

信标湍流探测中波前非等晕问题的研究 II: 实验测量

罗 曦^{1,2} 李新阳^{1,2*} 邵 力^{1,2} 黄 奎^{1,2} 王晓云^{1,2}

(¹ 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209)
(² 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209)

摘要 人造信标[即激光导引星(LGS)]概念的提出解决了自适应光学系统(AO)的湍流参考源问题,同时也带来了不可避免的非等晕误差。利用新研制的自然星哈特曼传感器(HS)与信标哈特曼传感器在望远镜系统上实现了自然参考星与瑞利信标的湍流波前时间同步测量,从而对不同模式(包括纯聚焦模式、角度与聚焦相耦合模式)瑞利信标的非等晕误差进行了定量研究。通过对测量所得自然星与瑞利信标湍流波前的泽尼克模式像差分解及对对比分析发现,不同高度瑞利信标波前与自然星波前的各阶泽尼克模式时间互相关性,随其像差阶数的增加而振荡下降。相比于自然星波前的各阶像差模式方差分布,不同模式瑞利信标的非等晕误差均随像差模式阶数的增加而逐渐增大,即信标的非等晕误差对高阶像差更加敏感。最后,通过对不同实验模式非等晕误差所致目标校正光波质量影响的分析计算,并将其与前期信标非等晕问题的数值建模相结合,获得了不同非等晕机制下理论与实验相互印证的结果。该实验研究结果的取得,增强了对瑞利信标非等晕问题的感性认识。

关键词 自适应光学;人造信标;非等晕误差;实验测量

中图分类号 TP202+.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0612003

Investigation of Anisoplanatic Effect in Atmospheric Turbulence Probing with Beacon II: Experimental Measurement

Luo Xi^{1,2} Li Xinyang^{1,2} Shao Li^{1,2} Huang Kui^{1,2} Wang Xiaoyun^{1,2}

(¹ Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract The atmospheric turbulence probing source of adaptive optics (AO) is proposed by the promotion of the artificial beacon, namely laser guide star (LGS); however the unavoidable anisoplanatic error it brings can degrade the performance of AO system. By using new developed natural star Hartmann-Shack (HS) sensor and artificial beacon HS sensor, the temporal synchronized turbulence-induced wavefronts measurement is achieved on telescope system for natural star and Rayleigh-LGS. Accordingly our experimental investigation of Rayleigh-LGS anisoplanatic effect with different LGS-modes (including focal anisoplanatism and angular & focal anisoplanatism) is presented. The experimental results show that, increasing the Zernike order of turbulence-distorted wavefront aberration makes the temporal correlation for corresponding aberration mode between natural star and Rayleigh-LGS with different altitudes present an oscillation downward trend. Comparing with the Zernike variances of natural star wavefront, the modal anisoplanatic error of Rayleigh-LGS increases with the increase of the Zernike order, which is greatly sensitive to high-order aberration. At last the comparisons of our former numerical-modeling and experimental-measuring results of different-mode Rayleigh-LGS anisoplanatic error's impact on the corrected light-wave quality are analyzed, and both of the results are in good agreement. This investigation is a useful promotion of our perceptive knowledge of Rayleigh-LGS anisoplanatic effect in turbulence probing.

Key words adaptive optics; artificial beacon; anisoplanatic error; experimental measurement

OCIS codes 010.1080; 010.1300; 010.1330; 010.7350

1 引言

人造信标概念的提出和发展解决了自适应光学

(AO)系统在应对暗弱目标时的湍流探测参考源问题^[1-4]。然而,实际中由于大气湍流对人造信标[即

收稿日期: 2013-10-21; 收到修改稿日期: 2012-12-27

作者简介: 罗 曦(1982—),男,博士,副研究员,主要从事大气光波传输与自适应光学等方面的研究。

E-mail: louxi@ioe.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

激光引导星(LGS)]产生上行聚焦激光束天空指向方位的随机影响,以及有限高度人造信标仅能对其高度以下至望远镜接收口径间的圆锥体内湍流进行采样,而对圆锥体外及自身高度以上的湍流未被采样,从而引入自适应光学系统信标探测湍流波前与待校正目标湍流波前之间的差异,即人造信标的角度非等晕与聚焦非等晕效应,进而对自适应光学校正效果产生影响。

相比于相对理想化的光波湍流大气传输梅林变换理论分析^[5-10],测量并掌握自适应光学系统工作对象(即实际湍流大气中的非等晕性误差特性)已成为人们认知信标湍流探测波前非等晕问题的一个直观重要手段。回顾探索激光导引星的应用发展历程,美国空军武器实验室(现在 Phillips 实验室)、麻省理工学院(MIT)林肯实验室、Keck 天文观测站等研究机构相继开展了广泛而深入的实验研究。其中,有文献报道的典型结果包括:利用瑞利后向散射人造信标进行的首次大气湍流测量^[11],大气分子钠层人造信标的产生及其首次大气湍流破坏波前情况测量^[12],聚焦非等晕性对不同高度大气层人造信标影响程度大小的实验验证^[11-12],应用人造信标的大气湍流天文成像补偿实验^[13],角度非等晕性对利用人造信标补偿自然参考星湍流成像点扩展函数(PSF)影响的实验测量^[8]等。人造信标非等晕误差的像差模式特性对于实际自适应光学系统的设计与工作模式优化、以及信标工作模式的选择等均具有指导意义。然而据笔者所知,关于所述信标非等晕性问题的测量结果及详细分析在国内外文献中却未见报道。

