

基于同步探测的脉冲钠导星聚焦非等晕性实验研究

陈天江 周文超 王锋 黄德权 鲁燕华 张建柱

Experimental research on focusing anisoplanatism of sodium guide star via synchronous pulse detection

Chen Tian-Jiang Zhou Wen-Chao Wang Feng Huang De-Quan Lu Yan-Hua Zhang Jian-Zhu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 134207 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.134207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

球差光束在大气湍流中传输特性的实验研究

Experimental study on propagation properties of spherically aberrated beams through atmospheric turbulence

物理学报.2014, 63(13): 134209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134209>

非Kolmogorov大气湍流对高斯列阵光束扩展的影响

Influence of non-Kolmogorov turbulence on the spreading of Gaussian array beams

物理学报.2014, 63(1): 014207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014207>

局地零平面位移对非均匀地表有效空气动力学参数的影响

Influence of local zero-plane displacement on effective aerodynamic parameters over heterogeneous terrain

物理学报.2013, 62(14): 144212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144212>

多色部分相干偏心光束在non-Kolmogorov湍流中的传输

Propagation of polychromatic partially coherent decentred laser beams propagating in non-Kolmogorov turbulence

物理学报.2013, 62(14): 144211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144211>

倾斜离轴高斯-谢尔模型光束在大气湍流中平均强度

Average intensity of tilted and off-axis Gaussian Schell-model beams propagating through a cat-eye optical lens in atmospheric turbulence

物理学报.2013, 62(9): 094214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094214>

基于同步探测的脉冲钠导星聚焦非等晕性实验研究^{*}

陈天江^{1)†} 周文超¹⁾²⁾ 王锋¹⁾ 黄德权¹⁾²⁾ 鲁燕华¹⁾²⁾ 张建柱²⁾³⁾

1) (中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

2) (高能激光科学与技术重点实验室, 绵阳 621900)

3) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2014年8月30日收到; 2015年1月13日收到修改稿)

本文提出在大气 Greenwood 时间常数内采用同步探测技术实现钠导星聚焦非等晕性测量, 开展了脉冲体制钠导星探测实验, 实现了对大气平流层顶端钠导星和同路径自然星可见光波段的哈特曼点阵的同步探测, 并获得钠导星回光单帧波面, 从波面一致性对比、Zernike 系数比较、模拟成像校正等方面对实验结果进行全面分析. 实验结果表明, 在当前实验条件下, 虽然脉冲钠导星的单帧哈特曼点阵的成像对比度较低, 制约了波面恢复精度, 但同步测量的两组波面始终保持相似性, 其 Zernike 系数在前 36 阶一致性较好, 模拟结果表明钠导星探测波面有助于实现对自然星成像的有效校正, 扣除波面恢复误差后的聚焦非等晕性方差小于 0.1 rad^2 , 十分接近理论结果.

关键词: 同步探测, 钠导星, 聚焦非等晕性, 波面方差

PACS: 42.68.Bz, 42.25.Dd, 95.75.Qr, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.64.134207

1 引言

激光导星可采用大气平流层之下的瑞利导星 (10—20 km), 或者采用 85—100 km 高度的钠导星^[1-3]. 近年来, 为提高对暗弱天体目标的观测能力, 基于人造激光导星探测的技术研究成为天文观测领域的热点. 由于高度较低, 对于大口径接收望远镜系统, 瑞利导星的聚焦非等晕性影响不容忽视. 钠导星由对应钠原子 D_2 线的 589 nm 激光激发 85—100 km 高空平流层顶端的钠原子产生, 由于海拔高度的优势, 它为探测系统提供的波面信息更加接近自然星, 弱化了大口径望远镜接收探测导星波面的圆锥效应, 减小了大气非等晕误差, 是一种比较理想的人造导星光源. 从 2000 年开始, 美国和欧洲的天文台陆续开展了研究性的钠导星试验, 包

括美国 Lick 天文台、Very Large 天文台、星火靶场、Gemini South 天文台、欧洲南方天文台均已成功开展了钠导星回光成像或波面探测实验, 获得强度 $12\text{--}130 \text{ photons}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{W}^{-1}$ 的钠导星回光^[4]. 国内方面, 2007 年, 中国工程物理研究院采用同孔径收发获得了钠导星回光^[5]; 2008 年至 2012 年, 中国科学院光电研究所、中国科学院武汉物理与数学研究所与中国科学院长春光机研究所也先后探测到钠导星回光图像^[6,7]. 以上钠导星均建立在连续或准连续激光抽运体制上. 2012 年 7 月, 中国工程物理研究院应用电子学研究所利用自研钠导星脉冲激光器, 采用时间选通技术获得清晰的脉冲钠导星回光^[8]. 需要指出, 这些研究重点关注提高钠导星回光强度的工作体制并开展相关的技术分析. 同时, 受限于瞬态钠导星波面测量技术的不成熟, 均未发表关于聚焦非等晕性定量测量的报道.

