

强天光背景下基于钠导星的大气波前像差探测研究

罗曦^{1,2*}, 李新阳^{1,2}, 王彩霞¹, 王晓云¹, 胡诗杰¹¹中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对较强天光背景下基于暗弱钠导星的大气波前畸变像差实时探测需求, 本文提出了一种综合滤波的主动式波前探测技术, 完成了对该技术的理论分析、参数设计及探测能力预估, 并将该技术应用于传统哈特曼波前探测器, 开展了基于钠导星的大气波前畸变像差探测实验。在约 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 的天光背景条件下, 实现了基于钠导星同步采样大气波前畸变像差的实时探测。本工作对实际钠导星自适应光学系统应用的工作时段扩展进行了有益尝试。

关键词 自适应光学; 钠导星; 天光背景; 波前探测

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231028

1 引言

用于实时补偿大气湍流光学波前畸变的自适应光学(AO)通常需要信标来提供待补偿目标光路的波前畸变信息, 然而, 实际科学目标等晕区域内可用自然亮星的数量比较有限^[1]。在以自然亮星为信标的AO望远镜天空覆盖率受限的情况下, 人们提出了由可控天空指向受激产生的大气钠层原子 D_2 线共振散射(589.15xx nm)钠导星, 其具有海拔高(位于80~100 km)以及对大气湍流(集中于32 km以下)采样充分的优势, 一经提出便受到了国内外的广泛关注^[2-3], 并率先在夜间天文观测成像校正中获得实际应用^[4-5]。然而, 受到钠导星激光器与大气钠层原子相互作用激发效率的限制, 实际钠导星的亮度十分有限。就目前来看, 受激产生的单颗共振散射钠导星亮度通常不超过7等星^[6], 从而在很大程度上限制了钠导星AO望远镜的有效工作时段(只能选择在夜晚)。如果能够将其工作时段扩展至晨昏甚至白天, 在探测背景强且变化迅速、子孔径内强度分布不均匀的条件下, 实现基于暗弱钠导星回光信号的大气湍流波前畸变探测补偿, 对于钠导星AO的工程应用具有重要意义^[7]。据笔者所知, 目前国内外尚无钠导星AO应用时段扩展的公开研究报道。

国内外对强天光背景下的AO应用进行了大量探索。在国外, 美国国家太阳观测站的Beckers^[8]基于超窄光谱滤波技术对白天AO应用的波前探测方案进行了初步探索与分析, 美国加州理工学院的

Wilson等^[9]也对白天AO应用的深空激光通信进行了初步尝试。然而, 据笔者所知, 没有公开的报道显示上述探索性工作在实际系统应用上取得了成果。在国内, 中国科学院光电技术研究所一直致力于拓展AO应用领域、工作效率、工作时段等方面的理论及实践工作。如, 李超宏^[10]提出了两类视场偏移哈特曼波前探测技术, 该技术可用于实现强天光背景下针对目标本体回光的被动式大气湍流波前探测。其中: 基于分光棱镜的视场偏移方式会导致对目标进行有效探测的谱段发生能量分光, 而基于扫描振镜的视场偏移方式会导致在天光背景测量条件下对目标的波前探测与补偿出现间歇性中断。面对极其有限的钠回光光子数, 上述视场偏移波前探测技术并不能满足强天光背景下针对脉冲型钠导星的主动式大气湍流波前探测的应用需求。

基于上述应用需求, 笔者开展了强天光背景下针对暗弱钠导星的大气湍流波前畸变探测研究: 提出了一种采用谱域+空域+时域综合滤波抑制天光背景与同波长瑞利散射干扰的主动式波前探测技术, 完成了对该技术的理论分析、参数设计、部件研制及其与传统哈特曼波前探测器的系统集成。基于该技术, 在白天较强的天光背景条件下, 实现了基于钠导星的大气湍流波前畸变像差的实时探测, 并对钠导星AO应用的工作时段扩展进行了初步尝试。

2 理论分析

强天光背景光谱覆盖了暗弱钠导星回光的波长,

收稿日期: 2023-07-17; 修回日期: 2023-08-16; 录用日期: 2023-09-05; 网络首发日期: 2023-09-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61505215)

通信作者: *luoxi@ioe.ac.cn

而具有极窄线宽(35 Å)但中心波长能量利用率偏低 (>20%)的钠原子滤光技术,在抑制天光背景的同时会导致钠导星回光光子数发生极大损失,无法满足实际应用需求。鉴于此,笔者提出了谱域+空域+时域综合滤波的技术思路,在抑制天光背景与瑞利散射的同时,极力保持钠导星波长的能量利用率。

首先,在谱域滤波方面适当降低线宽要求,以极力保持钠导星波长的能量利用率,通过匹配钠导星中心波长抑制天光背景。目前,接受商用定制的 589 nm 中心窄带干涉滤光片可以做到以下指标:中心波长为 589.16 nm,中心波长峰值透射率为 94%,透射线宽为 0.5~1.0 nm(≥50% 峰值透射率对应的谱线宽度)。该高透射线宽完全覆盖了钠层原子 D₂线荧光光谱(589.1570~589.1605 nm)的范围^[6]。在实际应用中,为了兼顾对自然亮星信标的大气湍流波前探测能力,一般哈特曼波前探测光路的光谱会覆盖可见光波段。因此,理论上谱域滤波通过高效匹配钠导星中心波长来抑制其余天光背景波段对波前探测光路的影响,如图 1 所示。

其次,常用 AO 系统对钠导星回光成像的子孔径视场很小,一般在 100 μrad 量级@望远镜^[11]。但是,需要抑制的天光背景在 AO 系统外视场可视无限大,可被当作朗伯体来看待,即使与钠导星回光一起进入

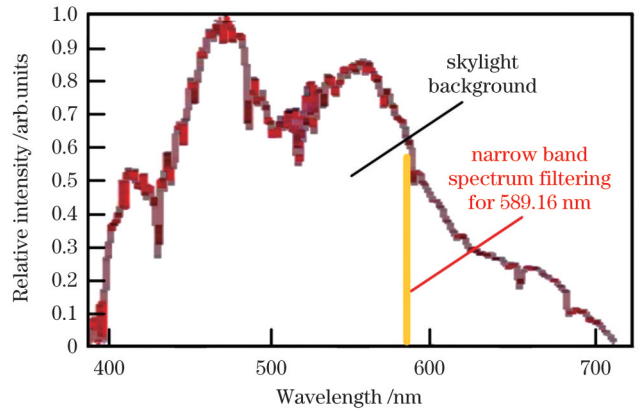


图 1 匹配钠导星中心波长谱域滤波抑制天光背景的原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of sodium laser guide star (LGS) center wavelength matched spectrum filtering for suppressing skylight background

AO 系统后,其视场也会比后者大,进而波前探测子孔径内的天光背景影响必然存在交叠^[10]。因此,理论上空域滤波就是在谱域滤波的基础之上,通过精确匹配波前探测器的子孔径视场来抑制天光背景,从而进一步避免其在子孔径内出现相互交叠的现象,如图 2 所示。其中,与哈特曼波前探测器所采用的阵列微透镜相匹配的是在 X 和 Y 两正交方向上可分别进行精密调节的视场光阑。

