

南极冰穹A首台自动视宁度检测仪的研制

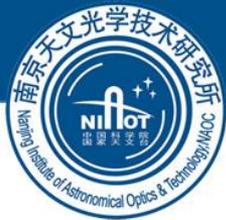
裴冲

陈华林

袁祥岩

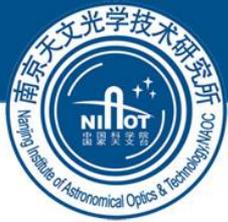


南极冰穹C (Dome C) 的选址结果显示: Dome C 具有寒冷干燥, 红外背景辐射低, 可连续3-4个月观测, 空气明净, 透过率高, 风速低等特征, 是比地面上任何中纬度台址都好的天文观测台址。而我国最先登陆的内陆最高点冰穹A被国际天文界广泛认为可能是比Dome C更好的天文台址。近三年来, 我国南极天文中心领导开展的Dome A的台址测量工作已初步证实了Dome A作为天文台址的巨大优势^[1]。但是到目前还没有获得直接用于衡量天文台址好坏最有力的视宁度数据。本文介绍我们自行研制的我国首个用于Dome A的自动视宁度测量仪, 基于一台口径35cm的商用望远镜进行硬件改造和软件开发, 保证其在Dome A低温低压环境下进行自动观测和数据处理。目前该仪器已在运往Dome A的途中, 计划2011年初安装到Dome A并开始测量。起运前, 在兴隆观测站与国家天文台选址组的一台视宁度监测仪进行了对比测量, 对软件、硬件和装调方法进行了检验验证。



主要内容:

- ◆ 基于DIMM方法的视宁度等晕角测量原理
- ◆ 自动视宁度监测仪的构成
- ◆ 兴隆观测站观测结果



一、基于DIMM方法的视宁度等晕角测量原理

1. 差分图像运动和 r_0 的关系^[2]

$$\sigma_d^2 = K\lambda^2 r_0^{-5/3} D^{-1/3}$$

$$\varepsilon_0 = 0.98\lambda / r_0 = 0.98(\sigma_d^2)^{3/5} (D/\lambda)^{1/5} K^{-3/5}$$

$$r_0 = \cos(z)^{3/5} r_{0z}$$

$$\varepsilon_{0z} = 0.98\lambda / r_{0z} = 0.98\lambda / r_0 * \cos(z)^{3/5} = \cos(z)^{3/5} \varepsilon_0$$

其中**K**依赖于：口径间距和口径直径的比值 **$x=r/D>2$** ；图像运动的方向，**l**为口径连线的方向，**t**为垂直于**l**的方向

$$K_l = 0.364(1 - 0.532x^{-1/3} - 0.024x^{-7/3})$$

$$K_t = 0.364(1 - 0.798x^{-1/3} + 0.018x^{-7/3})$$

$$\frac{K_l}{K_t} < 1$$



2. 闪耀率和等晕角的关系^{[4][5]}

$$\theta_0^{-5/3} = 114.7\lambda^{-2}(\cos\gamma)^{-8/3} \int_0^\infty C_N^2(h)h^{5/3}dh$$

$$\sigma_I^2 = 9.62\lambda^{-2} \int dh C_N^2(h)P(h)$$

$$\theta_0^{-5/3} = A\sigma_I^2(\cos z)^{-8/3}$$

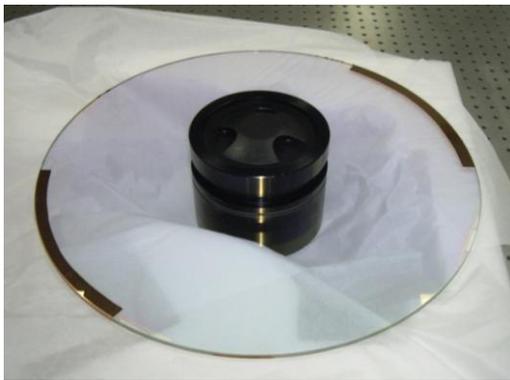
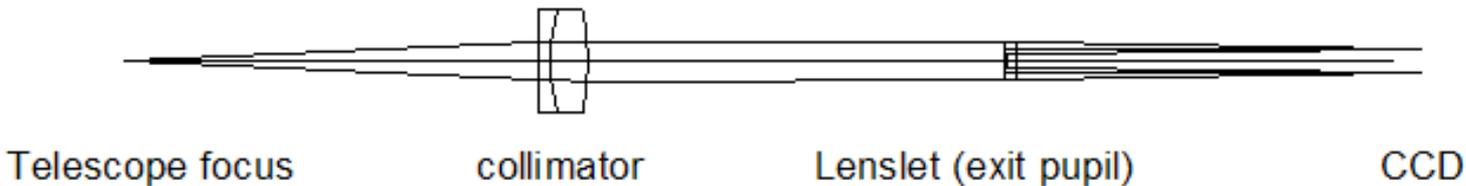
其中 $A = 0.1963$ ^[3], 观测在可见天区 ($\lambda \in [320, 630]nm$), 曝光时间 τ 和 $\tau/2$ 。有限曝光时间偏差通过闪烁指数线性外插到 0 得以校正。