在前期信标波前非等晕问题数值建模研究的基础上^[14],本文主要开展了实际大气条件下的瑞利信标非等晕误差测量实验研究。通过对不同采样高度(8~18 km)、不同角度偏离(相对于自然星)瑞利信

标与自然星湍流波前的时间同步测量,获得了实际外大气条件下瑞利信标的纯聚焦性、角度与聚焦相耦合性非等晕误差的各阶泽尼克像差模式分布特性等有效数据。在此基础上,通过将上述实验条件与前期信标非等晕问题数值建模的有机结合,获得了不同场景下理论与实验相互映证的有益结果。

2 实验光路原理及测量设备研制

实际大气瑞利信标非等晕误差测量系统的基本光路如图 1 所示,该测量系统主要由望远镜、光束分束镜、光束偏转镜、自然星哈特曼-夏克(HS)传感器及其对应的波前处理机、信标哈特曼-夏克传感器及其对应的波前处理机组成。其中,信标哈特曼-夏克传感器中设置有机快门、调焦机构、窄带滤光片(中心波长 $\lambda=0.532\ \mu\text{m}$)。机械快门通过向控制模块提供触发基准信号,并在控制模块对信标时序、自然星哈特曼-夏克传感器与信标哈特曼-夏克传感器的信号同步采集进行统一控制的前提下,用以对信标采样高度选通的精确控制;调焦机构用以预先对由待测信标采样高度引入的离焦量进行定量补偿(相对于无穷远高度的自然参考星而言),事先利用基准激光光源(已标定)、已知像差类型及大小的像差板分别对信标与自然星哈特曼-夏克传感器进行定标,从而确保了信标哈特曼-夏克传感器与自然星哈特曼-夏克传感器以同一标定基准为基础,分别进行信标波前与自然星波前的准确测量。

实验中研制了高速、高灵敏度、高精度的自然星哈特曼-夏克传感器与信标哈特曼-夏克传感器,两个哈特曼-夏克传感器共同在望远镜上实现了时间同步湍流波前测量。如图 2 所示,上述两个哈特曼-夏克传感器采用完全相同的子孔径布局(12×12),其主要性能参数如表 1 所示。

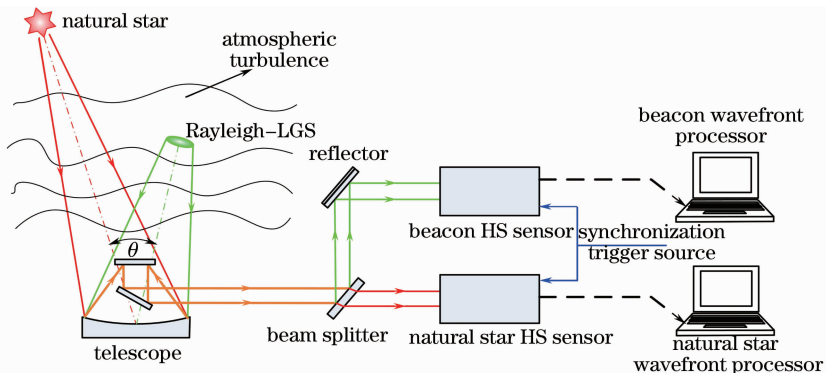


图 1 瑞利信标非等晕误差测量实验的光路原理图

Fig. 1 Schematic optical-layout of the Rayleigh-LGS anisoplanatic error measurement

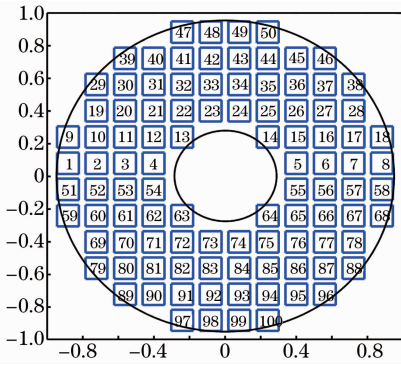


图 2 非等晕误差测量实验中的哈特曼-夏克传感器子孔径布局

Fig. 2 Layout of sub-apertures of HS sensor in anisoplanatic error experimental measurement

表 1 信标非等晕误差实验测量中哈特曼-夏克传感器的主要性能参数

Table 1 Characteristics of HS sensor in anisoplanatic error experimental measurement

Parameter	Value
Sub-apertures layout	12×12
Measuring precision of sub-aperture	1.3 (″)/pixel
Temporal synchronization precision	<5 μs
Working frequency	1000 Hz
CCD pixel	200×200 (6.5 μm/pixel)
Exposure time	1 ms

