

DOI: 10.12086/oe.2021.210076

偏振哈特曼波前探测技术研究

郭庭^{1,2,3}, 张彬^{1*}, 顾乃庭^{2,3*}, 饶长辉^{2,3},
黄林海^{2,3}, 许多^{2,3}, 肖亚维^{2,3}

¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064;

² 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

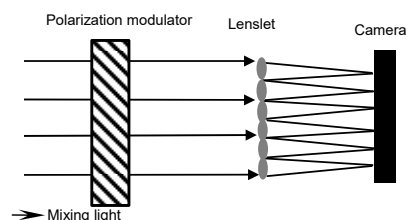
³ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

摘要: 针对白天强背景条件下自适应光学系统哈特曼传感器信背比低、波前探测精度不高等问题, 利用人造目标与强背景偏振特性差异, 提出基于偏振调制的哈特曼波前探测方法, 将传统的哈特曼波前探测从强度维度转换到偏振维度, 有效提升信背比和波前探测精度。阐述了偏振哈特曼波前探测基本方法和原理, 并通过数值模拟仿真验证了方法的正确性和准确性。研究表明: 偏振哈特曼探测技术能够有效提升强背景条件下信背比和波前探测精度, 显著增强自适应光学系统在强背景条件下的工作能力。

关键词: 自适应光学; 强背景; 偏振哈特曼传感器; 偏振调制

中图分类号: TH751; O436.3

文献标志码: A



郭庭, 张彬, 顾乃庭, 等. 偏振哈特曼波前探测技术研究[J]. 光电工程, 2021, 48(7): 210076

Guo T, Zhang B, Gu N T, et al. Research on polarization Hartmann wavefront detection technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(7): 210076

Research on polarization Hartmann wavefront detection technology

Guo Ting^{1,2,3}, Zhang Bin^{1*}, Gu Naiting^{2,3*}, Rao Changhui^{2,3}, Huang Linhai^{2,3},
Xu Duo^{2,3}, Xiao Yawei^{2,3}

¹Sichuan University, School of Electronic Information, Chengdu, Sichuan 610064, China;

²Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract: Aiming at the problems of low signal-to-background ratio and low wavefront detection accuracy of the adaptive optical system Hartmann sensor under strong background conditions during the day, based on the difference in polarization characteristics between man-made targets and strong backgrounds, a polarized Hartmann wavefront detection technology is proposed. The traditional Hartmann wavefront detection is converted from the

收稿日期: 2021-03-17; 收到修改稿日期: 2021-05-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金和优秀青年基金资助项目(61905252, 12022308); 中国科学院青年创新促进会资助项目(2018412)

作者简介: 郭庭(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: gt1356792379@163.com

通信作者: 张彬(1969-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光传输与控制、高功率激光技术及器件等领域的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com

顾乃庭(1984-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学成像、自适应光学及光场探测技术的研究。

E-mail: gunaiting@ioe.ac.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

intensity dimension to the polarization dimension, thereby effectively improving the signal-to-background ratio and wavefront detection accuracy. The basic methods and principles of polarized Hartmann wavefront detection are described, and the correctness and accuracy of the method are verified through numerical simulations and experiments. Theoretical and numerical simulation results show that the polarized Hartmann wavefront detection technology can effectively improve the signal-to-background ratio and wavefront detection accuracy under strong background conditions, and significantly enhance the ability of the adaptive optical system to work under strong background conditions.

Keywords: adaptive optics; strong background; polarized Hartmann sensor; polarization modulation

1 引言

自适应光学经过四十余年的不断发展,理论探索和工程应用已日渐成熟,被广泛应用于天文观测、空间监测、激光传输系统、通讯和医学等领域^[1-2]。哈特曼波前传感器是自适应光学系统的重要组成部分,与其他波前传感器相比具有结构简单、实时性好、抗振能力强等优势,是目前自适应光学系统中使用最广泛的波前探测器^[3-5]。当哈特曼波前传感器在白天等强背景场合进行波前探测时,由于强背景的干扰使得波前计算中质心计算误差增大,并显著降低波前探测精度^[6],这严重制约了自适应光学系统在强背景条件下的工作能力和使用范围。

针对强背景下的目标探测,国内外学者提出了多种方法。姜文汉等^[7]人提出通过减全局阈值的方法来减轻杂散光、器件噪声的影响,但在白天条件下,入射到哈特曼传感器中的天光背景很强且分布不均匀并伴随着不断的变化,因此减全局阈值的方法很难有效去除强背景。Jacques 等^[8]在激光导星超窄谱滤波探测目标方面进行了研究,提出了使用激光信标进行日间自适应光学的方法,但在控制上存在一定难度。John 等^[9]研究了视场光阑对天光背景的限制作用,通过在波前传感器中放置光阑可适当抑制背景强度,但对解决强背景条件下的畸变波前测量问题并不十分有效。徐维安^[10]提出了一种光谱滤波方法,其根据目标与大气散射光背景的光谱差来削弱天光背景,可以在一定程度上削弱背景光对目标检测的影响,但需要结合其他手段,单独使用效果有限。李旭旭等^[11]人提出了一种基于统计排序的减去局部自适应阈值方法,与传统的全局阈值方法相比,局部阈值自适应方法可以更有效地分割阵列光斑,从而降低背景噪声对质心估计的影响,减少波面复原误差。然而,这种将背景光和信号光等额去除的方法无法应用于背景光较强场景,应用范围受限。张锐进^[12]提出了一种偏振滤波方法,基

于天光背景与恒星目标的偏振特性差异,可在一定程度上抑制偏振背景光,但天光背景偏振相对较弱,且偏振滤波也同样减弱信号光强度,信背比提升有限。李超宏等^[6]人提出一种视场偏移的强背景条件下波前探测方法,该方法将小角度范围内的天光背景视为均匀分布背景光源,通过探测目标及其周围背景强度分布求取差分计算波前像差,能够有效减弱强背景干扰。然而,这种系统空间结构复杂,实时性受限,对背景均匀性要求较高。上述这些方法均不同程度提升了白天等强背景条件下哈特曼波前探测信背比和精度,但均在强度维度对背景进行处理,性能提升遇到瓶颈,亟需探索强背景条件下哈特曼波前探测新方法。

基于上述背景,本论文提出了一种新型偏振哈特曼波前探测方法,利用探测目标与背景光偏振特性^[13]的差异,将哈特曼波前探测结果从强度维度变换到偏振维度,从而有效提升波前探测信背比和波前探测精度。文中阐述了偏振哈特曼波前探测技术基本方法和原理,并通过数值仿真验证了方法正确性和可行性。