$$\sigma^2(0ms) = 2\sigma^2(\tau/2) - \sigma^2(\tau)$$

二、自动视宁度监测仪的构成

1. 对购置的35cm口径的商用望远镜改造部分

(1) 小望远镜光学改造



望远镜入瞳直径: **356mm**
望远镜入瞳与焦距之比: **1/11**
中心遮挡: **114mm**
子孔径: **60mm/ 100mm**
像元分辨率: **0.78arcsec**
导电膜

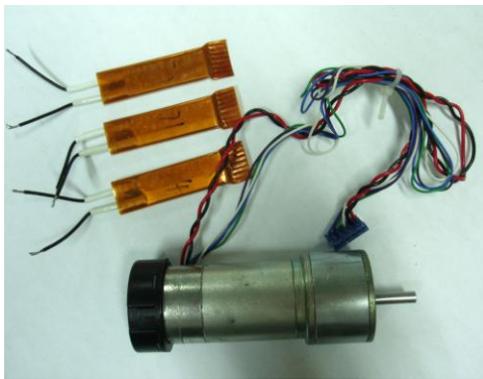
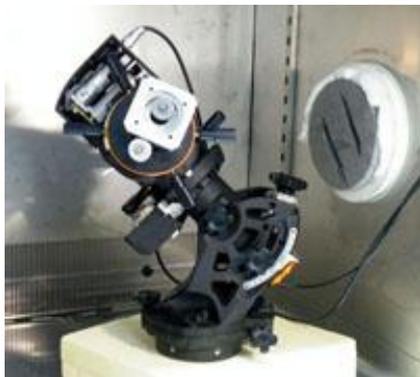
(2) 小望远镜结构改造

- 导星镜
- 主副镜防脱结构
- 自动调焦
- 后继光学系统结构
- **2.5支撑塔架**
- 隔振运输箱



(3) 小望远镜电控改造

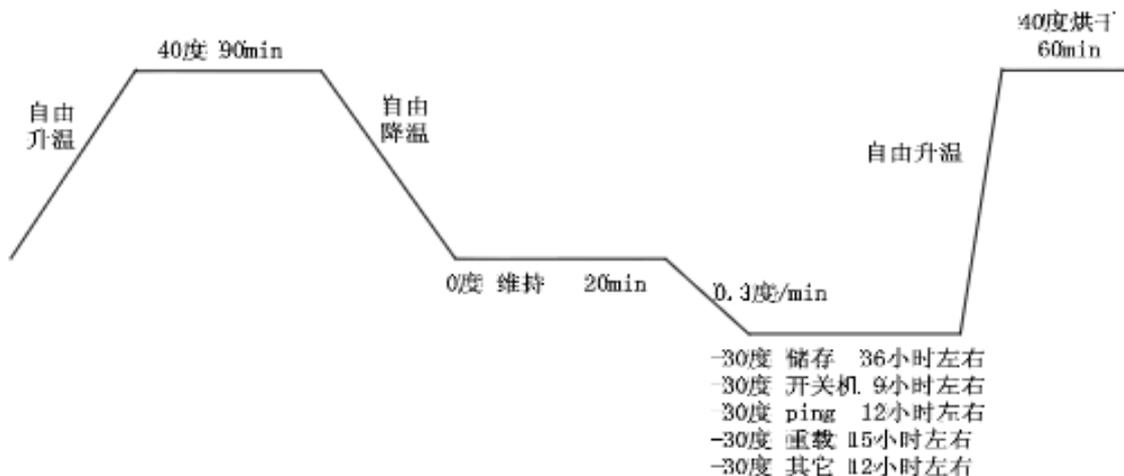
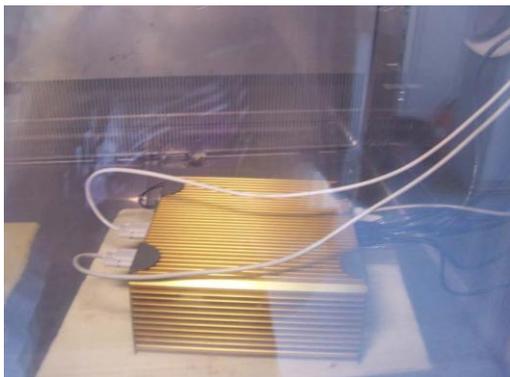
- 电机和编码器温控
- 控制盒电源置换
- 长线控制
- GPS
- 自动调焦
- 远程遥控