实验过程中,首先调整望远镜光轴、信标哈特曼-夏克传感器光轴、自然星哈特曼-夏克传感器光轴,以保证自然星与信标湍流光波成像子光斑阵列分别位于自然星哈特曼-夏克传感器与信标哈特曼-夏克传感器的视场中心;根据待测信标高度对信标哈特曼-夏克传感器中调焦机构的调焦距离进行设置,以使其对应至待测高度;望远镜接收的目标与信标湍流光波先后经光束分束镜、光束偏转镜分光后,分别进入自然星哈特曼-夏克传感器与信标哈特曼-夏克传感器,并分别在其对应传感器中 CCD 相机靶面成像,形成子光斑阵列图样;利用外部同步触发源控制自然星哈特曼-夏克传感器与信标哈特曼-夏克传感器的同步采集,并分别通过对应波前处理机进行自然星与信标湍流光波成像子光斑阵列图样的同步存储;事后分别对自然星哈特曼-夏克传感器与信标哈特曼-夏克传感器采集的自然星与信标湍流光波成像子光斑阵列图样进行波前复原、以及(自然星-信标)波前非等晕性误差的分析处理。

3 典型测量结果及分析

在不同角度偏离条件下,对 8~18 km 瑞利信标的非等晕性误差进行了定量测量,包括:1) 不同高度瑞利信标回光相对强度系综均值与其采样高度

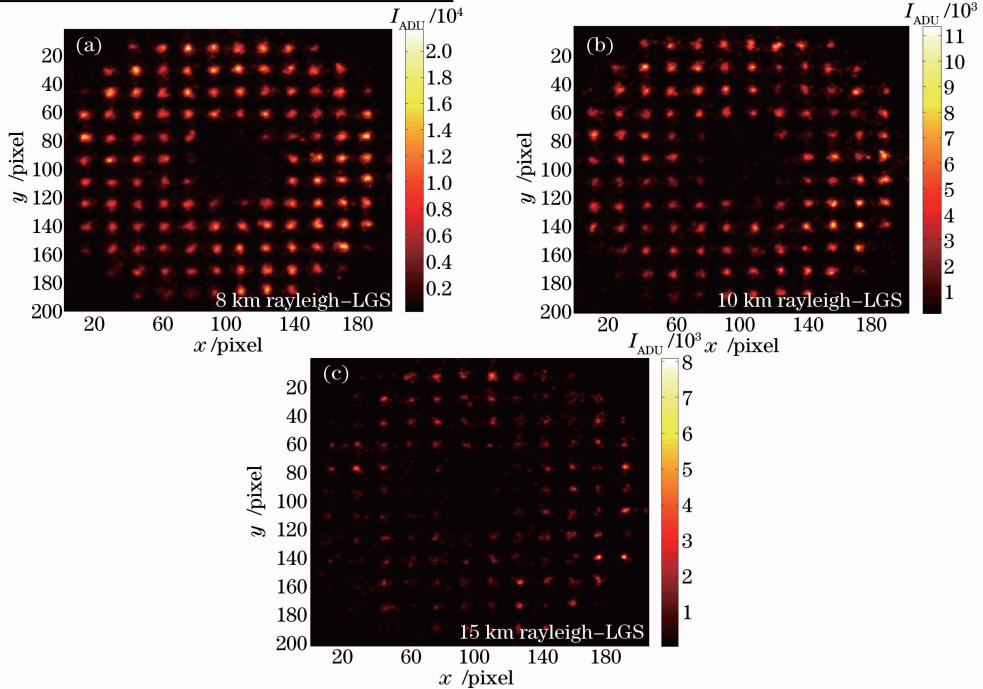


图 3 不同高度瑞利信标回光的哈特曼-夏克传感器典型光斑图样。(a) 8 km 瑞利信标; (b) 10 km 瑞利信标; (c) 15 km 瑞利信标

Fig. 3 Beacon HS sensor imaging spots resulted from Rayleigh-LGS return light with different altitudes. (a) 8 km Rayleigh-LGS; (b) 10 km Rayleigh-LGS; (c) 15 km Rayleigh-LGS

之间的对应关系;2) 自然星湍流波前的泽尼克模式系数分布;3) 不同模式瑞利信标非等晕性误差的泽尼克方差统计分布特性;4) 不同高度瑞利信标探测波前与自然星湍流波前间各阶泽尼克模式的时间互相关特性等有效数据。特别地,由于人造信标无法提供大气湍流的波前倾斜与离焦信息^[7],因此,将在3.2~3.4节的讨论中去除了倾斜项与离焦项的影响,参考光波波长为 $\lambda=0.532\ \mu\text{m}$ 。

3.1 不同高度瑞利信标的哈特曼-夏克传感器典型光斑与信标回光强度分析

不同高度瑞利信标回光的哈特曼-夏克波前传感器典型光斑图样,如图3所示。在扣除背景噪声影响后,不同高度瑞利信标回光强度(ADU, I_{ADU})

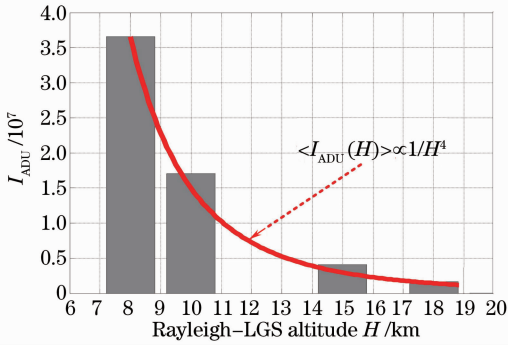


图4 不同高度瑞利信标回光强度统计均值与其采样高度之间的关系曲线

Fig. 4 Ensemble average value of the Rayleigh-LGS return light power as a function of the Rayleigh-LGS altitude

