看出 白天条件下 FSWFS 的探测能力主要受限于以下因素:1)系统自身在 0 背景时的极限探测能力即系统性能, 2)目标本身的亮度, 3)天光背景的亮度即背信比. 因此为了进一步提高 FSWFS 在白天条件下的波前

探测能力,需要从以下几个主要方面着手:1)提高 AO 系统自身在 0 背景时的探测性能,主要包括使用更好的探测器和减小系统损耗等, 2)采取光谱滤波等措施降低目标信号的背信比,并保证探测器不饱和且尽量使之处于线性响应范围内, 3)白天观测时尽量选择天光背景相对较弱的天区和观测方向.

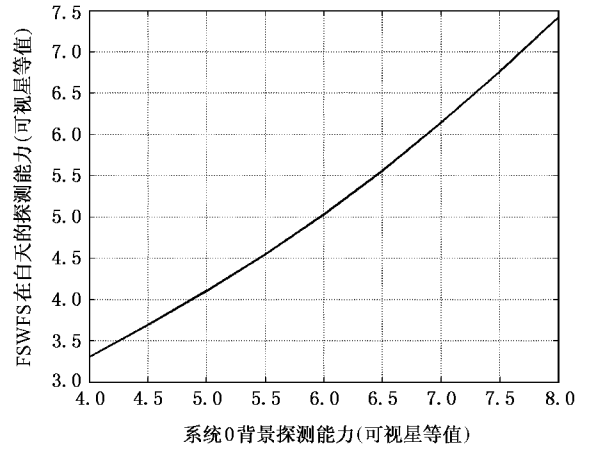


图 13 FSWFS 在白天的探测能力与系统 0 背景极限探测星等的关系

7. 结 论

本文分析了传统 SHWFS 用于白天工作时的原理性限制 给出了天光背景的非均匀性实验结果. 设计了两种视场偏移哈特曼波前传感器,对两种 FSWFS 的特点进行了对比分析,并通过单焦面 FSWFS 实验证明了 FSWFS 能对强背景下的目标信号进行精确、稳定的波前测量,最后给出了 FSWFS 在白天条件下的数值估算结果,估算结果表明云南天文台的 AO 系统在 $10 W/m^2 \cdot sr$ 天光背景条件下应用视场偏移哈特曼波前传感器能对 5 等星(可视星等值)目标进行准确的波前探测. 本文的理论和实验结果表明,在白天进行波前探测具有很高的可行性和可靠性,应用 FSWFS 将一定程度的扩展 AO 系统的工作时段.

论文完成中 我们与张学军等进行过有益的讨论 在实验过程中得到过董道爱、胡诗杰、廖周等的帮助 在此一并表示感谢.

- [1] Jiang W H , Xian H , Yang Z P 1998 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **15** 228 (in Chinese) [姜文汉、鲜 浩、杨泽平 1998 量子电子学报 **15** 228]
- [2] Jiang W H , Li H G , Huang S F , Wu X B 1990 *Proc. SPIE* **1271** 82
- [3] Jorge Ares 2000 *Applied Optics* **39** 1511
- [4] Jiang W H , Xian H , Shen F 1998 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **15** 218 (in Chinese) [姜文汉、鲜 浩、沈 锋 1998 量子电子学报 **15** 218]
- [5] Jiang W H , Xian H , Shen F 1997 *Proc. SPIE* **3126** 534
- [6] Beckers J M , Alessandro Cacciani 2001 *Experimental Astronomy* **11** 133
- [7] Gonglewski J D , Highland R G , Dayton D C , Sandven S S , Rogers S C , Browne S L 1996 *Proc. SPIE* **2827** 152
- [8] Li C H , Xian H , Rao C H , Jiang W H 2006 *Optics Letters* . **31** 2821
- [9] Zhou R Z , 1999 *Adaptive Optics* (Beijing : National Defense Industrial Press) p131 (in Chinese) [周仁忠 1999 自适应光学 (北京 : 国防工业出版社 第 131 页)
- [10] Shen F , Jiang W H 1997 *Opto-Electronic Engineering* **24** (3) 1 (in Chinese) [沈 锋、姜文汉 1997 光电工程 **24** (3) 1]
- [11] Li X Y , Jiang W H 2002 *Proc. SPIE* **4825** 121
- [12] Kraus J D 1966 *Radio Astronomy* (New York : McGraw-Hill Press) p248
- [13] Cao G R , Yu X 1994 *Optical Engineering* **33** 2331
- [14] Qi K N 1987 *Introduce to statistic optics* (Tianjing : Nankai University Press) p451 (in Chinese) [戚康男 1987 统计光学导论 天津 : 南开大学出版社 第 451 页]
- [15] Saleh B 1978 *Photoelectron Statistics* (Beijing : Science Press) p166 (in Chinese) [塞 勒 1978 光电子统计学 (北京 : 科学出版社) 第 166 页]
- [16] Hardy J W 1998 *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes* (New York : Oxford University Press) p149
- [17] Zhu Q X 1995 *Opto-Electronic Engineering* **22** (6) 1 (in Chinese) [朱耆祥 1995 光电工程 **22** (6) 1]

Analysis of wavefront measuring method for daytime adaptive optics *

Li Chao-Hong^{1,2)†} Xian Hao¹⁾ Jiang Wen-Han¹⁾ Rao Chang-Hui¹⁾

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

2) (Graduate School of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)

(Received 10 November 2006 ; revised manuscript received 11 December 2006)

Abstract

Two field-of-view shifted Shack-Hartmann wavefront sensors (FSWFS) are proposed , which are used to measure the wavefront information of object signal under daytime conditons . The experimental results on the sky background 's non-uniformity characteristics are obtained , the detecting error of the dual focal-plane FSWFS is analyzed in this paper and its principle has been proven by experiments with a single focal-plane array . The measuring results indicate that FSWFS can precisely and stably measure the wavefront information of object signal with strong background . At the same time , the detection capacity of FSWFS is estimated and its restraining factors are analyzed , and the estimation results show that the adaptive optics system with FSWFS in Yunnan observatory can precisely measure the wavefront information of object signal whose V magnitude is 5 when the brightness of the sky background is $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$.

Keywords : adaptive optics , wavefront sensor , daytime working , error analysis

PACC : 9265 , 4285F , 4280Q , 0620D

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2005AA845042) .

† E-mail : aoeight@hotmail.com