2. 低温实验

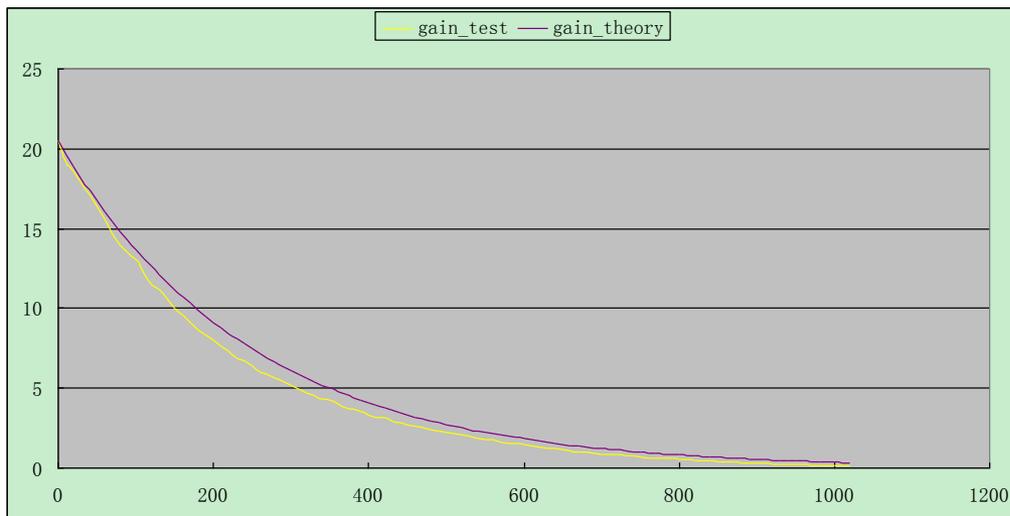
- (1) 赤道仪采用低温油脂润滑
- (2) 控制箱加热保温
- (3) 电机加热保温，温度高于-20度
- (4) CCD加热保温，温度高于-25度
- (5) 望远镜改正板镀导电膜，加热防止镜面结霜
- (6) 工控机放置在仪器舱内，温度高于-20度

DIMM 工控机的储存、开关机和重载



3.CCD(MVC610DAS-GE110)增益系数和噪声测试

(1) 在不同增益级别下，拟合各光照条件下平均光强和方差的曲线，取中间线性部分计算斜率，其倒数即为增益系数，得到增益 (e^- / ADU) 和增益级别 (0-1023) 的对应关系，并和理论增益曲线对比，如下图，两者符合的较好。