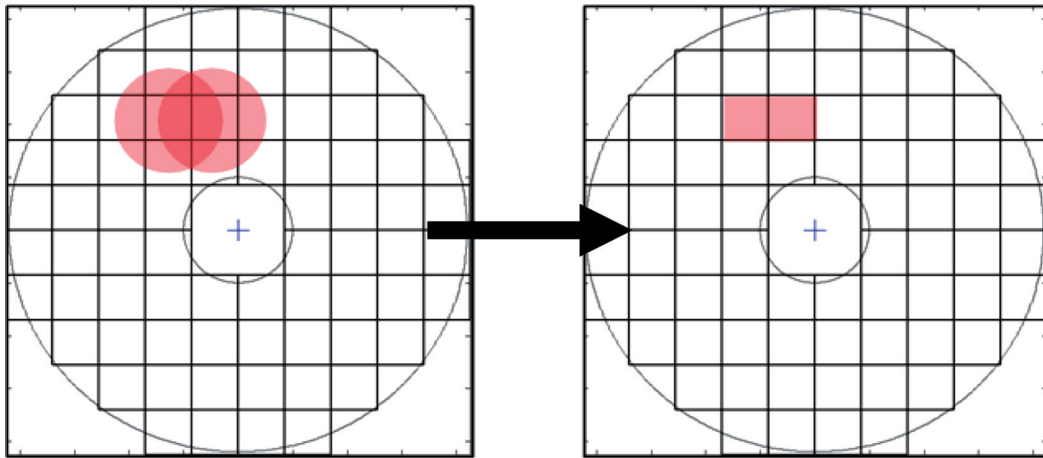


图 2 匹配子孔径视场空域滤波抑制天光背景的原理示意
Fig.2 Schematic diagram of sub-aperture field matched spatial filtering for suppressing skylight background

匹配 589.16 nm 中心波长窄带谱域滤波后的天光背景亮度为 $S_{\text{Spectrum-Filtering}}$ [单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$], 则匹配哈特曼波前探测器子孔径视场空域滤波后的单像素对应的天光背景功率为

$$P_{\text{HS-Pixel}} = S_{\text{Spectrum-Filtering}} \times \frac{S_{\text{HS-Pixel}}}{(F_{\text{Effect}})^2} \times S_{\text{HS-Subaperture}}, \quad (1)$$

式中: $S_{\text{HS-Pixel}}$ 、 F_{Effect} 、 $S_{\text{HS-Subaperture}}$ 分别为对应接收望远镜端的哈特曼波前探测器的等效像素面积、等效焦距、等效子孔径面积。

最后的关键是时域滤波。由于受激共振散射钠

导星通常是利用百微秒级(脉宽为 100~200 μs)脉冲型钠导星激光(波长为 589.15xx nm)激发大气钠层(高度为 80~100 km)中钠原子的共振荧光散射产生的^[12],其共振散射回光的时域特性同钠导星激光发射望远镜与 AO 观测望远镜的相对距离^[13]、钠导星激光器的输出脉宽、观测目标仰角、大气采样厚度、大气钠层采样中心高度等有关。因此,笔者以图 3 所示更为普适的分孔径收发双望远镜模式^[14],推导了脉冲型共振散射钠导星回光时域宽度 $\Delta t_{\text{Na}}(E)$,其公式为

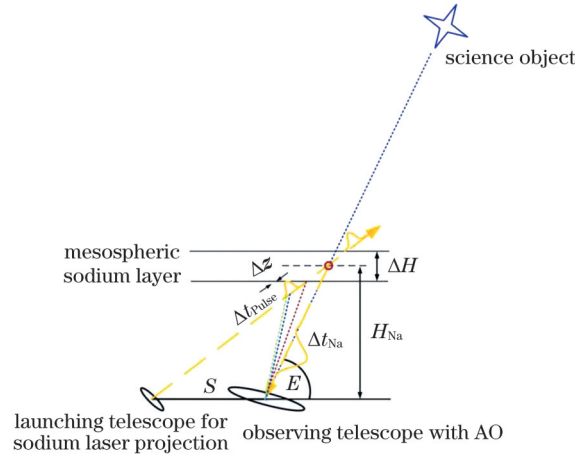


图 3 钠导星分孔径收发的双望远镜模式示意图

Fig. 3 Sketch of sodium LGS launching and receiving with separated telescopes

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{Na}}(E) = & \Delta t_{\text{Pulse}} + \frac{1}{c} \frac{\Delta H}{H_{\text{Na}}} \sqrt{[H_{\text{Na}} \csc(E)]^2 + S^2 + 2SH_{\text{Na}} \cot(E)} + \\ & \frac{1}{c} \sqrt{\left\{ [H_{\text{Na}} \cot(E) + S] \left[1 + \frac{\Delta H}{2H_{\text{Na}}} \right] - S \right\}^2 + \left[H_{\text{Na}} + \frac{\Delta H}{2} \right]^2} - \\ & \frac{1}{c} \sqrt{\left\{ [H_{\text{Na}} \cot(E) + S] \left[1 - \frac{\Delta H}{2H_{\text{Na}}} \right] - S \right\}^2 + \left[H_{\text{Na}} - \frac{\Delta H}{2} \right]^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: Δt_{Pulse} 为钠导星激光器的输出脉宽; c 为光速; H_{Na} 为大气钠层采样中心高度; ΔH 为采样厚度; E 为观测目标仰角; S 为钠导星激光发射望远镜与 AO 观测望远镜的相对距离。

特别地, 当 $S=0$ 时, 式(2)简化为钠导星激光同轴发射模式, 即 $\Delta t_{\text{Na}}(E) = \Delta t_{\text{Pulse}} + 2 \times \Delta H \csc(E)/c$ 。

在受激共振散射钠导星产生的同时必然伴随着相同波长 (589.15xx nm) 的大气分子近程 (一般高度在 45 km 以下) 瑞利散射的产生, 且其亮度比钠导星亮度高 3 个量级^[14]。为了对该近程瑞利散射进行有效抑制, 笔者以式(2)为基础, 针对钠导星激光脉冲前后沿近程瑞利散射回光对应的抑制高度 $H_{\text{Front-Edge}}(E)$ 和 $H_{\text{Rear-Edge}}(E)$ 进行了推导, 推导结果为

$$H_{\text{Front-Edge}}(E) = H_{\text{Na}} - \frac{\Delta H}{2}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H_{\text{Rear-Edge}}(E) = & \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\left\{ [H_{\text{Na}} \cot(E) + S] \left[1 - \frac{\Delta H}{2H_{\text{Na}}} \right] - S \right\}^2 + \left[H_{\text{Na}} - \frac{\Delta H}{2} \right]^2} + \right. \\ & \left. \sqrt{[H_{\text{Na}} \csc(E)]^2 + S^2 + 2SH_{\text{Na}} \cot(E)} \left[1 - \frac{\Delta H}{2H_{\text{Na}}} \right] - \Delta t_{\text{Pulse}} c + \right. \\ & \left. S \sqrt{1 - \frac{H_{\text{Na}}^2}{[H_{\text{Na}} \csc(E)]^2 + S^2 + 2SH_{\text{Na}} \cot(E)}} \right\} \times \frac{H_{\text{Na}}}{\sqrt{[H_{\text{Na}} \csc(E)]^2 + S^2 + 2SH_{\text{Na}} \cot(E)}}. \end{aligned} \quad (4)$$