^{*} 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2013AAXX1040) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: 13310412@qq.com

当前的人造激光导星非等晕误差主要由理论分析获得, 一般采用横向光谱滤波方法进行分析计算. 用理论分析方法所得聚焦非等晕误差建立在一定的数理边界条件和大气环境条件基础上, 不同的计算条件、计算方法及数理模型影响了计算结果的准确性.

为直接验证人造钠导星替代自然星作为大气波面校正导星光源的置信度, 提出了在大气 Greenwood 时间常数内同步测量自然星与钠导星回光波面的方法实现非等晕性误差测量, 评估钠导星大气非等晕性.

2 理论分析

2.1 大气聚焦非等晕性

聚焦非等晕误差: 即圆锥效应, 由有限高度人造导星用锥形湍流采样代替望远镜对远距离目标工作时实际的近圆柱形湍流采样造成. 它与角度非等晕性是构成人造导星几何非等晕性重要因素. 迄今为止, 国内外学者在聚焦非等晕性研究方面开展了许多研究工作, 对影响聚焦非等晕性的物理条件开展了较深入的分析, 并建立了相应的计算模型^[9-12].

本文中讨论的经大气到达探测系统的目标波前信息中的整体平移项(Piston)对目标成像无影响, 且大气湍流造成的目标波前整体倾斜(Tilt)和离焦(Defocus)的绝对量也不能从导星的波面信息中提取, 因此对人造导星的聚焦非等晕性方差分析中需要扣除波前整体平移、倾斜和离焦项的影响.

采用横向滤波技术, 获得整体平移非等晕方差 σ_{piston}^2 、整体倾斜非等晕方差 σ_{tilt}^2 和总非等晕方差 σ_{Low}^2 如下:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{piston}}^2 &= 0.5k_0^2 D^{5/3} \int_0^L dz C_n^2(z) \\ &\times \left\{ F\left[-\frac{5}{6}, -\frac{11}{6}; 2; (1-z/L)^2\right] \right. \\ &\quad \left. - \frac{1 + (1-z/L)^{5/3}}{\sqrt{\pi}2^{-8/3}} \Gamma\left[\frac{7}{3}\right] \right\}, \quad (1) \\ \sigma_{\text{tilt}}^2 &= 0.8345k_0^2 D^{5/3} \int_0^L dz C_n^2(z) \\ &\times \left\{ \frac{1 + \left(1 - \frac{z}{L}\right)^{5/3}}{\sqrt{\pi}2^{-11/3}} \Gamma\left[\frac{7}{3}\right] \right\} \end{aligned}$$

$$-\left(1 - \frac{z}{L}\right) F\left[\frac{1}{6}, -\frac{11}{6}; 3; \left(1 - \frac{z}{L}\right)^2\right] \Bigg\}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Low}}^2 &= 2.606k_0^2 \int_0^L dz C_n^2(z) \int_0^\infty d\kappa \kappa^{-8/3} \\ &\times \left[1 - 2 \frac{J_1[D\kappa z/2L]}{D\kappa z/2L} \right], \quad (3) \end{aligned}$$

式中, $\Gamma[x]$ 为伽玛函数, $F[x]$ 是超几何函数.

去除整体平移和整体倾斜位相差, 获得导星下方圆锥效应引起的位相差为

$$\sigma_{\text{cLow}}^2 = \sigma_{\text{Low}}^2 - \sigma_{\text{piston}}^2 - \sigma_{\text{tilt}}^2. \quad (4)$$

对于导星以上湍流引起的误差, 可以通过修正 Zernike 多项式位相差的标准结果来得到. 经分析, 移除了整体平移和整体倾斜位相差的导星以上湍流引起的误差为

$$\sigma_{\text{cHigh}}^2 = 0.057D^{5/3}k_0^2 u_0^+(H), \quad (5)$$

$$u_m^+(H) = \int_H^\infty dh C_n^2(h) h^m, \quad (6)$$

式中 $u_m(H)$ 成为湍流的 m 阶矩, $u_m^+(H)$ 表示导星以上海拔的部分湍流阶矩, H 为导星海拔高度, h 为积分海拔高度.

综合有限高度人造导星在整个大气所具有的位相误差, 移除了整体平移和整体倾斜后仅由圆锥效应引起的位相差为

$$\sigma_{\text{cone}}^2 = \sigma_{\text{cLow}}^2 + \sigma_{\text{cHigh}}^2. \quad (7)$$

根据 Hufnagel 大气模型、HV57 大气模型及 SLC-Night 大气模型计算钠导星聚焦非等晕方差随高度和口径的变化曲线如图 1 和图 2 所示. 这里探测波长考虑天文上常用的近红外波段, 取 $1.3 \mu\text{m}$. 计算分析结果与文献^[12]的聚焦非等晕推导基本一致.