的统计均值与其采样高度 H 之间的关系曲线,如图4所示。

由图3、图4可以看出:不同高度瑞利信标回光相对强度的统计均值 $\langle I_{\text{ADU}}(H) \rangle$ 与其采样高度 H 之间满足: $\langle I_{\text{ADU}}(H) \rangle \propto 1/H^4$, 与理论规律相符。随着信标采样高度的进一步增加(15 km),其回光强度将逐渐减弱,这在一定程度上使信标哈特曼-夏克传感器测量信噪比下降。

3.2 信标探测波前与自然星湍流波前间的泽尼克模式时间互相关性分析

通过对系统采样时间段内信标哈特曼-夏克传感器与自然星哈特曼-夏克传感器复原波面对应的每一阶泽尼克模式进行互相关运算,便可以考察信标探测波前与自然星湍流波前对应各阶泽尼克模式的时间互相关性。其中,图5给出了无角度偏离10 km瑞利信标非等晕误差测量中某时刻信标探测波前、自然星湍流波前、(自然星-信标)非等晕波前误差及其泽尼克系数分布(其中,波前相位的单位为波长)。通过图中可以明显发现,信标探测波前与自然星湍流波前间有很好的相关性。

同时,图6给出了上述信标模式探测波前与自然星湍流波前对应第4至9阶泽尼克模式系数随采样时间的变化规律。可以看到,采样时间段内信标探测波前与自然星湍流波面的前9阶模式系数基本保持着较好的时间相关性,绝大部分模式的时间相关系数 δ 均保持在0.6以上。

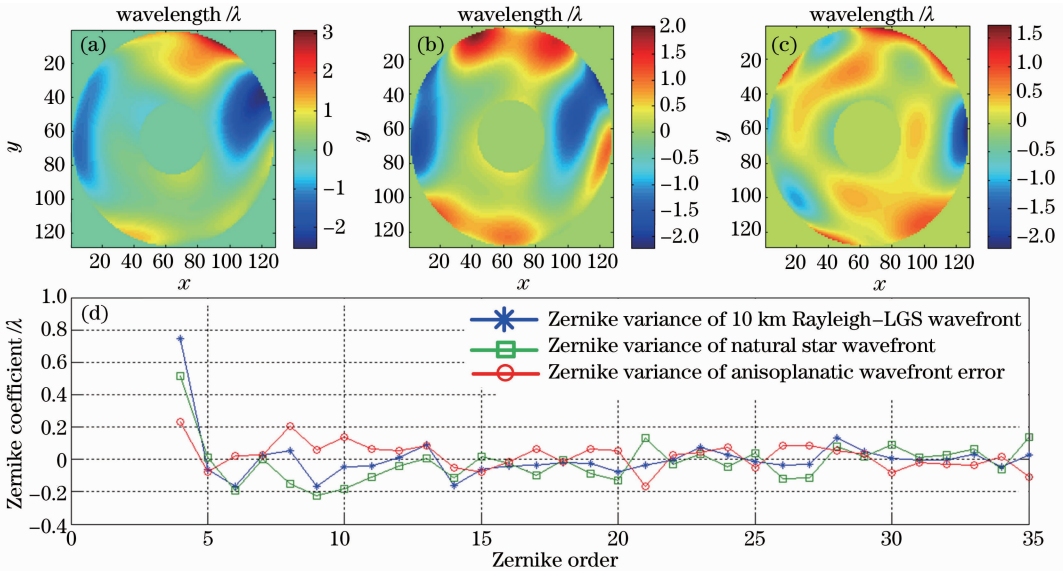


图5 无角度偏离10 km瑞利信标非等晕误差测量中的(a)典型帧信标探测波前、(b)自然星湍流波前、(c) (自然星-信标)非等晕波前误差及(d)其泽尼克系数分布

Fig. 5 (a) LGS wavefront, (b) natural star wavefront, (c) anisoplanatic wavefront and (d) their Zernike coefficient distribution in no angular deviation 10 km Rayleigh-LGS anisoplanatic error measurement