特别地, 当 $S=0$ 时, 式(3)简化为钠导星激光同轴发射模式, 即 $H_{\text{Rear-Edge}}(E) = H_{\text{Front-Edge}}(E) - \Delta t_{\text{Pulse}} \frac{c}{2} \times \csc(E)$ 。

依据式(3)、(4)可得对应钠导星激光脉冲的近程瑞利散射时域抑制宽度 $\Delta t_{\text{Rayleigh-Stop}}(E)$, 即

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{Rayleigh-Stop}}(E) = & \frac{1}{c} \sqrt{[H_{\text{Na}} \csc(E)]^2 + S^2 + 2SH_{\text{Na}} \cot(E)} \left[1 - \frac{\Delta H}{2H_{\text{Na}}} \right] + \\ & \frac{1}{c} \sqrt{\left\{ [H_{\text{Na}} \cot(E) + S] \left[1 - \frac{\Delta H}{2H_{\text{Na}}} \right] - S \right\}^2 + \left[H_{\text{Na}} - \frac{\Delta H}{2} \right]^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

在钠导星激光发射望远镜与 AO 观测望远镜的相对距离 $S=6.0$ m、观测目标仰角 $E=45^\circ\sim 90^\circ$ 、钠导星激光器输出脉宽 $\Delta t_{\text{pulse}}=130$ μs 、大气钠层采样中心高度 $H_{\text{Na}}=90$ km, 以及采样厚度 $\Delta H=20, 25, 30$ km 的条件下, 得到了脉冲型共振散射钠导星回光的时域宽度 $\Delta t_{\text{Na}}(E)$, 以及钠导星激光脉冲前后沿近程瑞利散射回光的对应抑制高度 $H_{\text{Front-Edge}}(E)$ 和 $H_{\text{Rear-Edge}}(E)$ 随观测目标仰角 E 的变化, 分别如图 4 和图 5 所示。

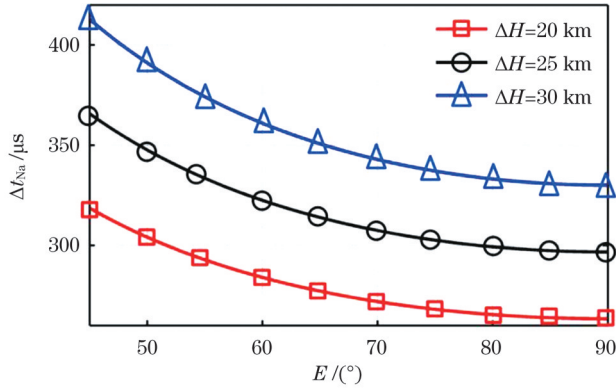


图 4 脉冲型共振散射钠导星回光时域宽度 $\Delta t_{\text{Na}}(E)$ 随观测目标仰角 E 的变化

Fig. 4 Duration of the pulsed resonance sodium LGS scattered return-light $\Delta t_{\text{Na}}(E)$ as a function of the observing elevation E

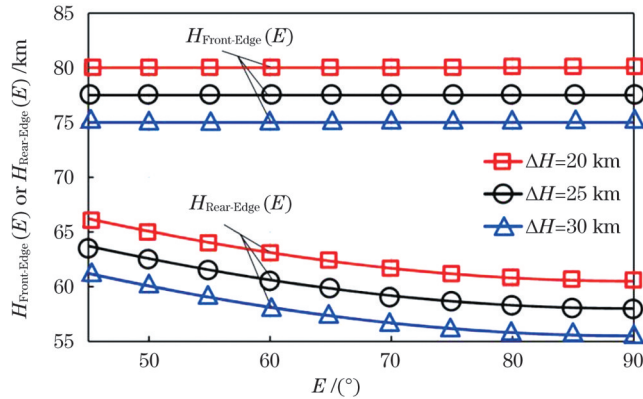


图 5 钠导星激光脉冲前后沿近程瑞利散射回光对应的抑制高度 $H_{\text{Front-Edge}}(E)$ 和 $H_{\text{Rear-Edge}}(E)$ 随观测目标仰角 E 的变化

Fig. 5 Suppression altitudes $H_{\text{Front-Edge}}(E)$ and $H_{\text{Rear-Edge}}(E)$ of the Rayleigh scattered light generated from the front- or rear-edge of the sodium LGS laser pulse as a function of the observing elevation E

与图 5 相对应的近程瑞利散射时域抑制宽度 $\Delta t_{\text{Rayleigh-Stop}}(E)$ 随观测目标仰角 E 的变化如图 6 所示。因此, 时域滤波的基本思想是: 通过精确控制 AO 波前探测器接收光路通光的时刻与时长, 只允许共振钠导星回光及其对应时间宽度的天光背景进入波前探测器, 从而匹配共振钠导星的回光宽度与回光高度, 抑制天光背景与瑞利散射。为了不额外损失钠导星波长的能量利用率, 在所需的观测目标仰角范围 ($E_{\text{min}} \rightarrow E_{\text{max}}$) 内, 依据脉冲

型共振散射钠导星回光时域宽度的最大值 $\Delta t_{\text{Na}}(E_{\text{min}})$ (如图 4 所示), 最大限度地降低压缩波前探测器 CCD 相机曝光周期 (亦即钠导星激光脉冲发射周期) 内天光背景的影响; 与此同时, 将钠导星激光脉冲前沿采样高度控制在 $H_{\text{Front-Edge}}(E) \geq 75$ km, 确保钠导星激光脉冲后沿散射回光高度 $H_{\text{Rear-Edge}}(E) \geq 55$ km (如图 5 所示), 以便完全抑制波前探测器 CCD 相机曝光周期 (亦即钠导星激光脉冲发射周期) 内近程瑞利散射的影响。

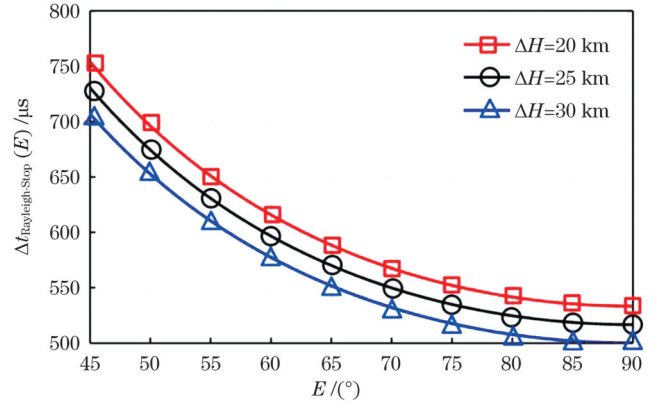


图 6 近程瑞利散射时域抑制宽度 $\Delta t_{\text{Rayleigh-Stop}}(E)$ 随观测目标仰角 E 的变化

Fig. 6 Suppression duration of the Rayleigh scattered light from low altitudes $\Delta t_{\text{Rayleigh-Stop}}(E)$ as a function of the elevation E

