

等晕角测量实验与分析

宗 飞 强希文 吴 敏 常金勇 封双连

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要 等晕角是反映大气湍流特性的重要参数之一,对自适应光学系统设计和补偿效果分析有着重要的作用。介绍了一种新型的三环结构变迹镜,并将其应用于高精度等晕角测量。给出了测量原理和实验测量方法,进行了夜间等晕角的测量。理论推导结果表明:利用三环结构变迹镜对光强调制,能够很好地拟合大气湍流随高度分布的加权特性,并提高等晕角的测量精度。测量结果表明:西安城区夜间的等晕角变化范围为 $5\sim 10\ \mu\text{rad}$,与同纬度地区的等晕角值比较一致。针对现有实验系统存在的问题提出了改进方案。

关键词 大气光学;变迹镜;等晕角;测量

中图分类号 TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s101003

Experiment and Analysis on Measurement of Isoplanatic Angle

Zong Fei Qing Xiwen Wu Min Chang Jinyong Feng Shuanglian

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract Isoplanatic angle is one of important atmospheric turbulence parameters which has play a significant role in system design and compensation effect of adaptive optics. A apodized mask with triple concentric annuluses is introduced and applied to high precision measurement of isoplanatic angles. Principle and measurement technique are presented, and isoplanatic angle is measured at night in Xi'an. The conclusion of theoretical derivation shows that the apodized mask can modulate irradiance of star light received as a "5/3" power of height and improve measurement precision. The measurement results shows that isoplanatic angles in a range $5\sim 10\ \mu\text{rad}$ at night in Xi'an agree with that in the same latitude regions. The suggestions for improving experimental device are proposed.

Key words atmospheric optics; apodized mask; isoplanatic angle; measurement

OCIS codes 010.0280; 010.1290; 010.1300; 010.1330

1 引 言

在利用自适应光学系统对大气湍流进行校正的相关应用以及对激光大气光学条件评价时,需要对整层大气湍流特性参数进行测量和分析。例如天文光学成像系统对空间目标成像、激光能量传输等,为了使得成像尽可能接近衍射极限,或者使得激光能量传输至远距离时能量集中度尽可能高,需要利用自适应光学系统对传输路径上的大气湍流进行校正。

等晕角作为描述大气湍流重要的参数之一,它描述了光波在湍流大气中传输时相位一致的最大角度,角度再增大时光波便无同相位性,在等晕角范围内大气路径上湍流造成的波前畸变基本一致。

自 Shapiro 等^[1-2]提出等晕角并被国内外学者普遍认同以来,等晕角测量技术便受到广泛关注。

由于等晕角是距离的“5/3”次幂,若能设计出一种变迹镜可实现对光的调制,满足距离的“5/3”次幂的关系,问题即可解决。1983年, Walter 等^[3]设计了一种单孔变迹镜,成功研制了第一代等晕角测量仪。由于测量精度的问题,1985年, Kranse 等^[4-5]设计了一种双环结构的变迹镜取代了第一代等晕角测量仪的单孔变迹镜,提高了等晕角的测量精度。1988年美国空军林肯实验室再次改进变迹镜,成功研制了三环结构变迹镜的等晕角测量仪,其测量精度更高。在国内,等晕角测量仪多使用单孔结构变迹镜对光波进行调制,测量精度有限。最近,中国科学院光电技术研究所报道了一种基于多子孔径成像的大气等晕角测量方法,该方法多应用于以多子孔径成像系统作为探测器的光学系统。

收稿日期: 2014-01-22; 收到修改稿日期: 2014-03-14

基金项目: 国家 863 计划(2013AA8061007)

作者简介: 宗 飞(1984—),男,工程师,主要从事大气光学方面的研究。E-mail: zfseabluesky@126.com

本文介绍了一种使用特殊变迹镜调制光强分布从而直接测量等晕角的方法,通过实验验证了方法的可行性,并在西安城区进行了实地测量,给出了当地夜晚等晕角的大致范围。

2 理论分析

等晕角定义式为

$$\theta_0 = [2.91k^2 \sec^{8/3} \varphi \int_0^L C_n^2(z) z^{5/3} dz]^{-3/5}, \quad (1)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为光波波数, λ 为光波波长, $C_n^2(z)$ 为沿路径 z 的大气折射率结构常数廓线分布, φ 为天顶角。