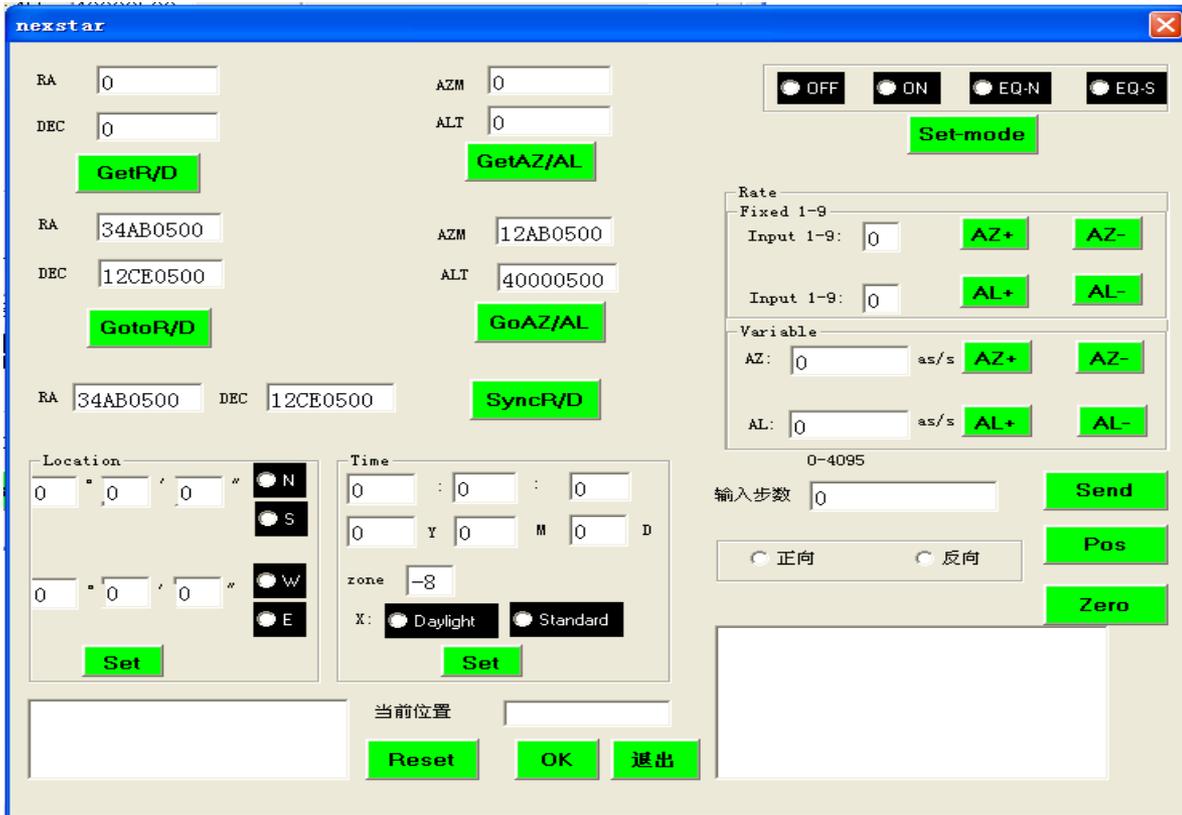


(2) 由光子转移曲线前端部分在y轴上的截距方差，得到 $rn1(\text{var})$ -gain level曲线；



4. 软件开发^{[6][7]}

DIMM软件作为整个检测仪系统的核心部件，需要具备以下功能：实时显示**CCD**相机采集图像，完成装调的可视化操作，实现视宁度和等晕角持续测量的任务，保存原始数据和视宁度等晕角计算结果到数据库中，保存原始图像，保存系统运行日志文件。望远镜的远程控制。



软件中图像处理部分包括星象质心算法的进一步研究，对有限曝光时间、信号相关噪声和CCD相关噪声进行校正，增加图像筛选和预处理功能，这些是提高测量精度的关键。分别介绍如下：

(1) 质心算法^[8]：对原始图像进行阈值分割，利用加圆形窗口的质心算法在原始图像上计算两个像斑的质心，其中 I_{ij} 为扣除像斑周围环形背景值后的光强值。

$$c_x = \frac{\sum_{window} x_{ij} I_{ij}}{\sum_{window} I_{ij}} \quad c_y = \frac{\sum_{window} y_{ij} I_{ij}}{\sum_{window} I_{ij}}$$

(2) 有限曝光时间校正^[9]：曝光时间不为零减弱了差分图像运动，而采用曝光时间为 τ 和 $\tau/2$ 交错曝光所测得的视宁度值分别是 ε_1 和 ε_2 ，用修饰指数函数外插长、短曝光视宁度获得零曝光视宁度。

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= 0.5(c_1 \varepsilon_1 + c_1^{7/3} \varepsilon_2) \\ c_1' &= (\varepsilon_1 / \varepsilon_2)^{0.75} \\ c_1^{new} &= (1 - g)c_1^{current} + gc_1' \end{aligned}$$