如图 6 所示, 在满足观测目标仰角需求的范围 ($E_{\text{min}} \rightarrow E_{\text{max}}$) 内, 钠导星激光脉冲的最高发射重复频率可达 $f_{\text{max}} \approx 1/[\Delta t_{\text{Na}}(E_{\text{min}}) + \Delta t_{\text{Rayleigh-Stop}}(E_{\text{min}})]$, 时域滤波的天光背景抑制百分比可达 $[1 - \Delta t_{\text{Na}}(E_{\text{min}}) \times f_{\text{max}}]$ 。例如, 当对应的大气钠层采样中心高度 $H_{\text{Na}}=90$ km、采样厚度 $\Delta H=25$ km 时, 时域滤波可以在钠导星激光脉冲最高发射重复频率 $f_{\text{max}} \approx 912$ Hz (已基本接近脉冲型钠导星激光的发射重复频率上限^[12])、观测目标仰角 $E \geq 45^\circ$ 的大气波前探测条件下, 实现对天光背景 66.7% 的抑制百分比以及对瑞利散射的完全抑制。

3 实验验证

3.1 实验系统搭建

在第 2 节理论分析的基础上, 笔者开展了基于人造钠导星的大气湍流波前探测实验。实验系统的基本原理如图 7 所示。实验系统主要由米级 AO 观测望远镜、钠导星激光器、钠导星激光发射控制倾斜镜、时序同步控制模块、哈特曼波前探测器、波前处理机等组成。其中, 时序同步控制模块用于实现对脉冲型钠导星激光发射与脉冲型钠导星共振回光探测的精确同步控制, 从而实现哈特曼波前探测器对钠导星回光所携带的大气湍流波前畸变信息的实时探测。

3.2 综合滤波参数设计

笔者将综合滤波技术引入基于传统哈特曼波前探

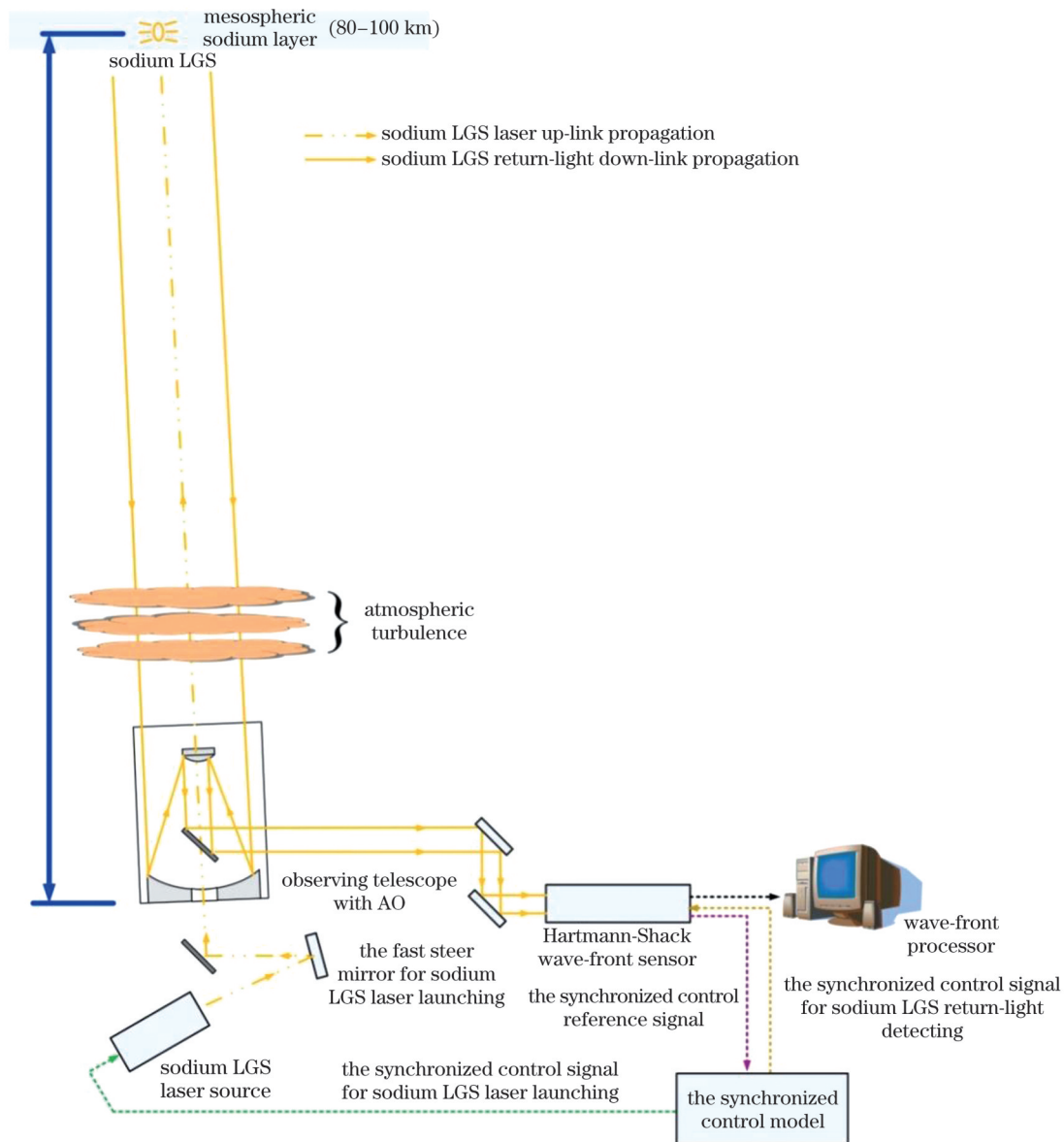


图 7 基于钠导星的大气波前像差探测实验系统示意图

Fig. 7 Experimental set-up schematic of atmospheric wave-front distortion detection using sodium LGS

测器的光学结构,以期实现在强天光背景下对暗弱钠导星所携带的大气湍流波前畸变信息的实时探测。该实验系统中的哈特曼波前探测器主要由光学变倍模块、高精度机械快门模块、高精度二维可调视场光阑、589 nm 中心窄带干涉滤光片、阵列微透镜、光学匹配模块、电子倍增型电荷耦合器件(EMCCD)探测器组成,如图 8 所示。

如前所述,笔者所提综合滤波技术的思想是通过综合滤波匹配(谱域+空域+时域)抑制天光背景与 589 nm 瑞利散射,同时尽量保持 589 nm 钠导星共振回光对应波长的能量利用率。

589 nm 中心窄带干涉滤光片用于实现高光学传输效率、纳米级谱宽精确匹配谱域滤波(中心波长为 589.16 nm,中心波长峰值透射率为 94%,透射线宽为 1.0 nm),高精度二维可调视场光阑用于实现哈特曼子孔径视场精确匹配空域滤波(调节精度为