从(1)式可以看出,等晕角是大气折射率结构常数沿路径的加权积分,权函数为路径的“5/3”次幂。如果已知大气折射率结构常数的廓线分布,则可利用大气折射率结构常数沿路径的加权积分计算给出等晕角。但是,由于在实际条件下很难做到对于大气折射率结构常数廓线的实时测量,所以,很难利用(1)式来进行等晕角的准确测量。

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,其透射率为 $P(\rho)$, $0 \leq P(\rho) \leq 1$, 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

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

式中 $A = 2\pi \int \rho P(\rho) d\rho$ 。比较(1)式和(2)式可以看出,若能够使得(2)式中的加权函数 $W(z)$ 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(3)式代入(2)式后,利用(1)式和(2)式可以得出下式:

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

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 $\theta_0(\varphi)$ 。

通过以上的分析可以看出,设计出一种对所接收的星光强度进行调制的变迹镜,使其加权函数形如(3)式,是等晕角测量的关键技术之一。对于透射率为 $P(\rho)$ 的接收孔径,其加权函数 $W(z)$ 的表示形式为

$$W(z) = \int_0^\infty |d\rho J_0(\rho) P(\rho)|^2 L^{-8/3} \sin^2\left(\frac{L^2 z}{2k}\right) dL. \quad (5)$$

式中 $J_0(x)$ 为零阶 Bessel 函数,其中 n 阶 Bessel 函数的形式如下:

$$J_n(x) = (x/2)^2 \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k}{k!(n+k)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k}. \quad (6)$$

考虑到单孔径变迹镜和双环变迹镜的不足,且为了实际工程中便于实现,变迹镜设计时所应用的透射率函数 $P(L\rho)$ 形式如下:

$$P(\rho) = \begin{cases} 1, & R_1 \leq \rho < R_2, R_3 \leq \rho < R_4, R_5 \leq \rho < R_6 \\ 0, & 0 \leq \rho < R_1, R_2 \leq \rho < R_3, R_4 \leq \rho < R_5 \end{cases}. \quad (7)$$

通过大量的计算,给出如表 1 所示的三环型变迹镜设计参数,其中 $W(z)$ 的计算值及其拟合曲线 $W(z) = 8.847 \times 10^{-17} z^{5/3}$ 如图 1 所示。由图 1 可以看出,该变迹镜能够很好地拟合模拟距离“5/3”次幂的加权函数。

表 1 变迹镜尺寸

Table 1 Size of apodized mask

Parameter	Radius /mm
Central obscuration	35.56
Telescope	101.6
Innermost annulus (in/out)	37.3888/43.8404
Second annulus (in/out)	62.8904/69.2404
Outermost annulus (in/out)	81.9404/101.6000

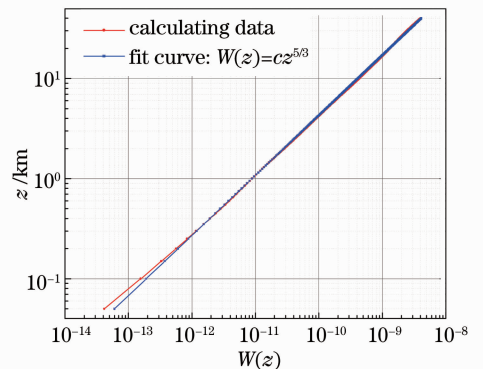


图 1 $W(z)$ 的计算值及其拟合曲线
Fig. 1 Value of $W(z)$ and fitting curve

为了对所设计的变迹镜进行数值验证,对所设计的三环变迹镜与 $W(z) = cz^{5/3}$ 的一致性进行了分析,同时,与单孔径变迹镜和双环变迹镜进行了对比。表 2 为单孔径变迹镜和双环变迹镜的设计参

数,计算时所用参数为:光波波长 $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$,天顶角为 0° ,内尺度 $l_0 = 0.005 \text{ m}$,外尺度 $L_0 = 10 \text{ m}$,积分步长为 15 m 。

表 2 变迹镜参数(单孔径/双环)

Table 2 Parameter of apodized mask (single aperture/dual annulus)

Type	Fitting coefficient C /m ⁴	White areas A /m ²	Radius /mm
Single aperture	1.209×10^{-16}	0.0095	55.00
Dual annulus	1.551×10^{-16}	0.0205	Innermost annulus (in/out)
			Outermost annulus (in/out)
			37.50/50.00
			70.00/101.6

图 2 给出了三种变迹镜与 $W(z) = cz^{5/3}$ 的一致性及其误差。可以看出,三环变迹镜和双环变迹镜与 $W(z) = cz^{5/3}$ 的一致性优于单孔径变迹镜;双环变迹镜在高度 1~30 km 范围与 $W(z) = cz^{5/3}$ 的一致性很好,但高度小于 1 km 时,与 $W(z) = cz^{5/3}$ 的一致性较差;而三环变迹镜能够在整个高度范围与