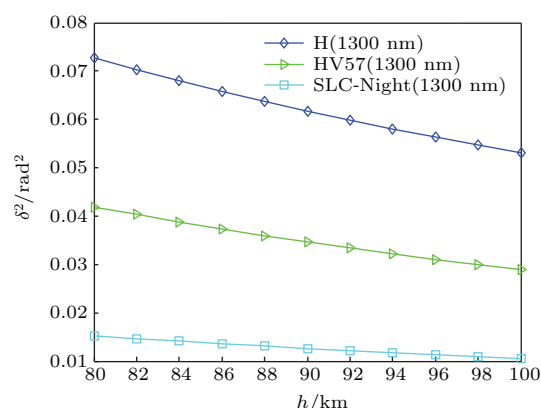


图 1 钠导星聚焦非等晕方差随高度变化曲线 (1.2 m 接收口径)

Fig. 1. Focusing anisoplanatism variance with height (with 1.2 m receiving diameter).

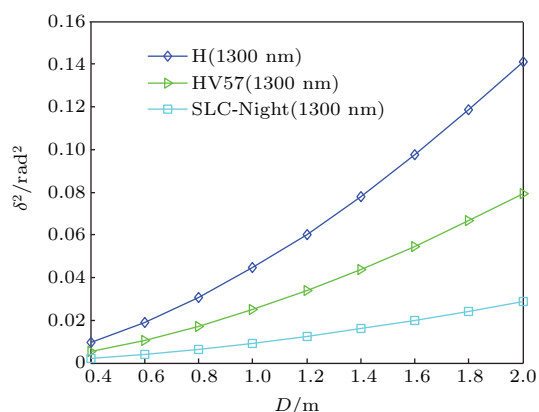


图2 钠导星聚焦非等晕方差随接收口径变化曲线

Fig. 2. Focusing anisoplanatism variance with different telescope diameter.

2.2 聚焦非等晕性同步探测理念

大气 Greenwood 时间常数在时域上表征大气湍流的扰动效果, 由大气湍流的强弱和传输路径上的横向风速决定, 在该时间范围内大气湍流保持基本不变, 可用冻结的湍流模型描述湍流, 换言之, 在该时间段内的大气波前波面畸变不足以引起自适应光学系统校正效果发生明显改变. 因此, 可以利用哈特曼系统, 通过光谱分光, 在大气湍流宁静时间内对同一传输路径上的自然星和人造钠导星的到达成像点阵进行同步采集, 采集时间和同步精度应小于大气湍流宁静时间. 大气 Greenwood 时间常数与高度为 h 的大气折射率结构常数 $C_n^2(h)$ 和横向剪切风速 $v(h)$ 的关系为^[3]

$$T_G = \left(2.91 k^2 \sec \Omega \int dh C_n^2(h) v^{5/3}(h) \right)^{-3/5}. \quad (8)$$

综合以往国内外大气湍流波面的功率谱实验数据分析^[13–15], 即使在气流变化较剧烈的大气条件下, Greenwood 时间常数也在 10 ms 以上, 且一般性的传感器和信号发生器的设备性能也具备满足该指标并实现同步探测和数据采集的技术能力. 这使得采用同步探测技术实现对钠导星聚焦非等晕性的测量成为可能.

3 实验系统

钠导星非等晕性验证实验系统由钠导星激光器、高精度电控发射系统、大口径接收望远镜、钠导星微光探测系统、同步控制系统组成.

为有效激发钠原子, 避免钠导星饱和效应, 在实现钠导星谱线匹配的基础上, 采用百微秒级脉冲

体制激光器作为抽运光源. 一块高精度电调镜发射引导发射的 589 nm 激光在平流层激发出的钠导星回光被 1.2 m 口径的望远镜收集, 由配置 12×12 哈特曼阵列的可见光相机进行探测采集. 为实现对钠导星和自然星波面的同步采集, 采用信号发生器对激光器出光前沿进行触发, 并根据钠层高度和相机的响应时间设定适当延时, 驱动两台相机同步对钠导星回光和同一路径上的自然星回光进行同步测量.

钠导星聚焦非等晕性同步探测实验工作原理如图 3 所示.