本论文结构安排如下:第2部分介绍了偏振哈特曼波前探测基本方法和原理;第3部分对给出的原理展开仿真计算,首先说明了强背景对目标探测的影响,其次通过与传统方式的对比获取到各方案的强背景处理效果,进而展开波前的复原,以及误差计算证明偏振调制法对自然光下的波前探测中强背景的去除效果极好且波前复原精度极高;最后进行总结。

2 偏振哈特曼波前探测原理

强背景条件下哈特曼波前探测示意图如图1所示。信号光(Signal light)和背景光(background light)经过微透镜阵列(lenslet array)后聚焦于位于焦平面的探测器(camera)上。其中,信号光由于视场较小,在探测器平面形成与入射波前(wavefront)相位分布有关的光斑阵列,背景光来源视场较大,在探测器平面分布较为弥散,形成信号光光斑阵列的干扰背景。

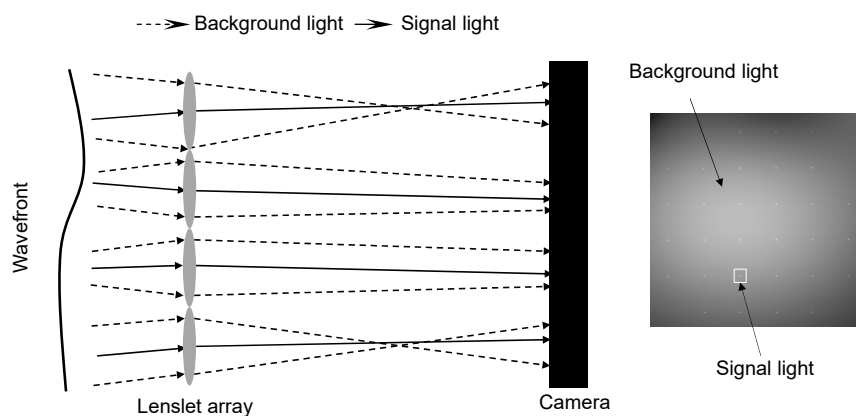


图 1 强背景场景下的哈特曼波前探测示意图

Fig. 1 Schematic map of the Hartmann sensor under the strong background scene

弱背景和强背景条件下, 哈特曼波前探测器光斑阵列示意图如图 2 所示。这里以 $S_0(x, y)$ 和 $B_0(x, y)$ 分别表示哈特曼波前探测器入射的信号光和背景光, 则信号光和背景光组成的混合光 $I(x, y)$ 可表示为

$$I(x, y) = S_0(x, y) + B_0(x, y) \quad (1)$$

一般采用背信比 R_{BS} 来表示背景光与信号光的相

对强度^[5], 如下式所示:

$$R_{BS} = \iint_{x,y} B_0(x, y) dx dy / \iint_{x,y} S_0(x, y) dx dy \quad (2)$$

瞄准大背信比应用场景, 本论文提出一种新型偏振哈特曼波前探测方法, 其基本原理如图 3 所示。与传统哈特曼波前探测不同, 偏振哈特曼波前探测器在

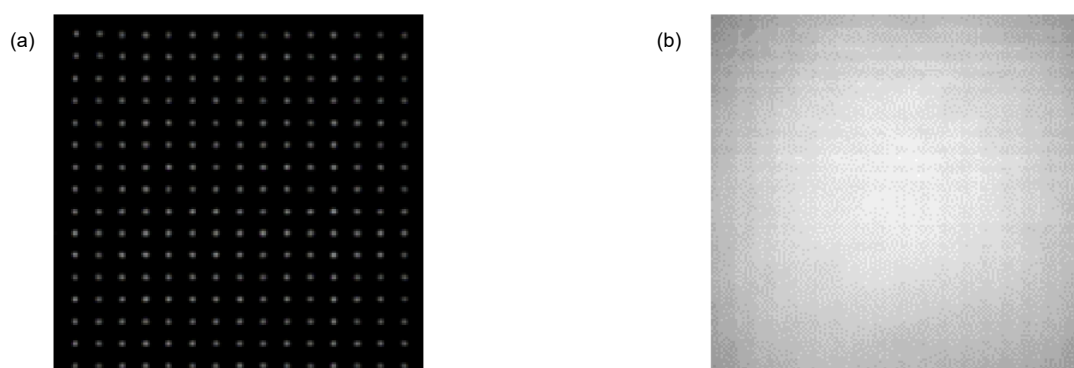


图 2 哈特曼波前探测光斑阵列图。(a) 弱背景; (b) 强背景

Fig. 2 Spot array of the Hartmann-Shack wavefront sensor. (a) Weak background light; (b) Strong background light

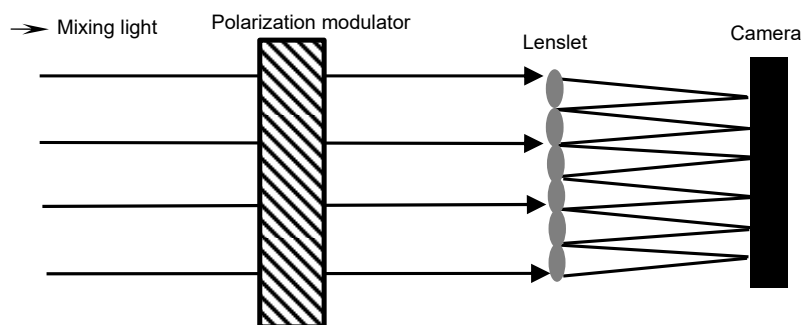


图 3 偏振哈特曼波前探测技术原理示意图

Fig. 3 Basic principle of the proposed polarization Hartmann wavefront sensor

微透镜阵列前增加了偏振调制器(polarization modulator), 用来获取不同偏振调制状态下的强度探测图像, 采用偏振差分原理将直接探测到的强度信号转换为偏振信号, 最终利用探测目标与背景光偏振特性的差异将哈特曼波前探测结果从强度维度变换到偏振维度, 有效抑制强背景光对入射信号光波前探测精度的影响。

一般来说, 背景光来自于周围物体的散射光, 尤其是天空背景光, 其一般为自然光(无偏光)或与角度相关的弱偏振光。为了清晰阐述偏振哈特曼波前探测技术的原理, 本文首先假定背景光为自然光, 信号光为混合偏振光, 这里以线偏振调制为例阐述偏振哈特曼波前探测基本原理。