(3) 质心噪声^[8]: 光强度噪声引起质心误差。需校正的光强度噪声包括信号本身泊松噪声、**CCD**读出噪声 (**RON**)，两者引起的**x**和**y**方向质心方差为

$$\sigma_{cx}^2 = \frac{1}{I_{tot}^2} \sum_{window} (x_{i,j} - c_x)^2 (R^2 + I_{i,j} / G)$$

$$\sigma_{cy}^2 = \frac{1}{I_{tot}^2} \sum_{window} (y_{i,j} - c_y)^2 (R^2 + I_{i,j} / G)$$

$$\begin{cases} \sigma_{l-final}^2 = \sigma_l^2 - \sigma_{1x}^2 - \sigma_{2x}^2 \\ \sigma_{t-final}^2 = \sigma_t^2 - \sigma_{1y}^2 - \sigma_{2y}^2 \end{cases}$$

(4) 数据过滤: 对**1**到**2**分钟内**CCD**采集的找到像斑的图像进行分析, 为了提高计算精度, 需要选出符合特定过滤条件的累积图像计算视宁度, 这里的过滤条件包括像斑质心差在累积图像平均质心差的附近; 像斑光强总流量在累积图像平均像斑光强总流量的附近; 像斑的椭圆率符合要求; 像斑的斯特列尔比符合要求。

三、兴隆观测站观测结果

以上介绍了整个系统的硬件部分和软件开发，最后需要评价其实际工作性能，所以**2010年9月26日至9月29日**连续四天在国家天文台兴隆观测站，与国家天文台姚永强老师选址组提供的一台**DIMM**视宁度监测下面介绍此次实验结果。



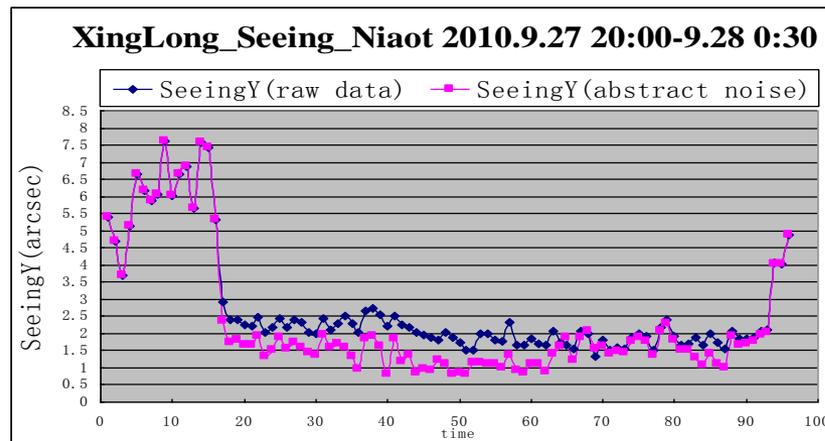
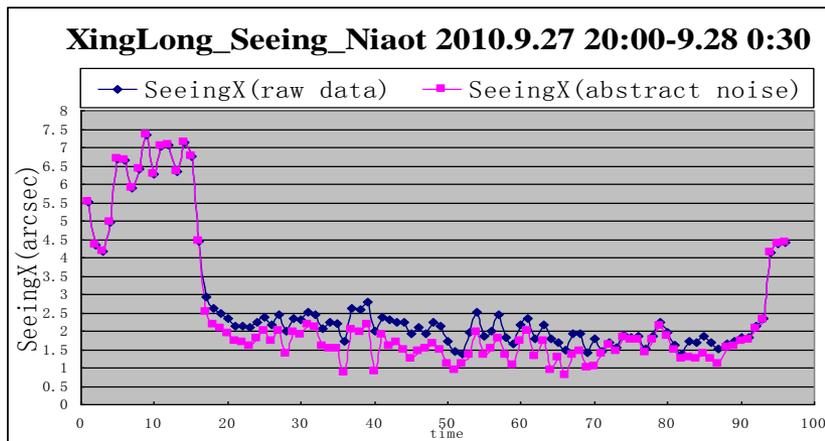