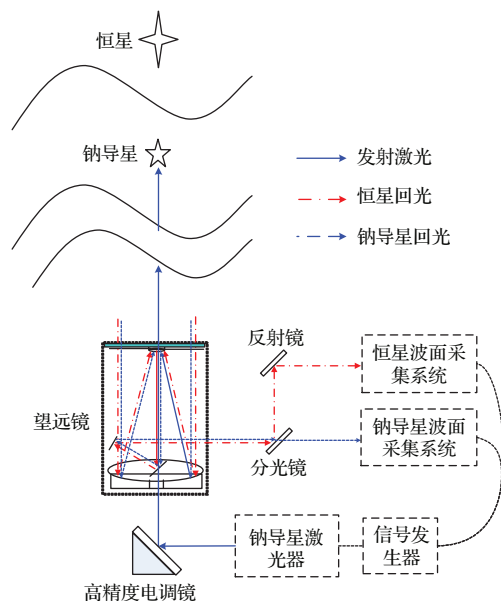


图3 (网刊彩色) 钠导星聚焦非等晕性同步探测实验原理示意图

Fig. 3. (color online) Synchronous detecting sketch map of the Focusing anisoplanatic experiment.

4 实验结果及分析

4.1 测量结果

基于上述实验系统, 开展了多个发次的同步探测钠导星回光波面测量实验. 实验中望远镜对天顶附近 6.25 等自然星闭环, 高精度电调发射镜对准该自然星发射 589 nm 激光, 并在望远镜接收视场中形成有效的钠导星回光图像, 通过发射偏置控制使钠导星回光图像自然星图像基本重合. 两台哈特曼相机曝光 500 μs, 同步测量得到的钠导星回光点阵、自然星回光点阵典型单帧图像如图 4 所示. 可以看出, 钠导星回光单帧哈特曼点阵各子孔径均有回光, 由于钠导星回光很弱, 信噪比相对于自然星在同一时间内的探测点阵明显较低. 尽管如此, 钠导星的各子孔径回光强度仍然满足波面恢复条件.

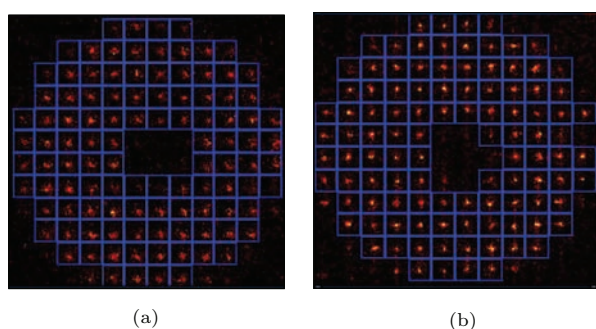


图4 (网刊彩色) 钠导星与自然星单帧回光点阵 (a) 钠导星单帧回光点阵; (b) 自然星单帧回光点阵

Fig. 4. (color online) The returning light matrices of sodium guide star and a natural star via one laser pulse: (a) the returning light matrix of sodium guide star; (b) the returning light matrix of a natural star.

采用基于离散傅里叶变换的波面重构算法^[16]对获取的4对(编号1#—4#)单帧哈特曼点阵进行波面恢复,得到对应同一时刻的钠导星波面和自然星波面如图5所示.可以看出,同一时刻钠导星波面、自然星波面形态基本一致,直接证明采用同步探测实现钠导星非等晕性测量的有效性.需要指

出,为针对性地研究聚焦非等晕性,在波面恢复过程中移除了倾斜项和离焦项.

提取3组波面序列(编号1—3),从自然星波面扣除钠导星波面,即为实验获得的钠导星的聚焦非等晕性方差,见表1所示.

表1 钠导星聚焦非等晕性方差测试结果(对应1.3 μm 探测波长)

Table 1. The measuring results of the focusing anisoplanatic error of sodium guide star.

编号	自然星波面 σ^2 /rad ²	钠导星波面 σ^2 /rad ²	聚焦非等晕性 σ^2 /rad ²
1	3.44	4.44	1.53
2	4.24	5.89	1.57
3	4.52	5.64	1.51

可见,虽然从恢复波面可以观察到两种波面的一致性,但二者的波面误差之差仍明显大于1.5 rad²,这与钠导星较弱的回光对比度引入的波面恢复计算误差有关,将在文中4.4部分讨论.