20 $\mu\text{m}/\text{grid}$),高精度机械快门模块用于实现钠导星共振回光宽度/高度精确匹配时域滤波。

高精度机械快门模块的基本工作原理如图 9 所示。其中,安装于光学变倍模块前组焦点附近的机械快门盘片上沿径向分布着 M 个对应一定扇形张角 φ 的通光凹槽,在盘片以转速 $N(\text{r/s})$ 高速稳定旋转过程中,该模块以安装在盘片两边的光电开关检测到的周期性开门→关门(高电平→低电平)信号为同步基准信号 [周期 $T=1/(M \times N)$, $\Delta t_{\text{ON}}=\varphi/(N \times 360)$, $\Delta t_{\text{OFF}}=1/(M \times N)-\varphi/(N \times 360)$],分别对钠导星激光器出光时延、波前探测器采集时延进行同步控制,以确保对应特定宽度/高度的共振钠导星回光仅在波前探测器接收光路的单周期开门时段进入曝光,而在该周期的其余时段波处于关门状态,从而达到匹配钠导星共振回光的宽度/高度进而分别抑制天光背景/瑞

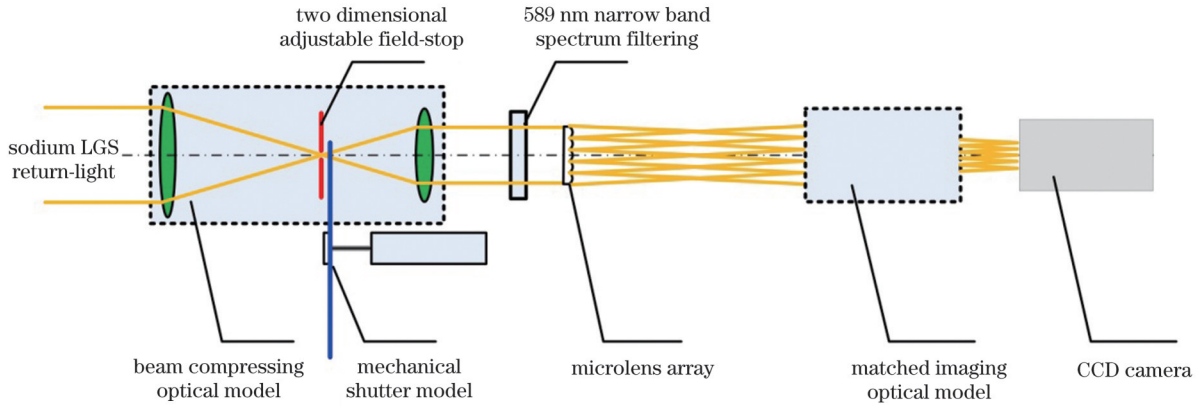


图 8 哈特曼波前探测器的结构原理示意图

Fig. 8 Schematic layout of Hartmann-Shack (HS) wave-front sensor

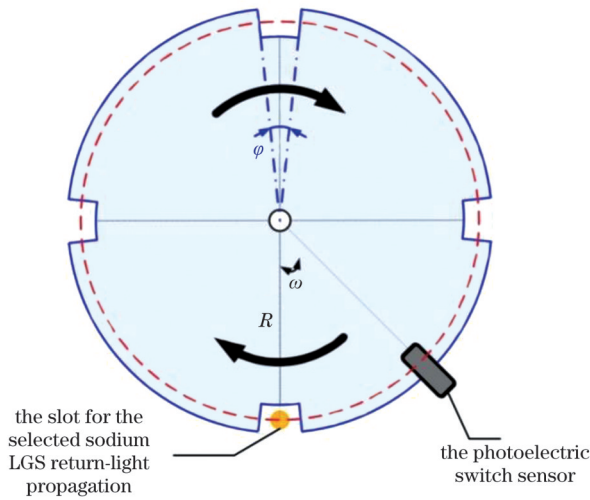


图 9 转盘式机械快门示意图

Fig. 9 Schematic layout of the rotating mechanical shutter

利散射干扰的目的。

机械快门盘片上单个通光凹槽对应的扇形张角 $\varphi \geq [2\Delta t_{\text{Rising}} + \Delta t_{\text{Na}}(E_{\text{min}})] \times N \times 360$ 。 Δt_{Rising} 是在钠导星回光光斑尺寸影响下机械快门盘片处波前探测器

接收光路由开始开门→完全开门(或由开始关门→完全关门)的渡越时间。与此同时,机械快门盘片上光电开关安装位置与钠导星回光光斑位置之间的径向角度偏离 ω 可以通过事先测量的方式进行精确标定。

在此基础上,笔者结合长脉冲型共振散射钠导星回光时域特性进行同步探测时序优化设计,对钠导星激光器同步出光时延 $\Delta t_{\text{Laser}}(E)$ 与波前探测器同步曝光读出时延 $\Delta t_{\text{HS-CCD}}(E)$ 进行精确控制(如图 10 所示),以期实现单周期内 AO 系统同步波前畸变探测至波前校正器补偿执行的时间延迟 τ_{Delay} 最小,从而优化 AO 系统的带宽^[15]。其中, τ_{Delay} 是包含 AO 系统中波前探测器相机读出时间、信号处理时间、波前校正器执行时间的时延总和。

钠导星激光器同步出光时延 $\Delta t_{\text{Laser}}(E)$ 与波前探测器同步曝光读出时延 $\Delta t_{\text{HS-CCD}}(E)$ 分别为

$$\Delta t_{\text{Laser}}(E) = \frac{\omega}{N} \times 360 + \Delta t_{\text{Rising}} - \Delta t_{\text{Rayleigh-Stop}}(E), \quad (6)$$

$$\Delta t_{\text{HS-CCD}}(E) = \frac{\omega}{N} \times 360 + \Delta t_{\text{Rising}} + \Delta t_{\text{Na}}(E), \quad (7)$$

即同步控制波前探测器同步曝光读出时延 $\Delta t_{\text{HS-CCD}}(E)$ 与钠导星激光器同步出光时延 $\Delta t_{\text{Laser}}(E)$ 的相对之差为

$$\Delta t_{\text{HS-CCD}}(E) - \Delta t_{\text{Laser}}(E) = \Delta t_{\text{Pulse}} + \frac{1}{c} \left[1 + \frac{\Delta H}{H_{\text{Na}}} \right] \sqrt{[H_{\text{Na}} \csc(E)]^2 + S^2 + 2SH_{\text{Na}} \cot(E)} + \frac{1}{c} \sqrt{\left\{ [H_{\text{Na}} \cot(E) + S] \left[1 + \frac{\Delta H}{2H_{\text{Na}}} \right] - S \right\}^2 + \left[H_{\text{Na}} + \frac{\Delta H}{2} \right]^2}. \quad (8)$$

在针对实际长脉冲型钠导星共振回光所携带的大气波前畸变信息进行外同步探测时,机械快门转盘上加工通光凹槽数目 M 为 2, 转速 N 为 125 r/s, 转盘通光挡光比为 1/7, 入射光束中心与快门轴心间距 R 为 50 mm, 最低开关时间设置精度 Δt_{Error} 约为 12 μs 。