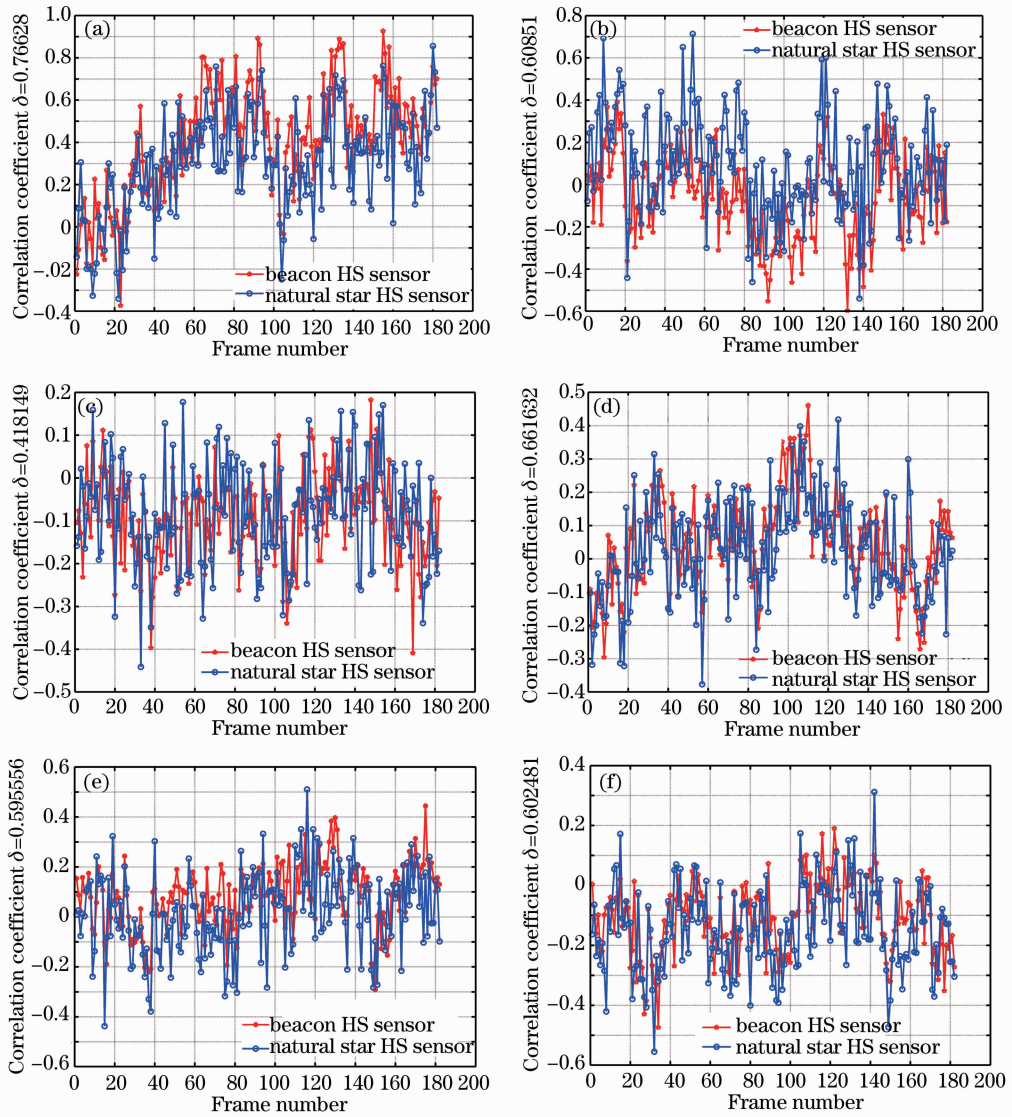


图 6 无角度偏离 10 km 瑞利信标非等晕误差测量中自然星与信标波前各阶泽尼克模式系数时间互相关性。(a) 第 4 阶泽尼克模式；(b) 第 5 阶泽尼克模式；(c) 第 6 阶泽尼克模式；(d) 第 7 阶泽尼克模式；(e) 第 8 阶泽尼克模式；(f) 第 9 阶泽尼克模式

Fig. 6 Temporal correlations for Zernike orders between LGS and natural star in no angular deviation 10 km Rayleigh-LGS anisoplanatic error measurement. (a) 4th order Zernike mode; (b) 5th order Zernike mode; (c) 6th order Zernike mode; (d) 7th order Zernike mode; (e) 8th order Zernike mode; (f) 9th order Zernike mode

无角度偏离时,不同高度瑞利信标与自然星波前间各阶泽尼克模式的时间互相关性统计结果,如图 7 所示,可以看到随着泽尼克模式阶数的增大,信标波前与自然星波前的像差模式时间相关性总体均呈现出振荡型下降趋势。

3.3 (自然星-信标)非等晕误差的泽尼克模式分布特性

不同实验模式条件下瑞利信标非等晕误差与自然星波前的各阶泽尼克方差分布比较,如图 8 所示。从图中可以看到:随着泽尼克模式阶数的增加,相比于自然星波前的各阶像差模式方差分量,瑞利信标的各阶像差模式非等晕误差随像差阶数的增加而振荡增大,即非等晕误差对高阶像差更加敏感。