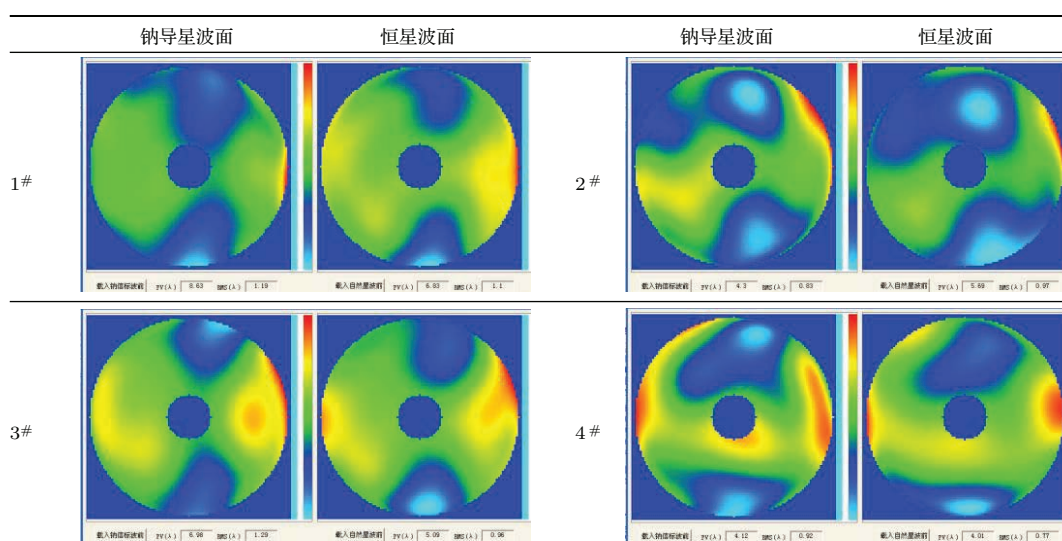


图5 (网刊彩色) 同一时刻的钠导星波面与自然星波面

Fig. 5. (color online) The recovered wavefronts of sodium guide star and a natural star via one laser pulse.

4.2 波面 Zernike 系数方差

对同步采集的2组钠导星波面和自然星波面方差进行了前36阶 Zernike 系数分量对比分析,2组测量数据的计算结果如图6所示.由于导星波面不关注波前整体平移、倾斜和离焦,因此没有对前3阶 Zernike 系数分量进行对比.

图6中两组数据由于不同采集时刻的大气条件差异,其 Zernike 系数方差项随大气条件变化呈

现涨落,同步探测到的钠导星与自然星波面的各阶 Zernike 系数方差曲线趋势基本相同,4—5阶存在不小于1 rad²的误差,从第6阶开始,各阶分量误差绝对值迅速减小,表明误差源主要集中在前2阶,大气聚焦非等晕性引入的波前高阶分量影响较小,各阶 Zernike 分量对应波面误差的累积效果导致了最终的测量误差.受限于系统哈特曼探测精度,文中仅给出了前36阶 Zernike 系数方差,在两组数据

中, 钠导星波面和自然星波面的各阶 Zernike 系数方差对比均未出现异常偏移, 表明其 Zernike 系数在前 36 阶一致性较好, 钠导星波面探测较为准确, 能为自适应光学系统实现 36 阶的像差校正提供可靠的采样数据.

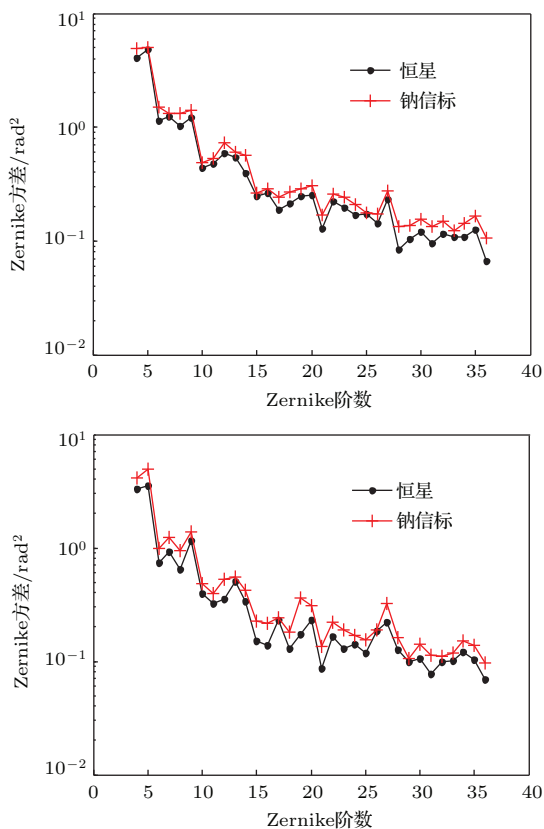


图6 同步钠导星和自然星波面各阶 Zernike 系数方差对比
Fig. 6. Error contrast from various Zernike coefficient between sodium guide star and natural star.

4.3 模拟成像校正

由于实验系统没有引入自适应光学装置, 没有利用钠导星波面信息对自然星目标成像进行实时闭环校正以检验波前测量的效果, 但根据实验数据开展了对自然星 $1.3 \mu\text{m}$ 波段的模拟成像校正分析: 开环状态下, 利用 3 组自然星波面模拟自然星 $1.3 \mu\text{m}$ 波段在探测系统传感器成像, 其光学质量 β 值为 4.2—5, BQ 因子为 1.9—4.1. 假定自适应光学系统对同步探测钠导星波面全部实现有效校正, 则闭环后的 β 值优化到 2.4—3.2, BQ 因子优化至 1.4—2.4, 衍射极限内光斑能量提高了近 3 倍, 表明利用本实验同步探测的钠导星波面可为自适应光学系统提供有效的大气畸变信息用于目标成像校正. 3 组单帧波面的模拟对比结果见图 7 (a)—(f) 所示.