如图 4, 其中: $B(x, y)$ 表示自然背景光强度, $S(x, y)$

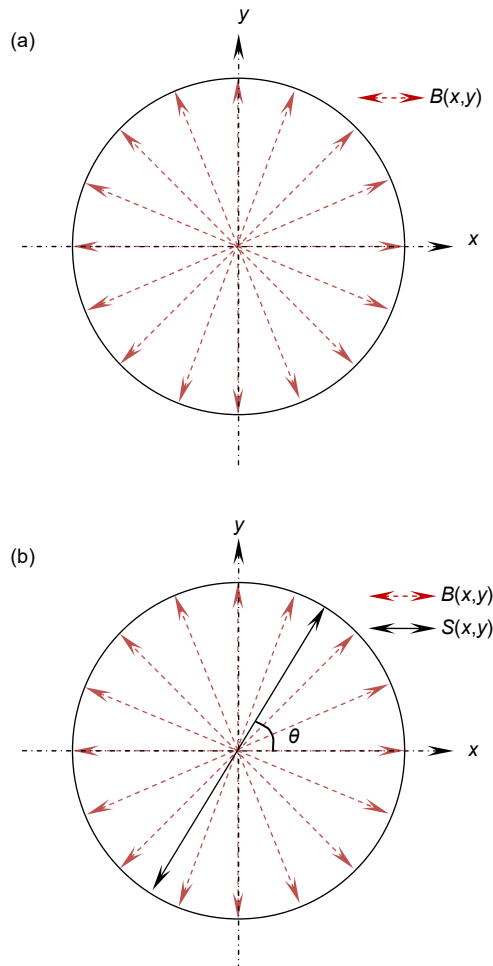


图 4 混合光偏振态示意图。(a) 背景光偏振态示意图; (b) 信号光与背景光偏振态示意图

Fig. 4 Schematic map of the polarization state of mixed light. (a) Schematic map of the polarization state of background light; (b) Schematic map of the polarization state of signal light and background light

表示信号光中线偏振信号强度(圆偏振信号光和非偏振信号光在线偏振调制中被抑制), 如图 4(a), 自然光沿各个方向的振动强度相同, 如图 4(b), 线偏振信号沿固定方向振动。取偏振哈特曼线偏振调制的起偏角与水平方向夹角分别为 0° 、 45° 、 90° 、 135° , 如图 5。则透射的光强 $I_0(x, y)$ 、 $I_{45^\circ}(x, y)$ 、 $I_{90^\circ}(x, y)$ 及 $I_{135^\circ}(x, y)$ 可以表示为

$$\begin{cases} I_0(x, y) = S_0(x, y) + B_0(x, y) \\ I_{45^\circ}(x, y) = S_{45^\circ}(x, y) + B_{45^\circ}(x, y) \\ I_{90^\circ}(x, y) = S_{90^\circ}(x, y) + B_{90^\circ}(x, y) \\ I_{135^\circ}(x, y) = S_{135^\circ}(x, y) + B_{135^\circ}(x, y) \end{cases}, \quad (3)$$

其中: $S_0(x, y)$ 、 $S_{45^\circ}(x, y)$ 、 $S_{90^\circ}(x, y)$ 及 $S_{135^\circ}(x, y)$ 和 $B_0(x, y)$ 、 $B_{45^\circ}(x, y)$ 、 $B_{90^\circ}(x, y)$ 及 $B_{135^\circ}(x, y)$ 分别表示沿四个起偏角 0° 、 45° 、 90° 和 135° 进行线偏振调制后的信号光强度和背景光强度, 其表示式:

$$\begin{cases} S_0(x, y) = S(x, y) \cos^2 \theta \\ S_{45^\circ}(x, y) = S(x, y) \cos^2 (\theta - 45^\circ) \\ S_{90^\circ}(x, y) = S(x, y) \cos^2 (\theta - 90^\circ) \\ S_{135^\circ}(x, y) = S(x, y) \cos^2 (\theta - 135^\circ) \\ B_0(x, y) = B_{45^\circ}(x, y) = B_{90^\circ}(x, y) \\ = B_{135^\circ}(x, y) = B(x, y) / 2 \end{cases}. \quad (4)$$

取四次偏振调制状态下哈特曼波前探测器直接探测到的强度并作两两垂直方向上的差分, 用 $\Delta I_1(x, y)$ 表示 0° 和 90° 的差分结果, $\Delta I_2(x, y)$ 表示 45° 和 135° 的差分结果, 则:

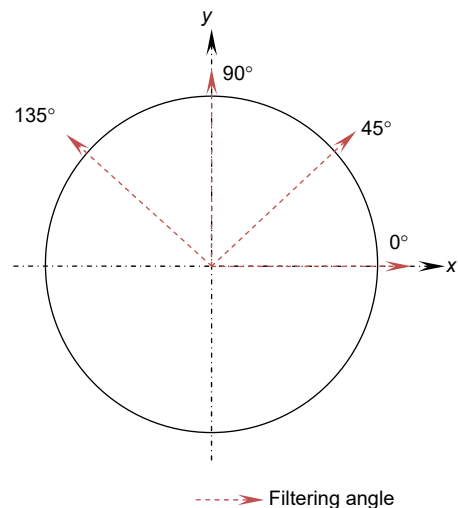


图 5 偏振哈特曼传感器的偏振调制示意图

Fig. 5 Schematic map of polarization modulation of the polarization Hartmann sensor

$$\begin{aligned}\Delta I_1(x, y) &= I_{0^\circ}(x, y) - I_{90^\circ}(x, y) \\ &= S_{0^\circ}(x, y) + B_{0^\circ}(x, y) - S_{90^\circ}(x, y) - B_{90^\circ}(x, y) \\ &= S_{0^\circ}(x, y) - S_{90^\circ}(x, y) \\ &= S(x, y) [\cos^2 \theta - \cos^2(\theta - 90^\circ)] \\ \Delta I_2(x, y) &= I_{45^\circ}(x, y) - I_{135^\circ}(x, y) \\ &= S(x, y) [\cos^2(\theta - 45^\circ) - \cos^2(\theta - 135^\circ)]\end{aligned}\quad (5)$$