$W(z) = cz^{5/3}$ 的一致性均很好。

为进一步验证变迹镜设计的合理性,利用常用的大气折射率结构常数廓线 H-V 模型,计算了三种变迹镜测量的相对误差如图 3 所示。其中 H-V 模型如下式:

$$C_n^2(z) = 8.16 \times 10^{-54} z^{10} \exp\left(-\frac{z}{1000}\right) + 3.02 \times 10^{-17} \exp\left(-\frac{z}{1500}\right) + 1.90 \times 10^{-15} \exp\left(-\frac{z}{100}\right). \quad (8)$$

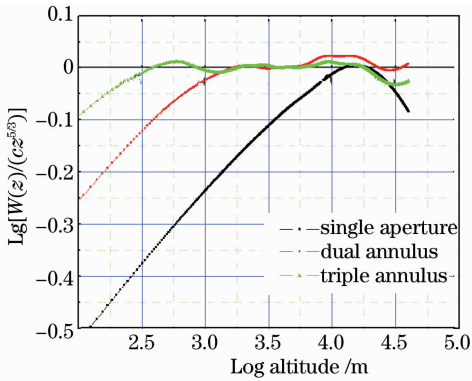


图 2 三种变迹镜加权函数与 $W(z) = cz^{5/3}$ 的一致性对比

Fig. 2 Comparison of the function $W(z) = cz^{5/3}$ between three apodized masks

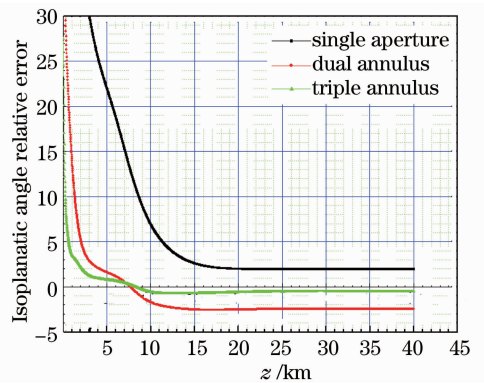


图 3 三种变迹镜的相对误差对比

Fig. 3 Comparison of the relative error between three apodized masks

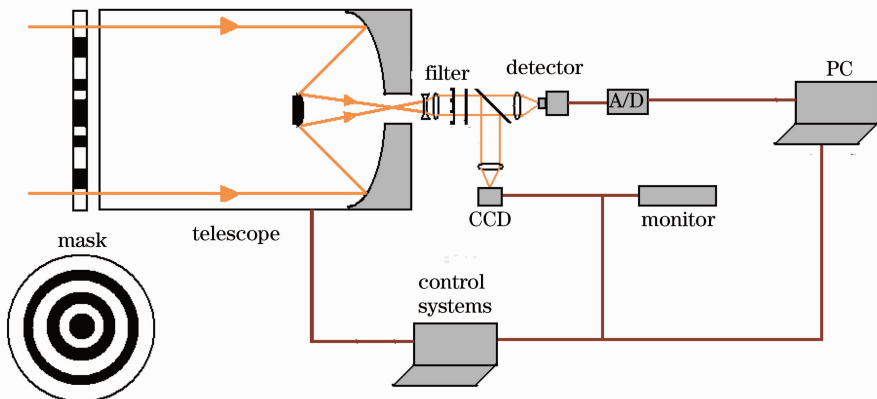


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Sketch of experimental setup

由图3可以看出,三环变迹镜所得等晕角相对误差明显小于双环变迹镜和单孔变迹镜的相对误差,总的测量相对误差大约为1.0%。

3 实验布局

如图4所示,经湍流大气传输的光波,经过变迹镜后入射至卡式望远镜,后经光学成像系统成像聚焦于光电探测器的焦平面上,数据采集与处理系统对光电探测器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。

假定等晕角测量系统采样频率为 f ,样本量为 N ,根据实测的数据,即可计算光强起伏归一化方差 $\sigma_s^2(\varphi)$:

$$\sigma_s^2(\varphi) = \frac{V_{\text{variance}}}{M_{\text{mean}}^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha X_i)^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha X_i \right)^2}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha X_i - b \right)^2}, \quad (9)$$

