

等晕角测量结果对比分析

胡月宏^{1,2}, 宗飞^{1,2}, 吴敏¹, 封双连¹, 李志朝¹

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;

2. 中国气象局乌鲁木齐市沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 等晕角是描述光学湍流效应的重要参数之一, 对自适应光学系统设计和补偿效果分析有着重要的意义。文中介绍了一种三环结构变迹镜, 给出了自研高精度等晕角测量仪的测量原理、实验测量方法和主要技术指标。在新疆戈壁地区开展了等晕角测量实验, 并将测量结果与单孔等晕角测量仪测量结果进行对比分析。结果表明: 两套仪器所测等晕角变化趋势一致性较好, 自研高精度等晕角测量仪中, 三环变迹镜能够较好的调制光强以匹配等晕角测量随高度变化的权重需求, 拟合系数误差小, 可以实现等晕角的高精度测量。

关键词: 大气光学; 光学湍流; 等晕角; 对比分析

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S217001

Contrast and analysis on measurement result of isoplanatic angle

Hu Yuehong^{1,2}, Zong Fei^{1,2}, Wu Min¹, Feng Shuanglian¹, Li Zhichao¹

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002, China)

Abstract: Isoplanatic angle is one of important optical turbulence parameter which has played a significant role in the design of adaptive optics system and the analysis of compensation effect. An apodized mask with triple concentric annuluses was introduced, Measuring principle, measuring method and main specifications were introduced in this paper about the high precision isoplanatic angle. Next to the Xinjiang region, the measurement experiment of isoplanatic angle was carried out, and was compared with single ring isoplanatic angle measuring instrument. The results show that two sets of instruments measured such as isoplanatic angle trends are basically identical. The triple concentric mirror can better modulate the light intensity to match the weight demand of the isoplanatic angle measurement with altitude. The error of the fitting coefficient is small, and it can realize the high precision measurement of the isoplanatic angle.

Key words: atmospheric optics; optical turbulence; isoplanatic angle; contrast and analysis

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-10

基金项目: 中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2014001); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306066)

作者简介: 胡月宏(1979-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事大气光学技术方面的研究。Email: 937601567@qq.com

0 引言

等晕角是用来描述光波在湍流大气中传输时两点间角度相干性的物理量,是大气光学湍流效应的重要参数之一,其值为两个测量点间对同一观测目标能保持相位相干的最大角度,角度再增大便无同相位性,将产生相干相消^[1]。等晕角参数的研究,对通信、高功率传输和遥感等激光大气工程和部分光学工程具有重要意义。外场等晕角参数的测量,可为光波在大气中传输相关的自适应光学校正、激光大气通信以及天文学等领域的研究提供大气光学数据。

自 20 世纪 60 年代末 D. L. Fried 提出等晕角并被国内外学者普遍认同以来,等晕角的测量技术受到了广泛关注^[2]。1979 年 G. C. Loos 和 C. B. Hogge 提出变迹镜的概念后,1983 年 D. L. Walters 结合卡赛格林结构的天文望远镜研制成功了第一代等晕角测量仪^[3]。1985 年 D. L. Walters 重新设计了变迹镜,首次使用双环型变迹镜^[4-5]。由于高空大气湍流对等晕角的贡献最大,而双环型变迹镜不能较好地反应高度 10 km 之上的大气湍流的影响,1988 年美国空军在林肯实验室成功研制和设计了三环变迹镜,并于同年制造了第三代等晕角测量仪,其测量结果可以达到较高的精度。

文中运用第三代高精度等晕角测量仪,与中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的单孔等晕角测量仪进行测量对比分析^[6-7],进一步检验新方法的适用性,验证所研制等晕角测量仪的可靠性。

1 测量原理

星光经湍流大气传输后会出现光波强度的起伏,将接收望远镜的入瞳设计为圆对称的孔径,其透过率为 $P(\rho)$, $0 \leq P(\rho) \leq 1$,其中 ρ 为距离入瞳中心的距离,设经过望远镜所接收到的星光的强度为 S ,则望远镜所接收到星光强度起伏的归一化方差为^[8-10]:

$$\sigma_s^2(\varphi) = 4(2\pi)^4 0.033 \text{sec}^{8/3} \varphi k^2 A^{-2} \int_0^\infty C_n^2(z) W(z) dz \quad (1)$$

其中, $A = 2\pi \int \rho P(\rho) d\rho$ 。

等晕角 θ_0 的定义为:

$$\theta_0 = \left[2.91 k^2 \text{sec}^{8/3} \varphi \int_0^L C_n^2(z) z^{5/3} dz \right]^{-3/5} \quad (2)$$