由式(5), 经过差分处理后获取到 $\Delta I_1(x, y)$, $\Delta I_2(x, y)$, 为避免出现负值, 可取偏振差分信号的绝对值之和作为偏振哈特曼波前计算输入信号, 记为 $P(x, y)$:

$$\begin{aligned}P(x, y) &= |\Delta I_1(x, y)| + |\Delta I_2(x, y)| \\ &= |S(x, y) [\cos^2 \theta - \cos^2(\theta - 90^\circ)]| \\ &\quad + |S(x, y) [\cos^2(\theta - 45^\circ) - \cos^2(\theta - 135^\circ)]|\end{aligned}\quad (6)$$

背景光经差分后转换到偏振维度可完全去除。当信号光偏振方向位于 x 方向时或 y 轴方向, 即 $\theta=0^\circ$ 或 $\theta=90^\circ$ 时, $P(x, y)=|\Delta I_1(x, y)|$; 当 $\theta=45^\circ$ 或 $\theta=135^\circ$ 时, $P(x, y)=|\Delta I_2(x, y)|$ 。

由此将强度维度哈特曼探测结果转换到偏振维度, 对偏振维度子孔径光斑图像做波前复原计算, 其单个子孔径内光斑偏移量可以表示为

$$\Delta x = \frac{\iint_{xy} xP(x, y)dx dy}{\iint_{xy} P(x, y)dx dy}, \Delta y = \frac{\iint_{xy} yP(x, y)dx dy}{\iint_{xy} P(x, y)dx dy}\quad (7)$$

由此可以计算得到偏振哈特曼波前探测斜率, 如下式所示:

$$g_x = \frac{\Delta x}{f}, g_y = \frac{\Delta y}{f}\quad (8)$$

其中: f 为微透镜阵列的焦距, 从而通过 Zernike 模式波前复原算法展开波前复原计算, 去除强背景干扰对波前复原计算的影响。

3 数值模拟仿真验证

针对自然光场景下的线偏振信号波前探测展开数值模拟。首先, 任取一个与 x 轴夹角为 30° 、波长 λ 为 633 nm 的线偏振态目标信号展开强背景下的波前探测计算, 图 6(a) 为信号经过单孔径近场采样点数 145、像素大小 $5.5 \mu\text{m}$ 、子孔径数目 6×6 、微透镜焦距 20 mm 的哈特曼传感器光斑图像, 其噪声分布如图 6(b) 所示。对目标信号展开波前复原计算, 复原结果及其 Zernike 系数表达如图 6(c) 和图 6(d)。

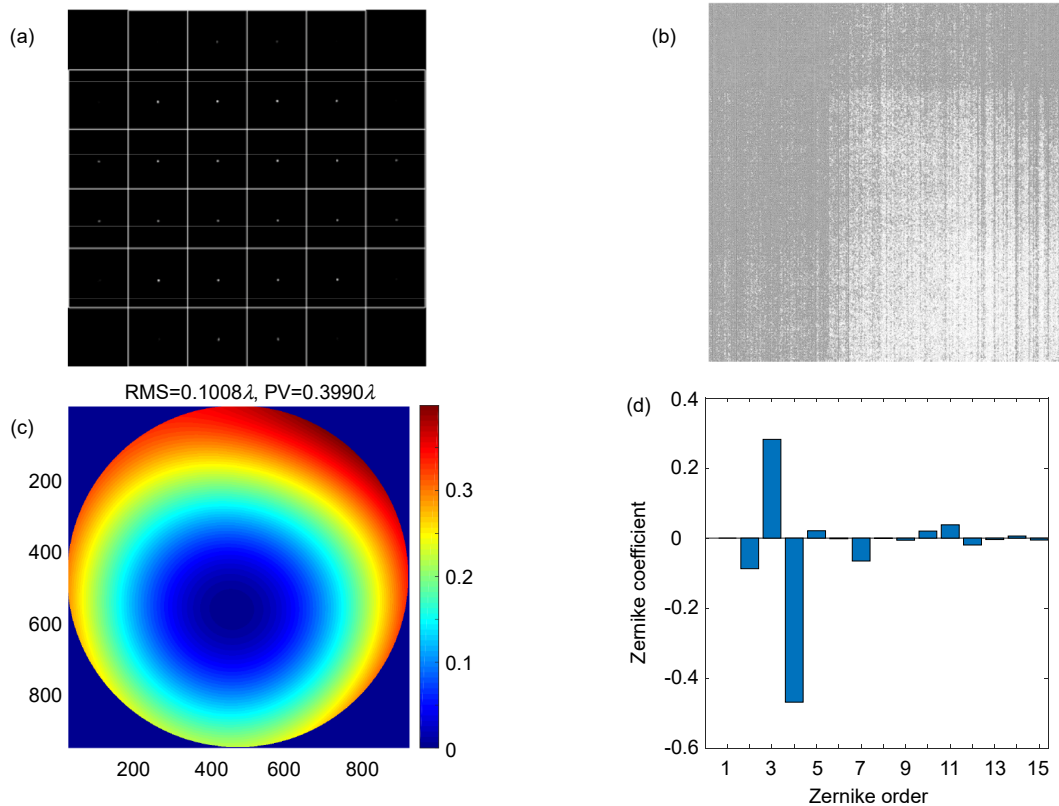


图 6 目标信号子孔径光斑图像、噪声分布及其复原波前和 Zernike 系数。(a) 目标信号子孔径光斑图像; (b) 噪声分布; (c) 目标信号参考波前; (d) 目标信号参考波前 Zernike 系数

Fig. 6 Reference signal sub-aperture spot image and its restored wavefront and Zernike coefficient. (a) Reference signal sub-aperture spot image; (b) Noise distribution; (c) Reference wavefront; (d) Reference wavefront Zernike coefficient

加入强背景, 取背景光极强, 且 $R_{BS}=277.2755$ 时的波前探测过程验证偏振哈特曼波前探测技术对强背景的处理效果以及波前复原效果。加入强背景后的光斑图像如图 7(a)所示, 由于强背景的影响, 目标信号几乎完全被掩盖, 此时对混合信号进行波前复原计算, 复原波前及其 Zernike 系数表达如图 7(b)和 7(c)。可见, 强背景对目标信号的波前准确探测造成极大影响。