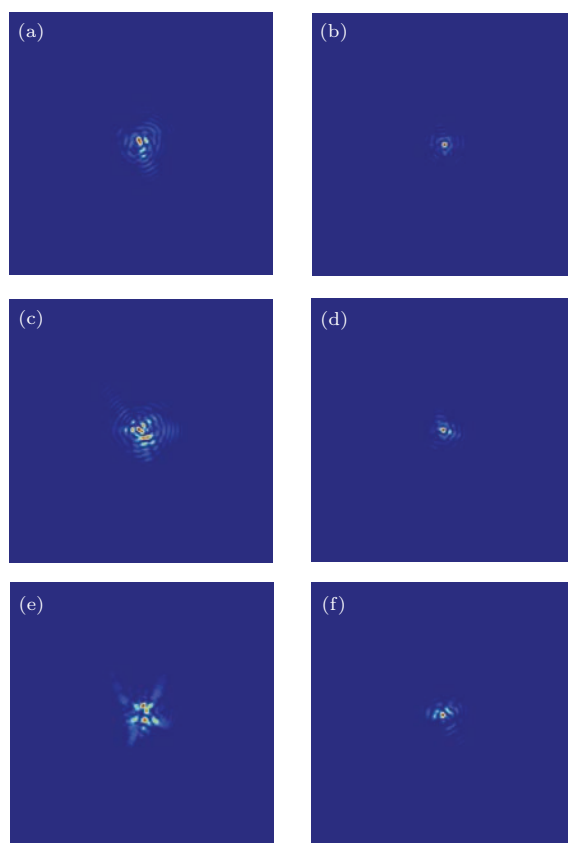


图7 (网刊彩色) 模拟校正前后自然星远场成像对比 ($1.3 \mu\text{m}$, 瞬态帧) (a) 第 1 组, 校正前, $\beta = 4.34$, $\text{BQ} = 2.68$; (b) 第 1 组, 校正后, $\beta = 2.77$, $\text{BQ} = 1.41$; (c) 第 2 组, 校正前, $\beta = 4.80$, $\text{BQ} = 3.10$; (d) 第 2 组, 校正后, $\beta = 2.47$, $\text{BQ} = 1.63$; (e) 第 3 组, 校正前, $\beta = 5.05$, $\text{BQ} = 4.16$; (f) 第 3 组, 校正后, $\beta = 3.22$, $\text{BQ} = 2.40$

Fig. 7. (color online) Contrast map of natural star images between not-calibration and simulating calibration: (a) group 1, not-calibrating, $\beta = 4.34$, $\text{BQ} = 2.68$; (b) group 1, calibration, calibrating, $\beta = 2.77$, $\text{BQ} = 1.41$; (c) group 2, not-calibrating, $\beta = 4.80$, $\text{BQ} = 3.10$; (d) group 2, calibration, calibrating, $\beta = 2.47$, $\text{BQ} = 1.63$; (e) group 3, not-calibrating, $\beta = 5.05$, $\text{BQ} = 4.16$; (f) group 3, calibration, calibrating, $\beta = 3.22$, $\text{BQ} = 2.40$.

4.4 误差分析

理论上, 移除恢复波面的倾斜项和离焦项, 扣除了系统主要测量误差的影响, 钠导星和自然星波面之差即表征钠导星的聚焦非等晕性, 但对实验数据分析获得的聚焦非等晕性方差均达到 1.5 rad^2 (相对于 $1.3 \mu\text{m}$) 以上, 明显大于理论计算结果. 通过孪生双哈特曼波面传感器同时对一颗 4 等自然星开展试验发现, 当去除 589 nm 滤光片的钠导星光路的回光子孔径信噪比下降到 $1/3$ — $1/5$ 时, 双哈特曼波面传感器测量引入了约 1.5 rad^2 的波面方差 (同步测量单帧波面见图 8), 这表明表 1 中钠导

星聚焦非等晕误差主要由低信噪比条件下的图像波面处理误差引入. 由于钠导星成像子孔径的对比度较低, 目前采取简单的阈值法计算光斑质心引入较大的波面恢复误差, 需进一步优化低信噪比光斑高精度波面恢复图像处理算法.

从表 1 中扣除 1.5 rad^2 测量误差, 则 3 组波面的聚焦非等晕性方差分别为 0.03 rad^2 , 0.07 rad^2 , 0.01 rad^2 , 十分接近理论结果. 图 9 为 1.2 m 接收口径条件下的聚焦非等晕性方差最终测量结果与理论分析计算的对比.