式中 α 为光电探测器的增益系数, b 为无光源信号时测量的背景值,可以通过多次测量所测恒星周围的背景光求平均值的方法得到。在得到光强起伏归一

化方差 $\sigma_s^2(\varphi)$ 后,利用(4)式即可计算给出等晕角数值。

4 实验测量结果与分析

按照实验的布局搭建了实验系统,系统硬件配置如表3所示。对于微弱光信号的强度测量在实验中选用光电倍增管(PMT),这主要是因为调节合适的高压可抑制光强饱和现象发生,结合高速数据采集卡还可以实现数据的高采样率,在实验中设置高压为700V,采样率为1kHz。2013年6月,在西安理工大学(北纬34.254°,东经108.989°,海拔400m)进行了实地测量,测量目标为织女星(vega)。

表3 实验配置

Table 3 Collocation of the experiment	
Name	Model
Apodized mask	Nonstandard
Telescope	CGEM800 GPS XLT
PMT	ET-9128B
Data collection card	NI-9125A
CCD	SVS-340

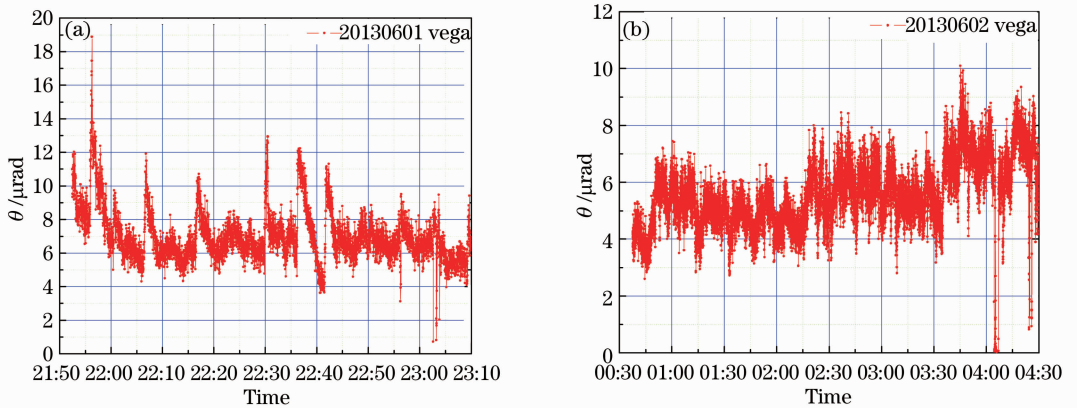


图5 晴好天气等晕角测量结果

Fig. 5 Isoplanatic angle in clear sky

图5是晴好天气条件下,夜间等晕角测量结果(天顶角归算至零度)。可以看出其变化范围在5~10 μrad ,平均值约为7 μrad (美国宾夕法尼亚大学[40.8 N,77.9 W]5月等晕角平均值6.62 μrad)。

5 结 论

三环结构变迹镜能够较好地调制光强以匹配等晕角测量随高度变化的需要,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闪烁信号,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。而测量结果来看,西安地区夜间的等晕角变化范围为5~10 μrad ,这与同纬度地区相似地理环境条件的等晕角数值基本一致,可供参考。

进一步完善工作主要在两个方面开展:1)研究星光光谱特性,选择合适的滤光技术,降低噪声给测量带来的误差;2)利用三环变迹镜有效通光量较大的优点,尝试使用CCD相机取代光电倍增管进行白天等晕角测量。

参 考 文 献

- 1 J H Shapiro. Isoplanatic distance of the turbulent atmosphere [C]. Optical Society of American, Spring Meeting, 1974.
- 2 Yang Gaochao, Liu Xiaochun, Fan Chengyu, *et al.*. Measurement of atmospheric coherence length and isoplanatic angle [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1994, 6(2): 215—220.
杨高潮, 刘晓春, 范承玉, 等. 大气相干长度与等晕角的测量 [J]. 强激光与粒子束, 1994, 6(2): 215—220.
- 3 D L Walters, L W Bradford. Measurements of r_0 and θ_0 : two decades and 18 Sites [J]. Appl Opt, 1997, 36(30): 7877—7885.
- 4 P J Krause, E A Murphy, D L Walters. Instrument comparison: corrected stellar scintillometer versus isoplanometer [J]. Appl Opt, 1993, 32(21): 4051—4057.
- 5 J R Roadcap, E A Murphy. Comparison of isoplanatic angles derived from thermosonde and optical measurements [J]. Pure and Applied Geophysics, 1999, 156(3): 503—524.

栏目编辑：何卓铭