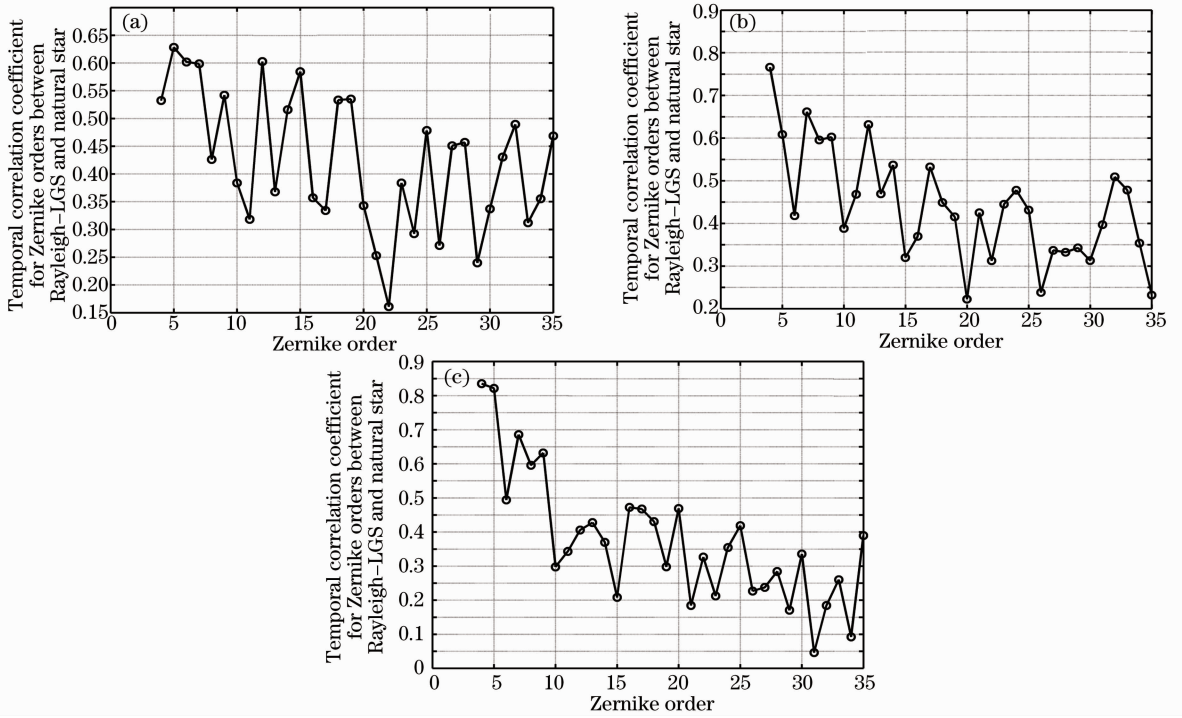


图 7 无角度偏离下不同高度瑞利信标与自然星波前各阶泽尼克模式时间互相关系数。(a) 8 km 瑞利信标；(b) 10 km 瑞利信标；(c) 15 km 瑞利信标

Fig. 7 Temporal correlation coefficients for Zernike orders between natural and LGS with no angular deviation.

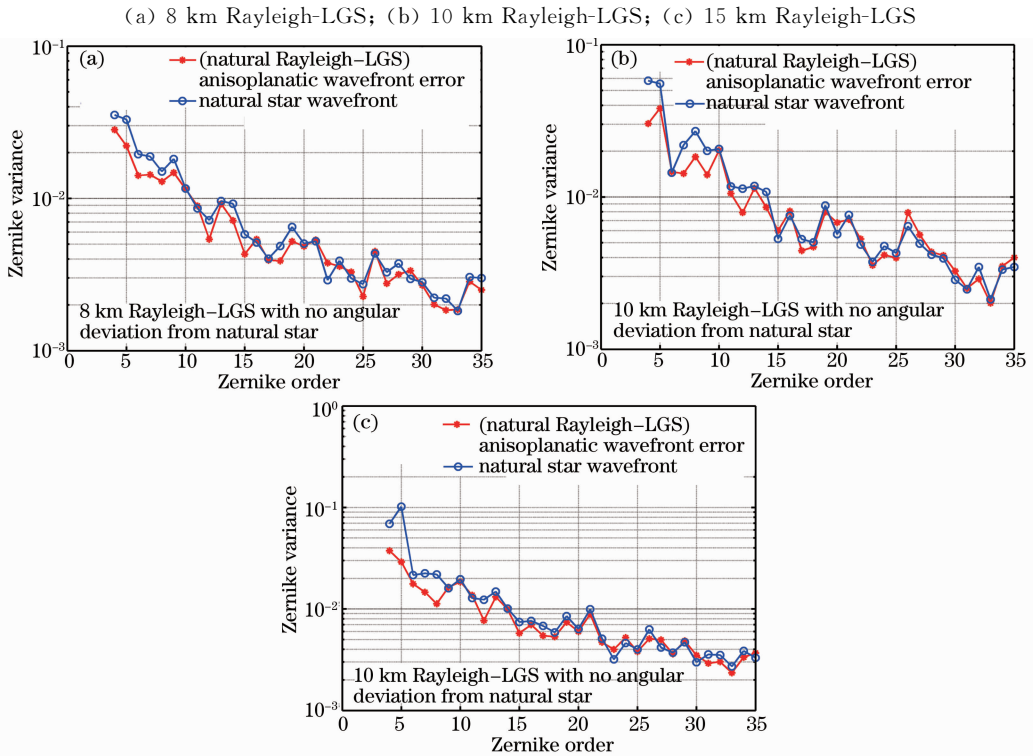


图 8 不同信标模式非等晕波前误差与自然星波前的各阶泽尼克方差比较。(a) 无角度偏离的 8 km 瑞利信标；(b) 无角度偏离的 10 km 瑞利信标；(c) 50 μ rad 角度偏离的 10 km 瑞利信标

Fig. 8 Comparisons of Zernike variances of the anisoplanatic error with different Rayleigh-LGS modes and the natural star turbulent wavefront. (a) 8 km Rayleigh-LGS with no angular deviation; (b) 10 km Rayleigh-LGS with no angular deviation; (c) 10 km Rayleigh-LGS with 50 μ rad angular deviation