在此基础上,根据 Bessel^[16] 所提计算方法并结合实验系统参数,笔者完成了综合滤波方案的探测能力预估[@典型 12 W/(m²·sr)^[10,17]]。结果显示,在尽量保持 589 nm 能量利用率的同时,所提技术可以实现

6400 倍(谱域滤波抑制 200 倍,空域滤波抑制 4 倍,时域滤波抑制 8 倍)的天光背景抑制比以及对瑞利散射的完全抑制。相较于前述具有极窄线宽(35 Å)但中心波长能量利用率偏低(>20%)的钠原子滤光技术,所提技术在滤波后的钠导星等效光子数以及探测信噪比上均具有优势。

对于较强天光背景条件下的钠导星大气波前探测,综合滤波技术与钠原子滤光技术的探测能力分别如表 1 和表 2 所示。

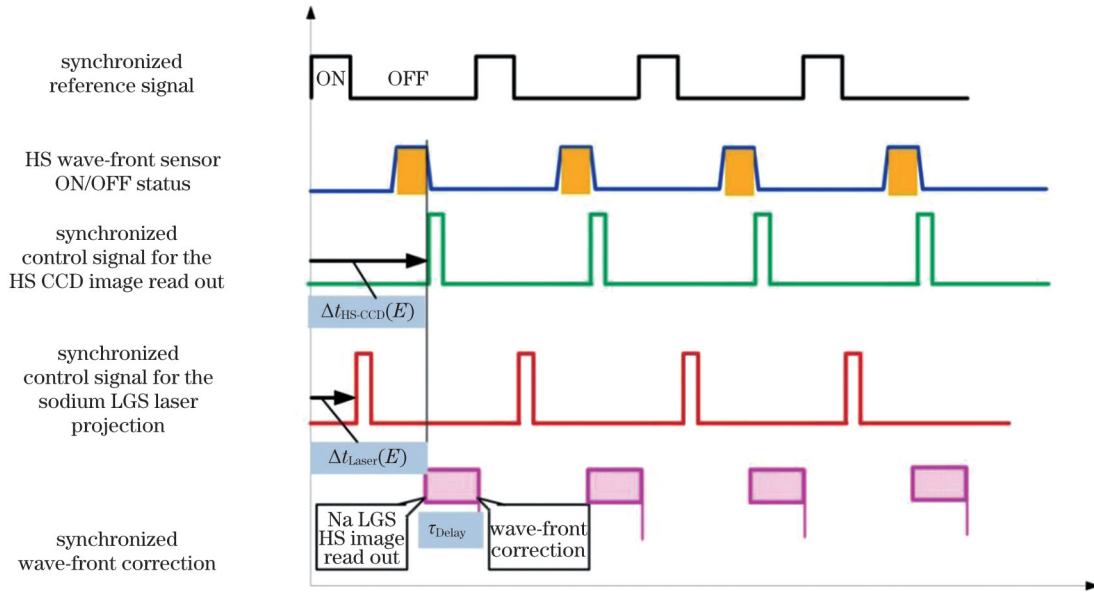


图 10 钠导星激光器同步发射时延 $\Delta t_{Laser}(E)$ 与 HS 波前探测器同步读出时延 $\Delta t_{HS-CCD}(E)$ 的精确外同步控制原理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of external synchronized control for sodium LGS laser projection delay $\Delta t_{Laser}(E)$ and HS wave-front CCD readout delay $\Delta t_{HS-CCD}(E)$

表 1 综合滤波的探测能力

Table 1 Detection capability evaluation for the synthetic filtering technique

Input source	Brightness	Input equivalent number of photons (numbers per sub-aperture per pixel per cycle)	Input signal-to-noise ratio	Equivalent number of photons after the synthetic filtering (numbers per sub-aperture per pixel per cycle)	Signal-to-noise ratio after the synthetic filtering
589 nm sodium LGS signal	7.0 magnitude	17.5	0.056	16.5	3.0
Skylight background interference	12 W/(m ² ·sr)	9.71×10 ⁴		14.2	
589 nm Rayleigh scattering interference	3.3 magnitude	Unable to eliminate completely in sub-apertures		Eliminate completely in sub-apertures	

表 2 钠原子滤波的探测能力

Table 2 Detection capability evaluation for the sodium atom filtering technique

Input source	Brightness	Input equivalent number of photons (numbers per sub-aperture per pixel per cycle)	Input signal-to-noise ratio	Equivalent number of photons after the sodium atom filtering (numbers per sub-aperture per pixel per cycle)	Signal-to-noise ratio after the sodium atom filtering
589 nm sodium LGS signal	7.0 magnitude	17.5	0.056	3.8	1.5
Skylight background interference	12 W/(m ² ·sr)	9.71×10 ⁴		2.6	
589 nm Rayleigh scattering interference	3.3 magnitude	Unable to eliminate completely in sub-apertures		Unable to eliminate completely in sub-apertures	

3.3 典型实验结果

基于上述综合滤波技术,开展了强天光背景下基于钠导星的大气波前像差探测研究,典型结果如图 11 所示。在白天较强的天光背景[$\approx 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$]下,综合滤波技术成功实现了基于暗弱钠导星的大气波前像差探测。首先通过谱域与空域滤波实现对哈特曼波前探测器子孔径内天光背景交叠影响的有效抑制,使子孔

径内的天光背景变得相对均匀;在此基础上,通过时间滤波进一步匹配抑制天光背景与瑞利散射的影响,使暗弱钠导星信号在哈特曼波前探测器的子孔径内突显出来,其典型的子孔径内钠导星信号的平均能量探测信噪比约为 3.5(如图 12 所示)。利用波前处理机对实验同步采集的钠导星回光采样大气湍流波前进行重构,其前 35 阶 Zernike 模式的统计方差如图 13 所示。