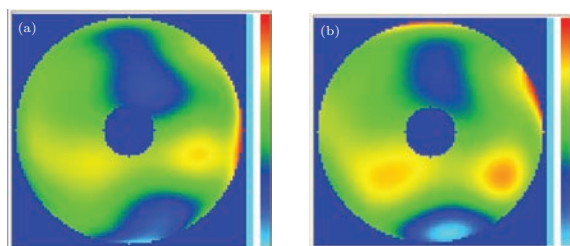


图 8 (网刊彩色) 钠导星波面误差检测同步测量单帧波面 (a) 钠导星光路的自然星波面; (b) 自然星光路波面

Fig. 8. (color online) The recovered synchronous single frame wavefronts obtained in measuring error detecting experiment: (a) sodium guide star; (b) natural star.

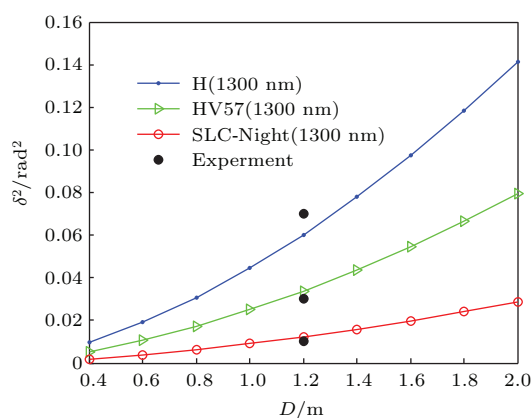


图 9 聚焦非等晕性方差最终测量结果与理论分析计算的对比

Fig. 9. Contrast map between final experiment results and the theory analysis.

由图可见, 扣除测量误差后, 采用 1.2 m 接收口径的试验结果与 Hufnagel 模型、HV57 模型及 SLC-Night 模型分析的聚焦非等晕性方差非常一致, 细节差异来源于试验大气条件的变化和物理模型的区别——三种大气模型反映了各自代表的典型大气特征, 在一定口径、一定高度、一定波长的条件下, 它们具有固定的聚焦非等晕性方差; 而表 1 中的 3 组实验数据虽然获得于同一地点, 但实验时间

间隔数小时, 温度、湿度、风速、大气相干长度均有变化, 导致各发次的测量结果存在较小的差异.

5 结 论

在完成几种大气模型的钠导星聚焦非等晕性物理分析的基础上, 基于 1.2 m 口径望远镜, 利用双哈特曼系统同步测量了脉冲体制钠导星与同一成像光路的自然星的系列单帧到达波面, 实现对钠导星聚焦非等晕性测量, 从波面一致性对比、Zernike 系数比较、模拟成像校正等方面对实验结果进行全面分析, 同步测量的两组波面始终能保持相似性, 其 Zernike 系数在前 36 阶一致性较好, 模拟结果表明钠导星探测波面能为自适应光学系统提供有效的大气波前畸变信息, 有助于实现对自然星成像的校正. 对测量误差分析表明, 钠导星在子孔径成像的低信噪比在一定程度上制约了波面恢复精度, 未来可从站址优化、谱线匹配、激光器体制方面进一步提高钠导星回光强度. 扣除波面恢复误差后的聚焦非等晕性方差小于 0.1 rad^2 , 十分接近理论结果.

感谢中国工程物理研究院应用电子学研究所陈兴无、王磊、游安清, 感谢中国科学院光电技术研究所谭毅、毛耀、边江等同仁在实验工作中给予的支持和帮助.

参考文献

- [1] Ageorges N, Dainty C 2000 *Laser Guide Star Adaptive Optics for Astronomy* (Berlin: Springer Netherlands) p23
- [2] Zhou R Z, Yan J X, Yu X 1996 *Adaptive optics* (Beijing: National defence industry press) p328 (in Chinese) [周仁忠, 阎吉祥, 俞信 1996 自适应光学 (北京: 国防工业出版社) 第 328 页]
- [3] Su Y, Wan M 2004 *High energy laser System* (Beijing: National defence industry press) p215(in Chinese) [苏毅, 万敏 2004 高能激光系统 (北京, 国防工业出版社) 第 215 页]
- [4] Gavel D 2008 *Proceedings of SPIE* **7015** 70150J. 1
- [5] Wang F, Ye Y D, Lu Y H, Yan H, He L, Liao Y 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 1829(in Chinese) [王锋, 叶一东, 鲁燕华, 颜宏, 何丽, 廖原 2011 强激光与粒子束 **22** 1829]
- [6] Liu J, Wang J L, Lv T Y, Sun J W, Dong L 2013 *Scientia Sinica* **43** 318(in Chinese) [刘杰, 王建立, 吕天宇, 孙敬伟, 董磊 2013 中国科学 **43** 318]