4 不同信标模式非等晕误差对目标校正光波质量的影响分析

实际中人造信标与观测目标回光到达望远镜接收口径的湍流光路之间存在空间角度与高度差异,进而使信标自适应光学系统探测波前与待校正目标波前不一致(即信标湍流波前探测中的非等晕性误差),影响自适应光学的目标校正光波质量。因此,在已获取不同模式瑞利信标非等晕误差的测量结果基础上,有必要就其对目标校正光波质量的影响进行研究。这里主要以 PSF 的峰值 Strehl 比、以及半峰全宽(FWHM)为评价标准,分析不同信标模式条

件下非等晕误差对 J 波段(中心波长 $1.25 \mu\text{m}$)^[15]目标校正光波质量的影响。

分别将实验测量获得的若干帧(自然星-信标)非等晕误差二维分布 $[\Delta\varphi(x,y) = \varphi_{\text{NS}}(x,y) - \varphi_{\text{GS}}(x,y)]$ 的时序序列进行复数变换 $\{\exp[j \times \Delta\varphi(x,y)]\}$,并直接推算至远场 PSF 的强度分布,便可分析不同信标模式(不同高度、不同偏角)非等晕误差对目标校正光波质量影响的统计特性。其中,不同偏角条件下 10 km 瑞利信标非等晕误差对目标校正光波质量影响的典型 PSF(约 40 s 的多帧平均长曝光),如下图 9 所示。

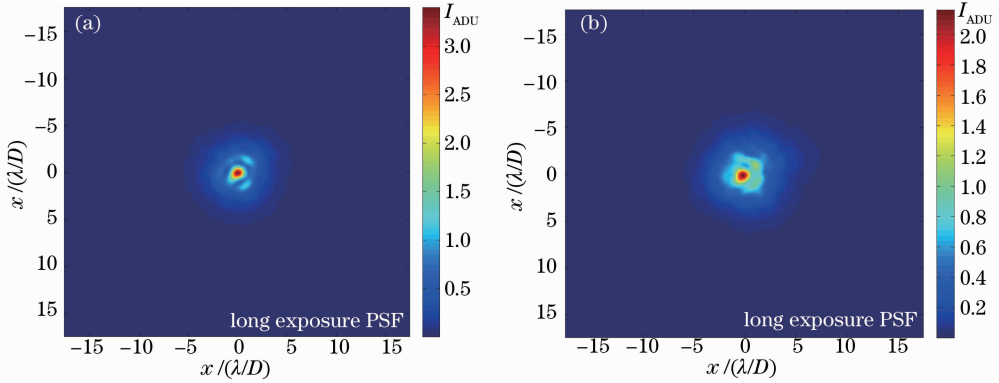


图 9 不同角度偏离条件下 10 km 瑞利信标非等晕波前误差对目标校正光波质量的影响(长曝光)。

(a) (相对自然星)无角度偏离; (b) (相对自然星)50 μrad 角度偏离

Fig. 9 Anisoplanatic errors of 10 km Rayleigh-LGS impact on corrected light-wave quality (long-exposure).

(a) With no angular deviation from the natural star and (b) with 50 μrad angular deviation from the natural star

将前期信标波前非等晕问题数值建模研究中已建立的数值模型^[14]结合实际非等晕测量实验中的外大气条件、以及已完成的不同高度(10~15 km)、不同偏角(0~50 μrad)瑞利信标实验模式场景,分别将不同信标模式非等晕误差对 J 波段目标校正光波质量影响的数值建模与实验测量结果进行了比较,如表 2 所示。其中,在上述针对不同模式非等晕

误差对光波质量影响的理论数值模拟与实验测量结果反推计算中,均去除了倾斜以及离焦的影响,并且考虑了自然星与信标哈特曼-夏克传感器的有效复原阶数;Strehl 比均值由对应约 40 s 采样时长的单帧 PSF 序列统计得到,Strehl 比、FWHM 长曝光值由对应上述采样时长的多帧平均 PSF 计算得到。

表 2 瑞利信标非等晕误差对目标校正光波质量影响的实验测量反推与数值建模结果比较

Table 2 Comparison of experimental and numerical-simulated results of Rayleigh-LGS anisoplanatic wavefront error's impact on the corrected light-wave quality

	LGS-range /km	Angular deviation between object and LGS / μrad	Strehl ratio [average]	Strehl ratio [long-exposure]	FWHM [long-exposure]
Experimental result	15	0	0.17	0.12	1.32 λ/D
Simulation result	15	0	0.20	0.15	1.25 λ/D
Experimental result	10	0	0.19	0.14	1.26 λ/D
Simulation result	10	0	0.18	0.11	1.29 λ/D
Experimental result	10	50	0.16	0.09	1.54 λ/D
Simulation result	10	50	0.16	0.09	1.47 λ/D