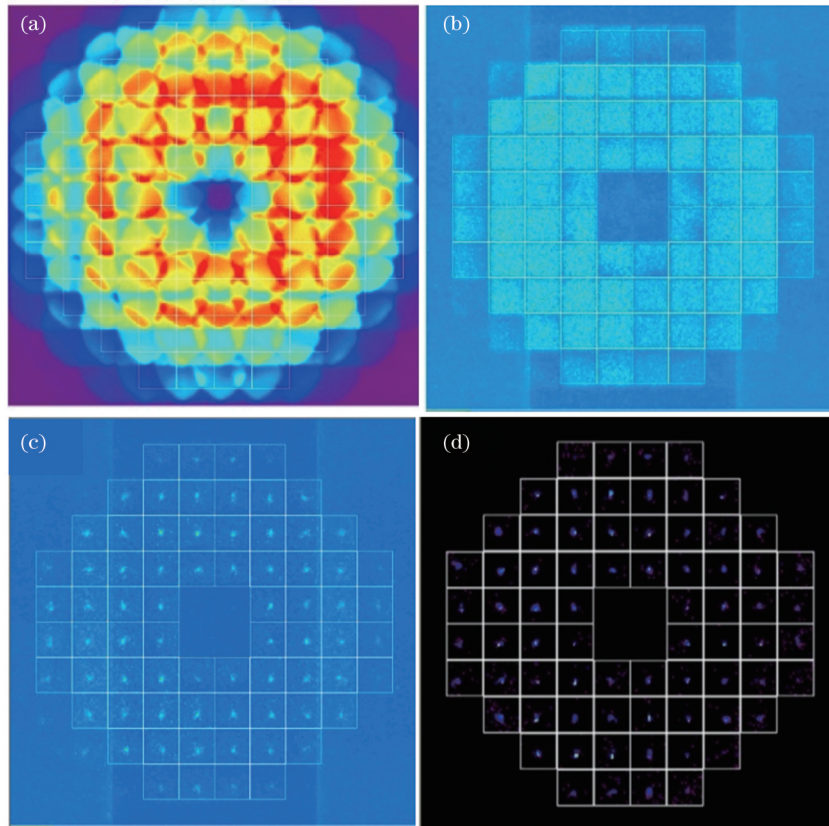


图 11 综合滤波技术在较强天光背景下实现对暗弱钠导星大气波前像差探测的典型实验结果。(a) 强天光背景对暗弱钠导星大气波前像差探测的影响; (b) 谱域滤波+空域滤波对 HS 波前探测器子孔径内天光背景的抑制作用; (c) 时域滤波对 HS 波前探测器子孔径内天光背景的抑制作用; (d) 综合滤波后 HS 波前探测器子孔径内的自适应阈值处理

Fig. 11 Typical experimental results of the atmospheric wave-front aberration detection with sodium LGS under strong skylight background by our proposed synthetic filtering technique. (a) Influence of strong skylight background on the atmospheric wave-front aberration detection with weak sodium LGS; (b) inhibitory effect on skylight background in sub-apertures of HS wave-front sensor by the spectrum filtering plus spatial filtering; (c) further inhibitory effect on skylight background in sub-apertures of HS wave-front sensor by the temporal filtering; (d) adaptive threshold processing in sub-apertures of HS wave-front sensor after the proposed synthetic filtering technique

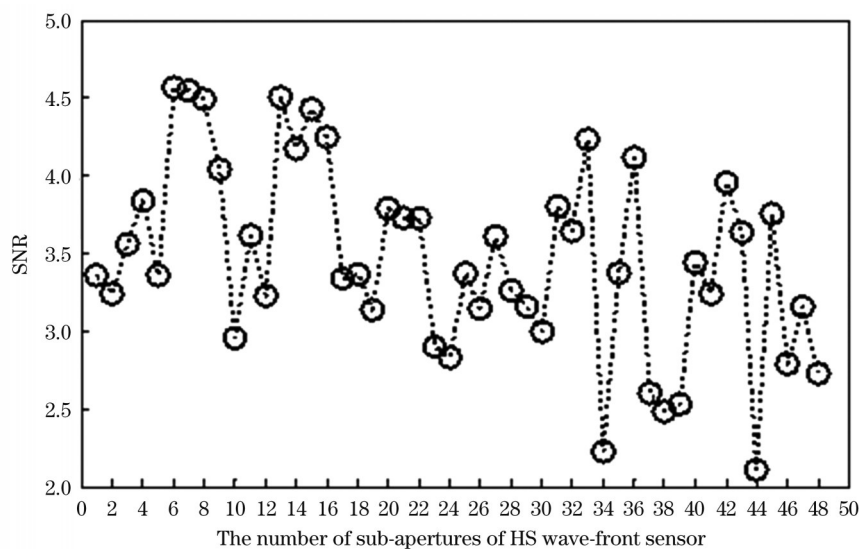


图 12 综合滤波后 HS 波前探测器子孔径内的钠导星探测信噪比

Fig. 12 Experimental results of SNR of the sodium LGS in sub-apertures of HS wave-front sensor after the proposed synthetic filtering technique

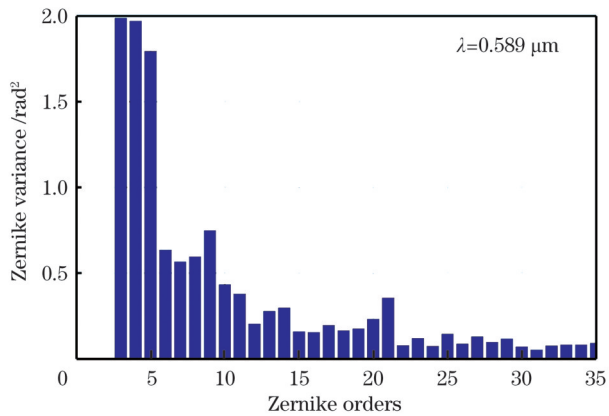


图 13 重构钠导星采样大气湍流波前的第 3~35 阶 Zernike 模式统计方差结果

Fig. 13 The 3rd-35th Zernike variances of the atmospheric wavefront aberration reconstruction with sodium LGS

4 结 论

结合较强天光背景下对暗弱钠导星携带的大气波前畸变像差信息实时探测的 AO 应用需求,本文提出了一种谱域+空域+时域综合滤波的主动式波前探测技术,该技术可在匹配抑制强天光背景与 589 nm 强瑞利散射干扰的同时,尽量保持 589 nm 钠导星波长的能量利用率。笔者完成了对该技术的理论分析,并结合实验系统完成了该技术的参数设计和探测能力预估。然后以此分析为基础,开展了对该技术的部件研制、系统集成,以及白天钠导星的大气波前探测实验。实验结果显示,在约 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 的天光背景下,所提技术实现了基于钠导星的大气波前畸变像差的实时探测。理论分析与实验结果表明,该技术可为钠导星 AO 系统在白天条件下的应用提供一定的理论参考与工程经验。