图5 9.27 20:00-9.28 00:30左图为X方向扣除质心噪声方差前后视宁度测量结果对比；右图为Y方向扣除质心噪声方差前后视宁度测量结果对比

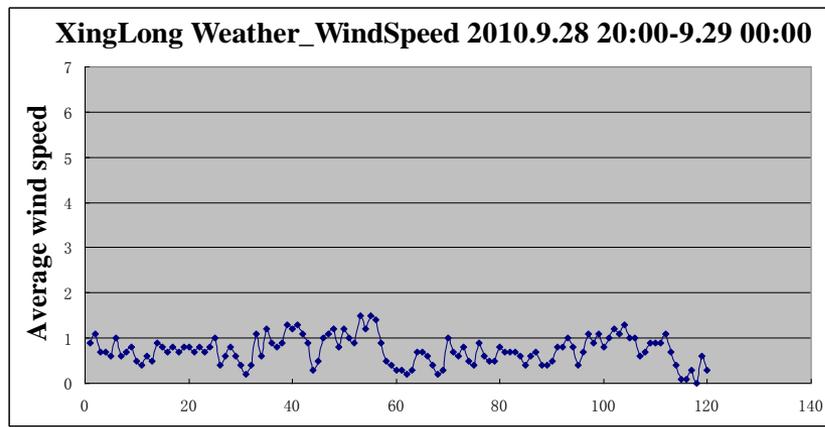
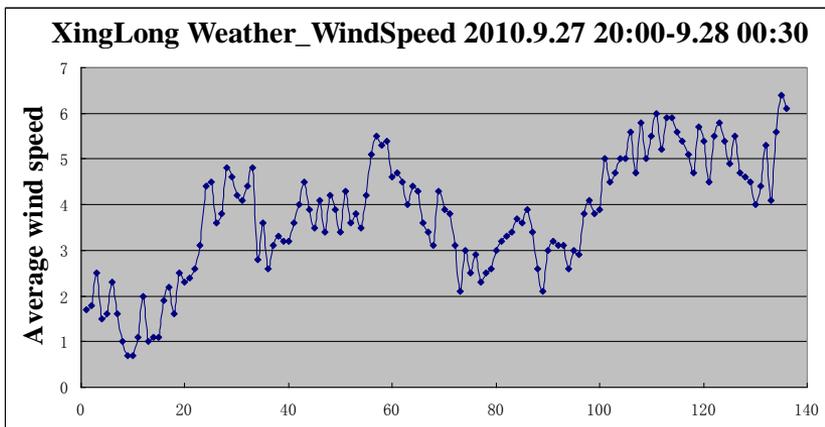


图6 左图为9.27 20:00-9.28 00:30平均风速；右图为9.28 20:00-9.29 00:00平均风速

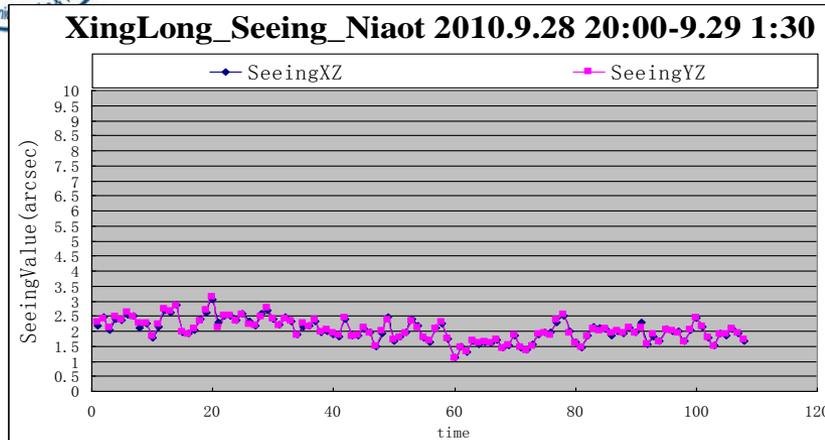
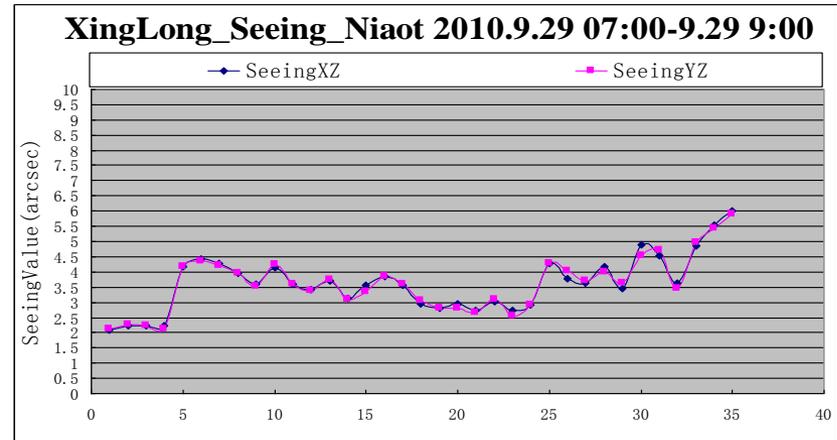