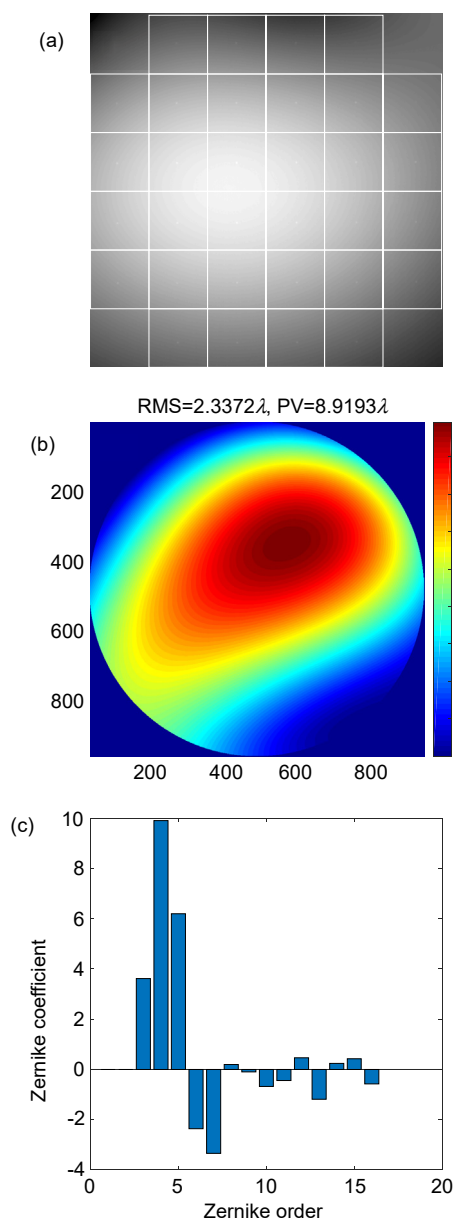


图 7 混合信号子孔径光斑图像及其复原波前图像和波前的 Zernike 系数。(a) 混合信号子孔径光斑图像; (b) 混合信号波前; (c) 混合信号波前 Zernike 系数
Fig. 7 Mixed signal sub-aperture spot image and its wavefront restoration image and wavefront Zernike coefficients. (a) Mixed-signal sub-aperture spot image; (b) Mixed-signal wavefront; (c) Mixed-signal wavefront Zernike coefficient

在实际应用过程中, 通常使用到减全局阈值法以及减局部自适应阈值法进行噪声以及背景光处理, 因此, 文章主要对比偏振哈特曼波前探测技术与这两个方案的波前复原效果。通过减全局阈值法, 减局部自适应阈值法对光斑图像中强背景进行处理, 处理结果如图 8(a)和图 8(b), 本论文提出的偏振哈特曼波前探测方法处理获取到的偏振维度光斑图像, 如图 8(c)。

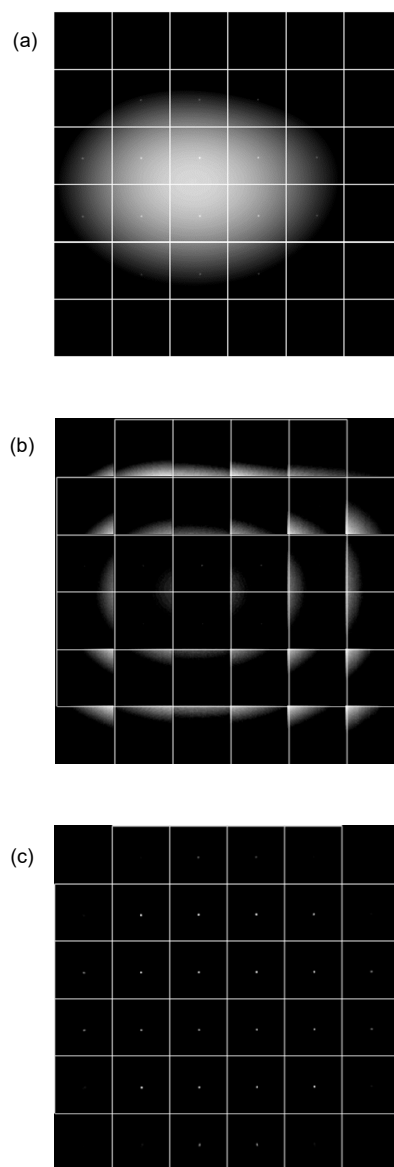


图 8 各方式对强背景处理后的子孔径光斑图像。

(a) 减全局阈值法; (b) 减局部自适应阈值法;
(c) 偏振差分法

Fig. 8 Sub-aperture spot image processed by various methods for strong background.

(a) The method of subtracting the global threshold;
(b) The method of subtracting the local adaptive threshold;
(c) The method of polarization difference

减全局阈值法为对光斑图像的四角区域进行噪声统计计算得均值 μ 和标准差 σ , 从而取得阈值 $T=\mu+3\sigma$, 再减去阈值的方式, 结果如图 8(a), 由于强背景的不均匀性很难彻底地去除强背景干扰。减局部自适应阈值法是将每个子孔径内的像素按灰度大小排序, 去掉光强最强的一部分, 再将余下值取均值和标准差。用 μ_l 和 σ_l 分别表示第 l 个子孔径的噪声均值和标准差, 可求得第 l 个子孔径的阈值为 $T_l=\mu_l+3\sigma_l$, 再逐个减除子孔径的背景光, 结果如图 8(b)所示。当背景光相比较

信号光强度较弱时去除效果较好, 而当背景光极强, 可将信号光几乎淹没时, 很难有效去除背景光。而偏振哈特曼波前探测技术基于目标信号和背景光偏振特性的差异, 通过偏振调制获取 0° 、 45° 、 90° 、 135° 的线偏振探测结果后进行差分处理进而获取到偏振维度的子孔径图样, 如图 8(c), 处理后的混合信号背景光得到有效抑制。