比较公式(1)和公式(2)可以看出,若能够使得公式(1)中的加权函数 $W(z)$ 的形式为:

$$W(z) = cz^{5/3} \quad (3)$$

则可以利用星光强度的起伏方差反演计算等晕角。将公式(3)带入公式(1)后,利用公式(1)和公式(2)可以得出下式:

$$\theta_0(\varphi) = 12.9A^{-6/5} c^{3/5} [\sigma_s^2(\varphi)]^{-3/5} \quad (4)$$

即可以通过测量归一化星光强度起伏方差 $\sigma_s^2(\varphi)$, 计算给出等晕角 $\theta_0(\varphi)$ 。

如图 1 所示,星光经湍流大气传输后,由特殊形状的变迹镜调制,聚焦至光电探测器。其光强起伏与等晕角有确定的关系,通过测量星光的强度起伏,即可反演给出等晕角。

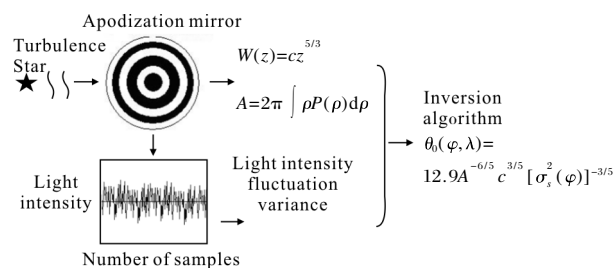


图 1 等晕角测量系统原理示意图

Fig.1 Principle schematic of isoplanatic angle measurement system

2 实验及测量结果

高精度等晕角测量仪,主要由三环变迹镜、光学接收系统、光学成像系统、光电倍增管、图像监测系统、数据采集与处理系统、控制系统等组成。该等晕角测量系统测量波长是 500~800 nm,采样频率不小于 200 Hz,单次样本量为 1 000,天顶角测量范围为 $5^\circ \sim 45^\circ$,测量动态范围为 $3 \sim 30 \mu\text{rad}$ ($l=500 \text{ nm}$),测量目标恒星一般为 Vega, Altair, Arcturus 等。

测量地位于新疆博斯腾湖附近的戈壁滩上,等晕角测量系统安置在距离地面高度约 10 m 左右的楼顶上,观测场地四周除西北方向有低矮建筑物和少量小树外均为开阔地,下垫面为戈壁滩,沙砾碎石土上长有少量骆驼刺。光波经湍流大气传输,由变迹镜调制后入射至光学接收系统,后经光学成像系统成像聚焦于光电倍增管的焦平面上,数据采集与处理系统对光电倍增管的电流信号进行模数转换、采集和处理,最后反演给出等晕角测量结果。

为了避免天气因素对验证对比的影响,选择在天气晴朗、天空云量少的时候进行对比测量,图 2 给出了一组晴好天气的典型对比数据,参考波长为 550 nm。

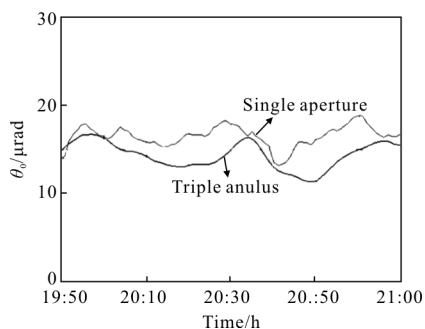


图 2 等晕角对比分析

Fig.2 Comparison of isoplanatic angles

由图 2 可知,这两套等晕角测量仪所测等晕角变化趋势基本一致,单孔等晕角测量仪给出的测量结果略大。

3 比对分析

从上节的测量结果来看,单孔等晕角测量仪给出的测量结果略大。造成这一现象的原因主要包括以下几点。

(1) 测量理论: 两套测量仪器都是基于光强闪烁法测量等晕角,其中高精度等晕角测量仪使用了三环变迹镜来拟合公式(2)中 $z^{5/3}$ 的权重函数,安光所研制的等晕角测量仪使用单孔变迹镜拟合 $z^{5/3}$ 的权重函数,图中取以 10 为底的对数。拟合效果如图 3 所示。

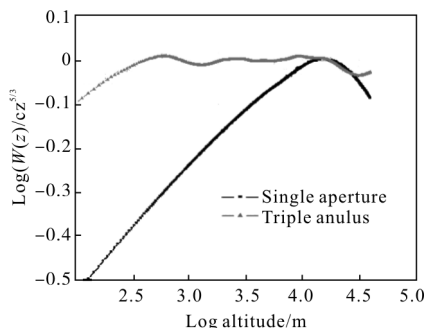


图 3 拟合误差比对

Fig.3 Comparison of error of fitting

高精度等晕角测量仪能够很好的拟合 300~30 000 m 高空湍流的权重,而单孔等晕角测量仪仅能拟合高空

16 000 m 左右的湍流权重,高精度等晕角测量仪更精确。

(2) 采样频率: 高精度等晕角测量仪使用光电倍增管作为光电探测器,采样频率可达千赫兹,单孔等晕角测量仪使用 CCD 相机作为光电探测器,采样频率约 100 Hz。从频谱上分析,高精度等晕角测量系统更能反应湍流变化的高频部分,测量结果略准确。