从表 2 中可以看到:1) 瑞利信标非等晕物理问题数值建模与不同实验模式条件下的瑞利信标实测

非等晕误差所致目标校正光波质量恶化的计算结果相互吻合;2) 数值建模与实验结果均表明,不同角

度偏离、10~15 km 瑞利信标的非等晕误差已经对 PSF、峰值 Strehl 比与 FWHM 产生了明显影响;3) 数值建模与实验结果均可看到,10 km 瑞利信标与目标之间的 50 μ rad 角度偏离已经带来 PSF 和 FWHM 近 50% 的扩展,会对成像清晰度产生一定的影响;4) 实验测量所得 15 km 瑞利信标较 10 km 瑞利信标的聚焦非等晕误差对校正后光波质量的影响略有增大,这与信标采样高度增加带来的信标哈特曼-夏克传感器测量信噪比下降、以及实验测量过程中大气条件的略微改变有关。

5 结 论

实际有限高度人造信标与观测目标之间的角度偏离会带来角度与聚焦综合非等晕性误差,进而降低自适应光学系统的校正性能。利用新研制的自然星哈特曼-夏克传感器与信标哈特曼-夏克传感器在望远镜系统上实现了时间同步湍流波前测量,并对实际大气条件下不同模式瑞利信标的波前非等晕性误差进行了定量测量及分析。研究发现,系统采样时间段内,从信标探测波前与自然星湍流波前之间的对应阶泽尼克模式时间相关性来看,随像差模式阶数的逐渐增大,其互相关系数总体呈现振荡下降趋势,且两者波前对应前 9 阶模式的时间互相关系数绝大部分均保持在 0.55 以上。相比于自然星波前的各阶泽尼克模式方差分量,瑞利信标的模式非等晕误差均随其阶数的增加而逐渐增大,即非等晕误差对高阶像差更加敏感。通过对实验测量所得不同采样高度(10~15 km)、不同角度偏离(0~50 μ rad)瑞利信标非等晕误差所致目标校正光波质量影响的分析计算,并将实际外大气条件与前期信标非等晕数值建模研究的结果有效结合,获得了上述不同实验场景下信标非等晕误差所致 J 波段目标像质恶化理论与实验测量反推相互映证的有益结果;同时发现,50 μ rad 角度偏离会带来 10 km 瑞利信标校正目标像时其 PSF 和 FWHM 近 50% 的扩展。该研究结果为进一步开展后续外大气信标自适应光学研究提供了极有意义的参考。

参 考 文 献

- 1 R Foy, A Labeyrie. Feasibility of adaptive telescopes with laser probe[J]. *Astron Astrophys*, 1985, 152: 129-131.
- 2 L A Thompson, C S Gardner. Experiments on laser guide stars at Mauna Kea Observatory for adaptive imaging in astronomy[J]. *Nature*, 1987, 328(6127): 229-231.
- 3 R Q Fugate, D L Fried, G A Ameer, *et al.*. Measurement of atmospheric wavefront distortion using scattered light from a laser guide star[J]. *Nature*, 1991, 353(6340): 144-146.
- 4 R Foy. Laser guide stars: principle, cone effect and tilt measurement[J]. *Optics in Astrophysics*, 2005, 249-274.
- 5 R J Sasiela. *Electromagnetic Wave Propagation in Turbulence: Evaluation and Application of Mellin Transform* [M]. Washington: SPIE Press, 2007.
- 6 J Stone, P H Hu, S P Mills, *et al.*. Anisoplanatic effects in finite-aperture optical systems[J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11(1): 347-357.
- 7 G Molodij, G Rousset. Angular correction of Zernike polynomials for a laser guide star in adaptive optics[J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(8): 1949-1966.
- 8 M A Van Dam, R J Sasiela, A H Bouchez, *et al.*. Angular anisoplanatism in laser guide star adaptive optics [C]. SPIE, 2006, 6272: 627231.
- 9 Shen Feng, Jiang Wenhan. Modal decomposition of atmospheric error of atmospheric turbulence for a laser guide star[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(3): 348-355.
沈 锋, 姜文汉. 激光导引星大气湍流波前非等晕性误差的像差模式分解[J]. *光学学报*, 2003, 23(3): 348-355.
- 10 Wan Min, Su Yi, Xiang Rujian. Turbulence-induced low order aberrations of optical wavefronts in partial adaptive compensation with Rayleigh beacon or sodium beacon[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(3): 282-286.
万 敏, 苏 毅, 向汝建. 激光导引星自适应光学系统对大气湍流低阶像差校正效果分析[J]. *强激光与粒子束*, 2001, 13(3): 282-286.
- 11 R Q Fugate, D L Fried, G A Ameer, *et al.*. Measurement of atmospheric wavefront distortion using scattered light from a laser guide star[J]. *Nature*, 1991, 353(6340): 144-146.
- 12 L A Thompson, C S Gardner. Experiments on laser guide stars at Mauna Kea Observatory for adaptive imaging in astronomy[J]. *Nature*, 1987, 328(6127): 229-231.
- 13 B G Zollars. Atmospheric-turbulence compensation experiments using synthetic beacon[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1992, 5(1): 67-92.
- 14 Luo Xi, Li Xinyang. Investigation of artificial beacon anisoplanatic effect in atmospheric turbulence probing I: numerical modeling [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0612002.
罗 曦, 李新阳. 信标湍流探测中波前非等晕问题的研究 I: 数值建模[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0612002.
- 15 Y Minowa, Y Hayano, H Terada, *et al.*. Subaru laser guide adaptive optics systems: performance and science operation [C]. SPIE, 2012, 8447: 84471F.

栏目编辑: 王晓球