对处理后的混合信号光斑图样进行波前复原, 复原波前及波前像差的 Zernike 系数表达如图 9, 对比参

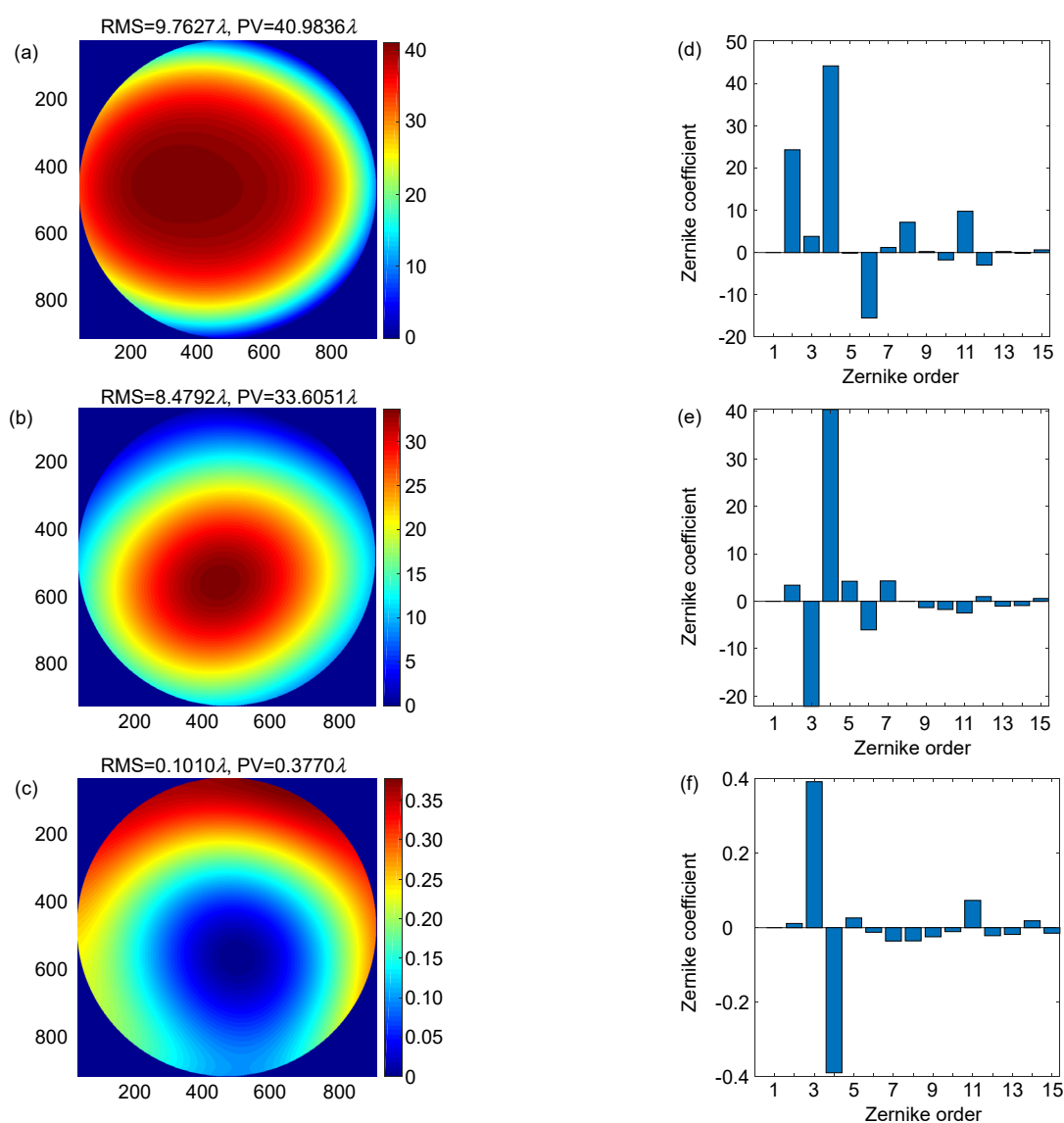


图 9 经三种方式处理后的复原波前图像及其 Zernike 系数表达。(a) 减全局阈值法复原波前; (b) 减局部自适应阈值法复原波前; (c) 偏振差分法复原波前; (d) 减全局阈值法复原波前 Zernike 系数; (e) 减局部自适应阈值法复原波前 Zernike 系数; (f) 偏振差分法复原波前 Zernike 系数

Fig. 9 The restored wavefront image and its Zernike coefficient expression after three processing methods. (a) The restored wavefront obtained by subtracting the global threshold method; (b) The restored wavefront by subtracting the local adaptive threshold method; (c) The restored wavefront by the polarization difference method; (d) Restored wavefront Zernike coefficient by the subtracting global threshold method; (e) Restored wavefront Zernike coefficient by subtracting the local adaptive threshold method; (f) Restored wavefront Zernike coefficient by the polarization difference method

考目标信号波前探测结果与减全局阈值法、减局部自适应阈值法和偏振差分处理后的波前复原结果, 可见偏振差分处理后的波前探测结果及其 Zernike 系数表达与参考信号更为吻合。

计算获取到采用不同方法进行强背景处理及波前复原计算后的波前复原误差图像及相应复原误差图像的 RMS 值和 PV 值, 如图 10。

对比图 10 中减全局阈值法、减局部自适应阈值法和偏振差分法误差, 针对自然光下的偏振目标信号的探测场景, 在背信比 $R_{Bs}=277.2755$ 条件下, 通过偏振哈特曼波前探测的复原波前误差最小, 如图 10(c)。相较于减全局阈值法、减局部自适应阈值法, 偏振差分法波前探测精度有较大的提升, 能在背信比极高的条件下合理、精确地提取有效目标信号并实现精确的波前复原。

分别对不同背信比下不同偏振方向的目标信号进

行波前探测, 通过波前复原误差 RMS 值反映各方案的波前复原效果。不同背信比场景下对同一偏振方向 ($\theta=30^\circ$) 的目标信号波前复原的误差 RMS 值曲线如图 11(a), 对同一背信比 ($R_{Bs}=277.2755$) 下不同偏振方向的目标信号的波前复原误差 RMS 值曲线如图 11(b)。

使用偏振哈特曼波前探测技术对不同背信比下同一线偏振方向的目标进行波前探测时, 由于自然光沿各个方向的振动强度相等, 背景光被完全去除, 波前复原误差相等, 为 $4.6 \times 10^{-3} \lambda$, 如图 11(a)。相较于减全局阈值法和减局部自适应阈值法中随背信比增大而增大的波前复原误差, 本方案的波前复原精度不仅有较大的提升且具有极高的稳定性。针对同一背信比下不同偏振角度的目标波前探测, 由于背景光被完整去除, 随目标信号偏振角度的变化, 其波前复原误差基本不变, 如图 11(b), 本方案的波前复原精度相较于减全局阈值法和减局部自适应阈值法有很大的提升。