- [7] Li F Q, Cheng X W, Yang Y, Yang G T, Wang J H, Dai Y, Song S L, Liu Y J, Lin X, Wu K J, Gong S S 2011 *Scientia Sinica* **41** 1261(in Chinese) [李发泉, 程学武, 杨勇, 杨国韬, 王继红, 戴阳, 宋沙磊, 刘迎杰, 林鑫, 武魁军, 龚顺生 2011 中国科学 **41** 1261]
- [8] Wang F, Chen T J, Luo Z X, Lu Y H, Wan M, Peng B, Yin X Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014208 (in Chinese) [王锋, 陈天江, 雒仲祥, 鲁燕华, 万敏, 彭博, 尹新启 2014 物理学报 **63** 014208]
- [9] Fried D L 1982 *J. Opt. Soc. Am. A* **72** 52
- [10] Stone J, Hu P J, Mills S P 1994 *J. Opt. Soc. Am. A* **11** 347
- [11] Esposito S, Riccardi A 1996 *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 1916
- [12] Zhang J Z, Zhang F Z, Wu Y 2014 *High Power Laser and Particle Beams* **26** 031017 (in Chinese) [张建柱, 张飞舟, 吴毅 2014 强激光与粒子束 **26** 031017]
- [13] Greenwood D. P 1977 *J. Opt. Soc. Am.* **67** 390
- [14] Li X Y, Jiang W H, Wang C H, Xian H, Wu X B 2000 *Acta Optica Sinica* **20** 1035 (in Chinese) [李新阳, 姜文汉, 王春红, 鲜浩, 吴旭斌 2000 光学学报 **20** 1035]
- [15] Rao C H, Jiang W H, Ling Ning, Tang G M, Shen F, Zhang Xuejun, Tao H M 2001 *Acta Optica Sinica* **21** 933 (in Chinese) [饶长辉, 姜文汉, 凌宁, 汤国茂, 沈锋, 张学军, 陶慧敏 2001 光学学报 **21** 933]
- [16] Yan H, Luo Z X, Ye Y D, Xiang R J, Wang F, He L 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 1335 (in Chinese) [颜宏, 雒仲祥, 叶一东, 向汝建, 王锋, 何丽 2012 强激光与粒子束 **24** 1335]

Experimental research on focusing anisoplanatism of sodium guide star via synchronous pulse detection*

Chen Tian-Jiang^{1)†} Zhou Wen-Chao¹⁾²⁾ Wang Feng¹⁾ Huang De-Quan¹⁾²⁾
Lu Yan-Hua¹⁾²⁾ Zhang Jian-Zhu²⁾³⁾

1) (Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

2) (The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, Mianyang 621900, China)

3) (Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100049, China)

(Received 30 August 2014; revised manuscript received 13 January 2015)

Abstract

No reports of measuring the focusing anisoplanatism of laser guide star were mentioned before because the guide star instantaneous wavefront measurement technique by using sodium is not mature. As directly verifying the confidence of artificial sodium guide star which takes the place of the natural star to become the reference of atmosphere adaptive optic correction, in this paper a new method is put forward that the focusing anisoplanatic error of sodium guide star can be measured via synchronous pulse detection if the atmosphere Greenwood time is constant. Results of correlation analysis show that it is feasible to establish an experimental system for the measurement. A high-precision wavelength and linewidth sodium guide star laser and a 1.3 m caliber telescope underly the experimental system for the technology research on the focus anisoplanatism. Experiment of detecting sodium guide star has been carried out. And synchronous detection about the returning light matrix of visible light of sodium and the natural star is achieved when both are in a coincident imaging path. In the experiment, the recovered single frame wavefront of sodium guide star is acquired, and experimental data analysis is carried out in several aspects: contrasting the coherence of the two types of wavefront images, comparing the Zernike coefficients, and simulating the imaging calibration. Results show that the imaging contrast in the light matrix of the pulsed sodium guide star is poor because of the limited experimental condition so that the precision of the recovered wavefront is restricted, but the two groups of wavefronts the sodium guide star wavefront and the natural star wavefront always keep nice comparability, which we can see from the recovered synchronous wavefront images. And the Zernike coefficients of both are close in the first 36 orders, which we deduce from the Zernike anisoplanatic error curves. Simulation result shows that the acquired sodium wavefront data would contribute to calibrate the far-field images of natural star in astronomical observation activities. And the measured results, below 0.1 rad^2 , while wiping off the wavefront recovering error are close to the theoretical result. Result shows also that the low SNR of sub aperture imaging restricts the wavefront recovery precision to some extent, but the effective atmospheric wavefront distorted information has been obtained by sodium guide star experiment and it can help to correct the natural star images.

Keywords: synchronous detection, sodium guide star, focusing anisoplanatism, wavefront

PACS: 42.68.Bz, 42.25.Dd, 95.75.Qr, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.64.134207

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2013AAXX1040).

† Corresponding author. E-mail: 13310412@qq.com