图7 (a) 9.28 晚测量的视宁度结果;



(b) 9.29 07:00-09:00测量的视宁度结果

Table1. 2010.9.26-2010.9.29兴隆观测站视宁度测算结果

日期	时间	次数	$\bar{\varepsilon}$	$\bar{\varepsilon}_X$	$\bar{\varepsilon}_Y$	ε_{XMax}	ε_{YMax}	ε_{XMin}	ε_{YMin}
26-27	00:00-03:00	47	3.555	3.494	3.617	5.003	5.141	2.361	2.465
27-28	20:00-00:30	114	1.959	1.967	1.950	2.929	2.934	1.281	1.302
28-29	20:00-01:30	108	2.033	2.035	2.030	3.069	3.141	1.140	1.102

通过上述测量结果，得到如下结论：

本次试验视宁度测试结果为经过数据过滤和天顶方向修正。**27、28**日夜间，基本采用（**4.5ms**和**2.75ms**）的交替曝光时间，没有扣除质心噪声方差时，**X**和**Y**方向的视宁度值在**1.5**到**2.5arcsec**之间，且基本相同。扣除质心噪声方差的影响后，视宁度值变小，如图**5**，**X**和**Y**方向的视宁度值在**1**到**2arcsec**之间。

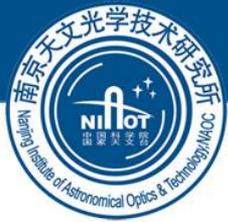




四、总结

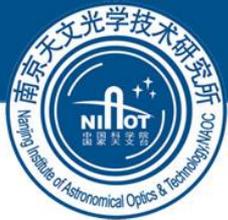
南极冰穹A已被广泛地预测为是地面最好的天文台址，但是目前还没有直接用于评价台址好坏的视宁度数据，为此我们研制了首台自动视宁度测量仪DIMM，关键部件进行了温控和低温测试，保证了可以在南极低温环境下正常工作，整个系统在国家天文台兴隆观测站进行了对比测试和软硬件验证，计划2011年初安装在冰穹A，并开始现场测量，这样我们将在国际上率先获得冰穹A的视宁度数据，对以后的南极选址工作和望远镜的研制大有裨益。

非常感谢国家天文台姚永强老师领导的选址组对我们的大力支持，感谢马江龙和尹佳在兴隆观测站同期的对比观测。感谢国家天文台施建荣老师为兴隆观测提供人力，设备和场地，感谢同期观测并提供实验观测期间气象资料的曹子皇博士。



参考文献

- [1] Xiangyan Yuan, Xiangqun Cui, Genrong Liu et al, “Chinese Small Telescope ARray (CSTAR) for Antarctic Dome A”, SPIE Proc. Vol.7012, 70124G(2008).
- [2] Jean Vernin, Casiana Munoz-tunon, “Measuring astronomical seeing: The DA/IAC DIMM”, Astronomy Society of the Pacific 107, 265-272(1995).
- [3] E. Aristidi, E. Fossat, A. Agabi, et al. “Dome C site testing: surface layer, free atmosphere seeing, and isoplanatic angle statistics”, A&A 499, 955–965 (2009).
- [4] Renzhong Zhou, [Adaptive Optics], National Defence Industry Publishers, Beijing, 23-24(1996).
- [5] Aziz Ziad, Rodolphe Conan, et al. “From the grating scale monitor to the generalized seeing monitor”, Optical Society of America 39, 20-30(2000).
- [6] A. Tokovinin, E. Bustos, H. Schwarz, [CTIO RoboDIMM v2.3 software description], 1-35(2002).
- [7] V. Kornilov, [Turbina-core (D) program Version 2.3-2.25], 1-14(2008).
- [8] A.Tokovinin,V.Kornilov, “Accurate seeing measurements with MASS and DIMM”, Mon. Not. R. Astron. Soc. 000, 1-13(2007).
- [9] E. Aristidi, A. Agabi, E. Fossat, M. Azouit et al. “Site testing in summer at Dome C, Antarctica”, A&A, 20, 1-9(2005).



谢谢!