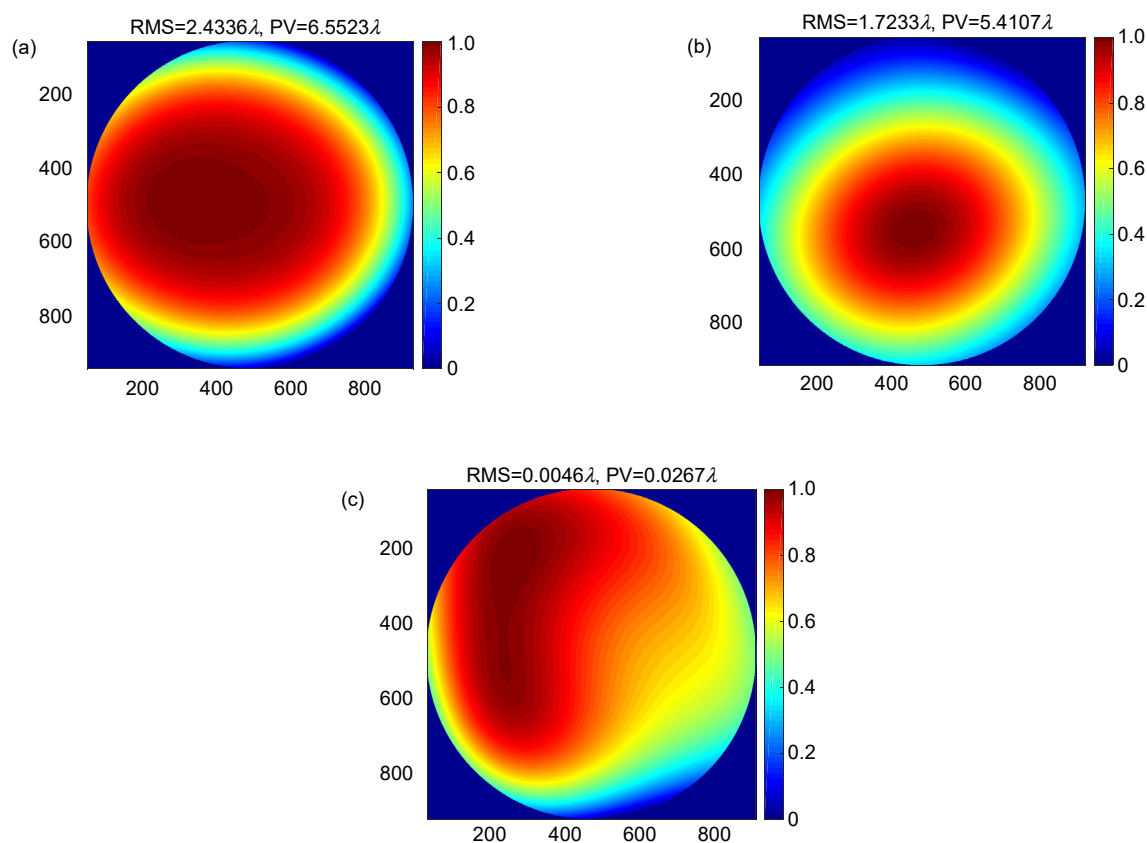


图 10 采用不同方法时的波前复原误差分布。(a) 减全局阈值法; (b) 减局部自适应阈值法; (c) 偏振差分法

Fig. 10 Wavefront restoration error using different methods. (a) The method of subtracting the global threshold; (b) The method of subtracting the local adaptive threshold; (c) The method of polarization difference

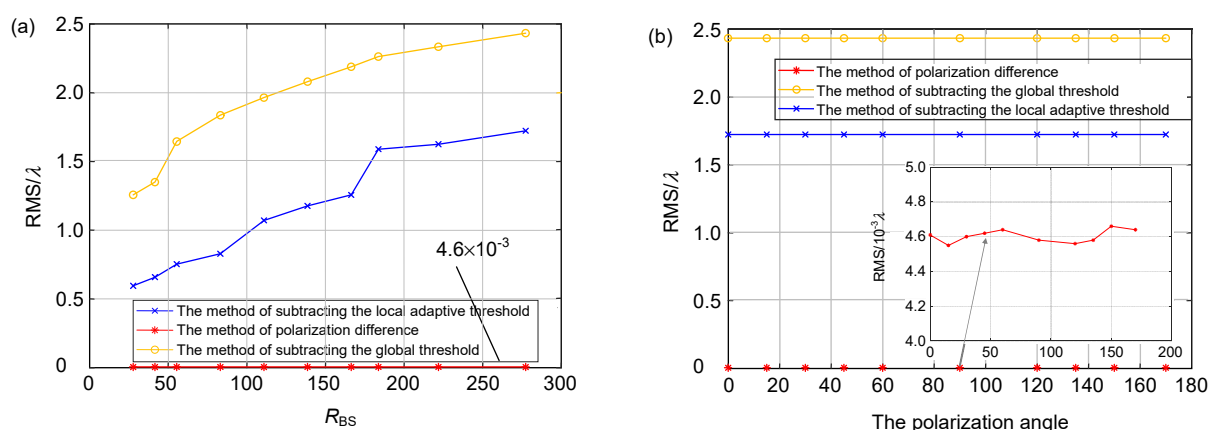


图 11 不同背信比下的波前复原误差 RMS 值曲线。(a) 三种方法; (b) 偏振差分法

Fig. 11 RMS value curve of wavefront restoration error for different R_{BS} .

(a) Three methods; (b) Polarization difference method

4 结 论

本文基于多数使用场景中强背景与探测目标的偏振特性差异, 提出了偏振哈特曼波前探测技术, 给出了偏振哈特曼波前探测的原理, 并展开了数值仿真验证。理论和仿真结果表明, 偏振哈特曼波前探测技术对强背景有很好的去除效果, 且具有很高的波前复原精度。而针对实际应用中由于大气散射背景光存在较弱偏振特性的情况, 通过偏振哈特曼波前探测技术进行波前探测仍然可以很大程度地将背景光去除, 提升目标与信号的对比如, 对目标信号波前进行准确的波前复原。这在一定程度上提升了哈特曼波前探测信背比, 提高了强背景场景下的波前探测精度且具有很高的可行性, 对于自适应光学在白天场景下的应用拓展有很大的促进作用。本方案主要针对目标信号与背景信号偏振特性差异较为明显, 即目标信号比背景光的线偏振特性更为明显的应用场景, 针对目标信号偏振特性不够明显的场景下的波前探测有一定的局限性。