(3) 复合波长: 主要由三个参数影响(星光光谱、滤光片光谱函数、探测器光谱相应函数)。两套仪器都选用恒星作为观测目标,星光光谱没有区别。对于滤光片的选择,高精度等晕角测量仪使用带通滤光片(500~800 nm),单孔等晕角测量仪使用长波通滤光片。探测器光谱相应函数方面,光电倍增管波长相应 150~900 nm,CCD 相机波长相应 300~1 100 nm。因此高精度等晕角测量仪的复合波长较单孔等晕角测量仪的复合波长小。

(4) 信号处理: 噪声主要来自天光背景和探测器本身。对于天光背景而言,晴好天气条件下,500 nm 波长附近的天光背景强度最大,随着波长增加而递减,如图 4 所示。光电倍增管作为光强探测器件,具有较高的探测效率,可以很好的避免饱和效应引起的测量偏差,而 CCD 相机对于光强的信号的提取和计算,需要进行降噪处理和算法研究,相比而言,光电倍增管更适合微弱信号的光强探测。

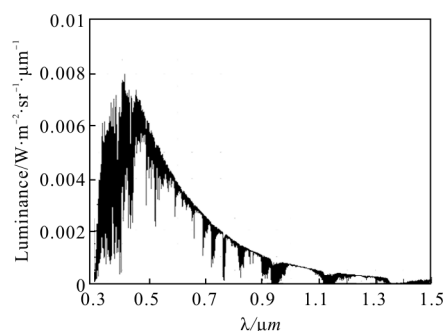


图 4 天空背景光谱辐射数据

Fig.4 Data of sky background radiation luminance

(5) 测量地点: 两套仪器放置地点相距约 50 m, 距离地面垂直高度分别为 10 m 和 3 m, 观测恒星均为 Vega。从公式(2)中可以看出,等晕角主要反映高空湍流情况,近地面大气湍流对等晕角的测量影响很小,因此,测量高度引起的偏差可忽略。

4 结 论

自研高精度等晕角测量仪中,三环变迹镜能够较好的调制光强以匹配等晕角测量随高度变化的权重需求,拟合系数误差小,可以实现等晕角的高精度测量。在夜间使用光电倍增管测量光强信号,可控制饱和效应带来的测量误差,同时利用高速数据采集卡采集模拟信号可减小采样率低对测量结果带来的影响。从测量结果来看,与安光所单孔等晕角测量仪具有较好一致性。

参考文献:

- [1] Greenwood C P, Primmerman C A. Adaptive optics research at Lincoln Laboratory[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1992, 5(1): 3-24.
- [2] Krause-Polstorff J, Murphy E A, Walters D L. Instrument comparison: corrected stellar scintillometer versus isoplanometer[J]. *Applied Optics*, 1993, 32: 4051-4057.
- [3] Loos G C, Hogge C B. Turbulence of the upper-atmosphere and isoplanatism[J]. *Applied Optics*, 1979, 18: 2654-2667.
- [4] Stevent K B. Remote measurement of the atmospheric isoplanatic angle and determination of refractive turbulence profiles by direct inversion of scintillation amplitude covariance function with tikhonov regularization [D]. CA: Naval Postgraduate School, 1985.
- [5] Hu Yuehong, Qiang Xiwen, Zong Fei, et al. Optimum design and verification of a double loop apodized lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S): 196-198. (in Chinese)
胡月宏, 强希文, 宗飞, 等. 一种双环变迹镜的优化设计与验证[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(S): 196-198.
- [6] Yang Gaochao, Liu Xiaochun. Measurement of atmospheric coherence length and isoplanatic angle[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1994, 6: 215-220. (in Chinese)
杨高潮, 刘晓春. 大气相干长度与等晕角的测量 [J]. 强激光与粒子束, 1994, 6: 215-220.
- [7] Yu Longkun, Shen Hong, Jing Xu, et al. Study on the measurement of isoplanatic angle using stellar scintillation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0301001-1-5. (in Chinese)
于龙昆, 沈红, 靖旭, 等. 利用恒星闪烁测量等晕角的研究 [J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0301001-1-5.
- [8] Walters D L, Bradford L W. Measurements of r_0 and θ_0 : two decades and 18 sites[J]. *Applied Optics*, 1997, 36: 7877-7885.
- [9] Shapiro J H. Isoplanatic distance of the turbulent atmosphere [C]//Optical Society of American, 1974, 64: 540AJ.
- [10] Murphy E A, Roadcap J R. Comparison of isoplanatic angles derived from thermosonde and optical measurements [C]//SPIE, 1998, 3443: 152-158.