参 考 文 献

- [1] Hardy J W. Adaptive optics for astronomical telescopes[M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [2] Humphreys R A, Primmerman C A, Bradley L C, et al. Atmospheric-turbulence measurements using a synthetic beacon in the mesospheric sodium layer[J]. Optics Letters, 1991, 16(18): 1367-1369.
- [3] Humphreys R A, Bradley L C, Herrmann J. Sodium-layer synthetic beacons for adaptive optics[J]. The Lincoln Laboratory Journal, 1992, 5(1): 45-66.
- [4] Max C E, Olivier S S, Friedman H W, et al. Image improvement from a sodium-layer laser guide star adaptive optics system[J]. Science, 1997, 277(5332): 1649-1652.
- [5] Wei K, Li M, Chen S Q, et al. First light for the sodium laser guide star adaptive optics system on the Lijiang 1.8 m telescope[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2016, 16(12): 183-189.
- [6] 晋凯. 钠信标自适应光学系统波前探测问题研究[D]. 成都:中国科学院光电技术研究所, 2017: 10-13.
- [7] Jin K. Research on wavefront detection of sodium beacon adaptive optical system[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2017: 10-13.
- [8] Beckers J M, Cacciani A. Using laser beacons for daytime adaptive optics[J]. Experimental Astronomy, 2001, 11(2): 133-143.
- [9] Beckers J M. The daytime use of adaptive optics for solar and stellar extremely large telescopes[C]//2002 European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings, May 7-10, 2002, Venice, Italy. Garching: European Southern Observatory, 2002, 58: 83-89.
- [10] Wilson K E, Wright M W, Lee S, et al. Adaptive optics for daytime deep space laser communications from Mars[C]//Digest of the LEOS Summer Topical Meetings, July 25-27, 2005, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2005: 19-20.
- [11] 李超宏. 白天条件下基于视场偏移的哈特曼波前传感器性能研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2007: 79-89.
- [12] Li C H. Research on the performance of field-of-view shifted Shack-Hartmann wavefront sensor in daytime[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics Chinese Academy of Sciences, 2007: 79-89.
- [13] 姜文汉. 光电技术研究所的自适应光学技术[J]. 光电工程, 1995, 22(1): 1-13.
- [14] Jiang W H. Adaptive optics techniques investigation in Institute of Optics and Electronics[J]. Opto-Electronic Engineering, 1995, 22(1): 1-13.
- [15] 许祖彦, 薄勇, 彭钦军, 等. 激光钠导星技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0101001.
- [16] Xu Z Y, Bo Y, Peng Q J, et al. Progress on sodium laser guide star[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1): 0101001.
- [17] Viard E, Delplancke F, Hubin N, et al. Rayleigh scattering and laser spot elongation problems at ALFA[J]. Experimental Astronomy, 2000, 10(1): 123-133.
- [18] Parenti R R. Adaptive optics for astronomy[J]. The Lincoln Laboratory Journal, 1992, 5(1): 93-114.
- [19] 罗奇, 李新阳. 信标及波前探测模式对自适应光学系统控制性能的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0801003.
- [20] Luo Q, Li X Y. Effects of beacons and wave-front detecting modes on control performance of adaptive optics systems[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0801003.
- [21] Bessell M S. UBVR photometry. II - The cousins VRI system, its temperature and absolute flux calibration, and relevance for two-dimensional photometry[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1979, 91: 589-607.
- [22] 卢刚. 天光背景弱小目标探测与识别技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2008: 19-25.
- [23] Lu G. Detection and recognition technology of small and weak targets in skylight background[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008: 19-25.

Atmospheric Wave-Front Aberration Detection Using Sodium Laser Guide Star Under Strong Skylight Background

Luo Xi^{1,2*}, Li Xinyang^{1,2}, Wang Caixia¹, Wang Xiaoyun¹, Hu Shijie¹

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective Adaptive optics (AO) applied in compensation for atmospheric turbulence usually requires a sufficient guide star (GS) in the isoplanatic patch around the interesting object to provide accurate information of the wave-front distortion induced by atmospheric turbulence. However, as there are not enough bright and available natural guide stars (NGSs) in the sky, the concept of a sodium laser guide star (LGS) has been publicly proposed for overcoming the limitations due to the finite sky coverage of the observation telescope with AO, which is generated by resonance scattering from the sodium atoms in the mesospheric layer with a ground-based projected laser with a wavelength of 589 nm. Due to sufficient sampling of the atmospheric turbulence at high altitude, the concept of a sodium LGS has been receiving huge attention from the moment it was proposed and was first to be applied in the field of high-resolution astronomical observation through atmospheric turbulence with AO. However, due to the limitations of the excitation efficiency of LGS lasers and the sodium column density of the mesospheric layer, the actual brightness of the generated sodium laser guide star is limited. Therefore, so far, in the field of astronomical observation, almost all sodium LGS AO systems have to operate at night, so their operation hours have been greatly limited. Under daytime conditions, the effectiveness of sub-aperture segmentation wavefront centroid detection using a Hartmann-Shack (HS) sensor with weak photon returns from sodium LGS is challenging, due to the fact that the intensity of the skylight background can reach several thousand times that of the sodium LGS. The objective of this paper is to develop a reliable and practical atmospheric turbulence wave-front sensing technique for sodium LGS, which can provide a certain theoretical reference and engineering experience for daytime applications of sodium LGS AO systems in the future.

Methods Based on the aforementioned purpose, by combining theoretical analysis, parameter design, component development, system integration and detection experiment, an atmospheric wave-front active sensing technique for sodium LGS during daytime has been investigated in this paper. Our guiding ideology is to use spectral filtering, spatial filtering, and temporal filtering to match and suppress strong stray light interference while making an effort to maintain the photon returns from the sodium LGS at the wavelength of 589 nm. The above mentioned strong stray light interference includes the skylight background and Rayleigh back scattering at 589 nm of the atmospheric molecules. Firstly, based on the optical spectrum distribution characteristics of the skylight background, the feasibility of spectral filtering for a high optical transmittance with a nanometer scale line-width and a 589.16 nm center wavelength is analyzed. Secondly, based on the field of view (FOV) distribution characteristics of the skylight background, the feasibility of spatial filtering for accurately matching the FOV of the sub-aperture for the HS sensor is analyzed. Finally, in combination with the universal dual telescope mode for pulsed sodium LGS laser projection/sodium LGS photon return detection, the mathematical expressions of important parameters such as the duration of the pulsed resonance sodium LGS scattered return-light $\Delta t_{\text{Na}}(E)$, the suppression duration of the Rayleigh scattered light from low altitudes $\Delta t_{\text{Rayleigh-Stop}}(E)$ and so on are derived, which constitute the theoretical foundation of our temporal filtering. Based on the above analysis and combined with the construction of an experimental system, parameter design, detection ability estimation, and component development are carried out for our synthetic filtering and applied in traditional HS sensors. A daytime atmospheric wave-front detection experiment for sodium LGS is carried out. The experimental results are in good agreement with those of the theoretical analysis.

Results and Discussions Due to the demand for atmospheric wave-front detection for sodium LGS AO during daytime, an active wavefront sensing technique with synthetic filtering (namely, spectral filtering, spatial filtering and temporal filtering) is proposed in this paper. The detection ability after synthetic filtering is estimated, it can achieve effective atmospheric wavefront detection of an equivalent of 7-magnitude brightness sodium LGS under typical 12 W/(m²·sr) skylight background conditions (Table 1). Compared with traditional sodium atom filtering (Table 2), it has advantages regarding the equivalent photon returns maintained and the signal to noise (SNR) ratio for sodium LGS in an HS sensor. Based on this technique, a real-time detection of atmospheric wave-front distortion with sodium LGS under 10 W/(m²·sr) skylight background conditions is achieved (Fig. 11), which is a beneficial attempt for daytime atmospheric wave-front detection with sodium LGS.

Conclusions In response to the demand for atmospheric wavefront distortion detection with sodium LGS under strong skylight background, an active wavefront detection technique with synthetic filtering is proposed and investigated in this paper.

Synthetic filtering is used to match and suppress strong stray light interference while making an effort to maintain the photon returns from sodium LGS. The theoretical analysis, parameter design and detection capability estimation for this technique are discussed. Then, using this technique, atmospheric wave-front distortion detection for AO using sodium LGS is carried out experimentally. When the brightness of the sky background is $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, the atmospheric wave-front distortion is effectively detected based on the pulsed sodium LGS in real-time. This work is helpful in expanding the working period of the sodium LGS AO systems.

Key words adaptive optics; sodium laser guide star; skylight background; wavefront detection