参考文献

- [1] Jiang W H, Li M Q, Tang G M, et al. Adaptive optical image compensation experiments on stellar objects[J]. *Opt Eng*, 1995, **34**(1): 15–20.
- [2] Zhang R J, Li H G. Hartmann–Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm[J]. *Proc SPIE*, 1990, **1271**: 82–93.
- [3] Jiang W H, Xian H, Yang Z P, et al. Applications of Shack–Hartmann wavefront sensor[J]. *J Quantum Electron*, 1995, **15**(2): 228–235.
姜文汉, 鲜浩, 杨泽平, 等. 哈特曼波前传感器的应用[J]. 量子电子学报, 1995, **15**(2): 228–235.
- [4] Li H G, Jiang W H. Application of H–S wavefront sensor for quality diagnosis of optical system and light beam[C]//ICO-16 Satellite Conference on Active and Adaptive Optics, 1993: 369–376.
- [5] Chen H, Wei L, Li E D, et al. A B-spline based fast wavefront reconstruction algorithm[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(2): 60–69.
陈浩, 魏凌, 李恩德, 等. 基于 B 样条函数的快速波前复原[J]. 光电工程, 2021, **48**(2): 60–69.
- [6] Li C H, Xian H, Rao C H, et al. Field-of-view shifted Shack–Hartmann wavefront sensor for daytime adaptive optics system[J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(19): 2821–2823.
- [7] Jiang W H, Xian H, Shen F. Detection error of Shack–Hartmann wavefront sensor[J]. *J Quantum Electron*, 1998, **15**(2): 218–227.
姜文汉, 鲜浩, 沈锋. 夏克–哈特曼波前传感器的探测误差[J]. 量子电子学报, 1998, **15**(2): 218–227.
- [8] Beckers J M, Cacciani A. Using laser beacons for daytime adaptive optics[J]. *Experimental Astronomy*, 2001, **11**(2): 133–143.
- [9] Gonglewski J D, Highland R G, Dayton D C, et al. ADONIS: Daylight imaging through atmospheric turbulence[J]. *Proc SPIE*, 1996, **2827**: 152–161.
- [10] Xu W A. Application of spectral filter device in measuring stellar daytime[J]. *Opt Precis Eng*, 1996, **4**(4): 84–88.
徐维安. 光谱滤波装置在白天测星中的应用[J]. 光学精密工程, 1996, **4**(4): 84–88.
- [11] Li X X, Li X Y, Wang C X. Local adaptive threshold segmentation method for subaperture spot of Shack–Hartmann sensor[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(10): 170699.
李旭旭, 李新阳, 王彩霞. 哈特曼传感器子孔径光斑的局部自适应阈值分割方法[J]. 光电工程, 2018, **45**(10): 170699.
- [12] Zhang R J, Xian H, Rao C H, et al. study on effect of polarization filter for suppressing sky background light in daytime[J]. *Acta Opt Sin*, 2012, **32**(5): 0501003.
张锐进, 鲜浩, 饶长辉, 等. 偏振滤波白天抑制天光背景作用分析[J]. 光学学报, 2012, **32**(5): 0501003.
- [13] Fan Z T, Tang Y Y, Wei K, et al. Measurement of polarization correlation coefficients of light source and spectrometer in spectroscopic ellipsometry[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(12): 180507.
范真涛, 汤媛媛, 魏凯, 等. 光谱椭圆偏振系统光源和光谱仪偏振相关系数测量[J]. 光电工程, 2019, **46**(12): 180507.

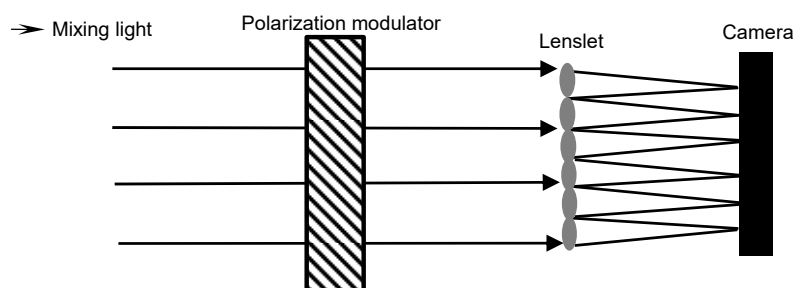
Research on polarization Hartmann wavefront detection technology

Guo Ting^{1,2,3}, Zhang Bin^{1*}, Gu Naiting^{2,3*}, Rao Changhui^{2,3},
Huang Linhai^{2,3}, Xu Duo^{2,3}, Xiao Yawei^{2,3}

¹Sichuan University, School of Electronic Information, Chengdu, Sichuan 610064, China;

²Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China



Basic principle of the proposed polarization Hartmann wavefront sensor

Overview: After more than 40 years of continuous development, adaptive optics has gradually matured in theoretical exploration and engineering applications, and has been widely used in various fields. The Hartmann wavefront sensor is an important part of the adaptive optics system and is currently the most widely used wavefront detector in the adaptive optics system. When the Hartmann wavefront sensor performs wavefront detection in strong background occasions like daytime, the interference of the strong background will increase the centroid calculation error in the wavefront calculation and significantly reduce the wavefront detection accuracy, which severely limits working hours of the adaptive optics system.

Aiming at the application scenario of a large back-to-signal ratio, a new polarized Hartmann wavefront detection technology is proposed. The polarized Hartmann wavefront detector adds a polarization modulator in front of the microlens array to obtain intensity detection images under different polarization modulation states. The polarized difference principle is used to convert the directly detected intensity signal into a polarization signal, and finally, the Hartmann wavefront detection result is transformed from the intensity dimension to the polarization dimension by using the difference between the polarization characteristics of the detection target and the background light. This article describes the basic methods and principles of polarized Hartmann wavefront detection technology, and then conducts numerical simulations for linear polarization signal wavefront detection in natural light scenes, which are as follows. First, the wavefront restoration results before and after adding the strong background are compared to clarify the influence of the strong background on the Hartmann wavefront restoration results. Then, the strong background processing and wavefront restoration calculation under different back signal ratios are launched. Finally, the removal effect of the strong background and the wavefront restoration error of the subtracted global threshold method, subtracted local adaptive threshold method, and polarization difference method is compared.

Theoretical and simulation results show that the polarized Hartmann wavefront detection technology has a good removal effect on strong background, and has high wavefront restoration accuracy. This improves the signal-to-background ratio of Hartmann wavefront detection to a certain extent, and improves the accuracy of wavefront detection under strong background conditions. Therefore, the polarization Hartmann wavefront detection technology has high feasibility for wavefront detection in strong background scenes, and has a great effect on the application expansion of adaptive optics in daytime scenes.

Guo T, Zhang B, Gu N T, *et al.* Research on polarization Hartmann wavefront detection technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(7): 210076; DOI: 10.12086/oee.2021.210076

Foundation item: National Natural Science Foundation of China Youth Fund and Outstanding Youth Fund (61905252, 12022308), and Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences (2018412)

* E-mail: zhangbinff@sohu.com; gunaiting@ioe.ac.cn