

基于DIMM的多大气参数测量方法

2010年12月



Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation



主要内容

- 1、测量参数介绍
- 2、具体测量方法
- 3、实验结果



大气对光电设备的影响

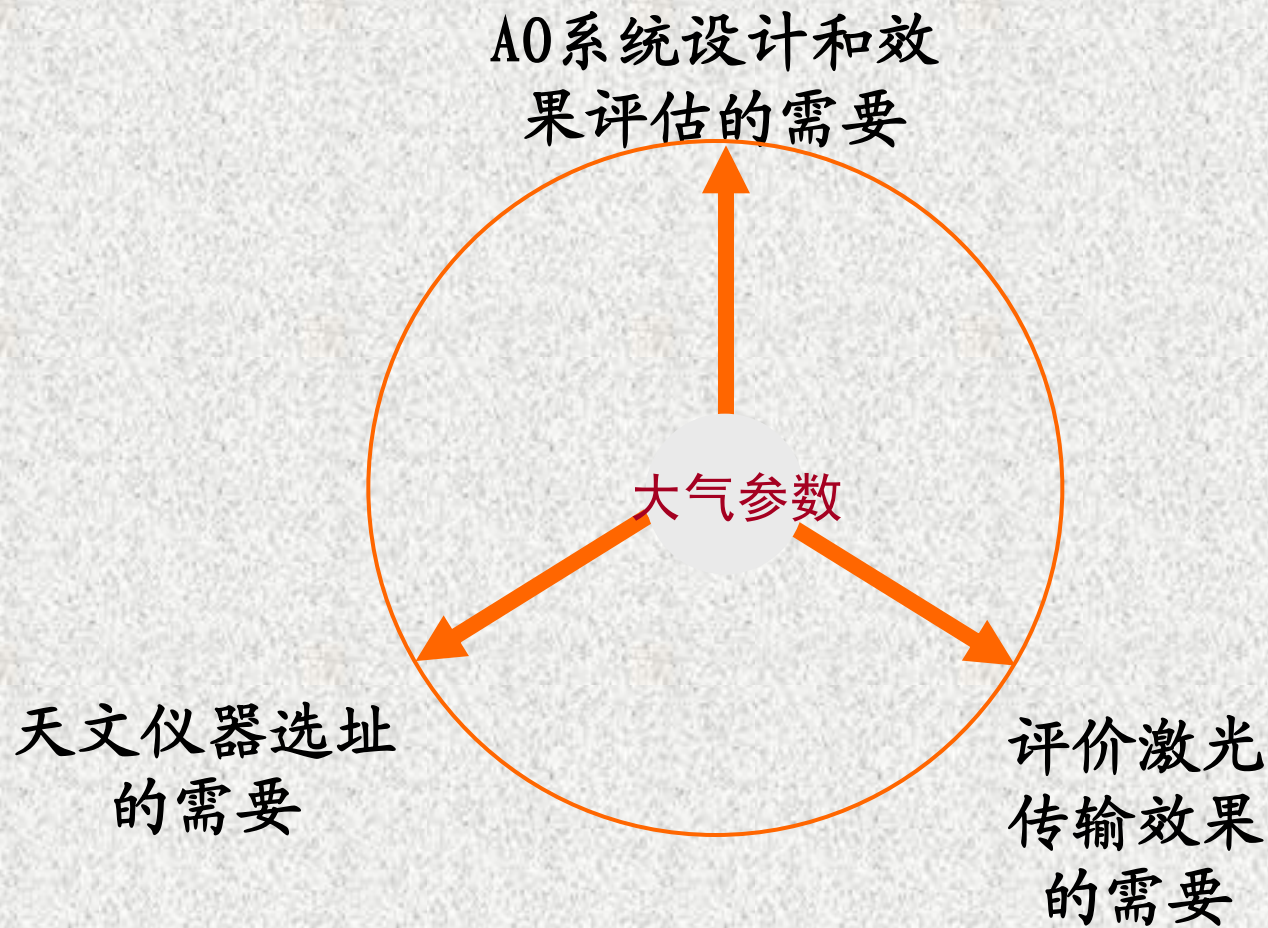
- ❖ 大气衰减降低目标的信号强度;
- ❖ 天空背景辐射降低目标对比度;
- ❖ 大气降低目标成像分辨率, 影响跟踪、定位精度和自适应光学校正效率;
- ❖ 强激光发射系统除受大气湍流外还受热晕的影响而分散能量。

大气光学湍流参数测量的重要性

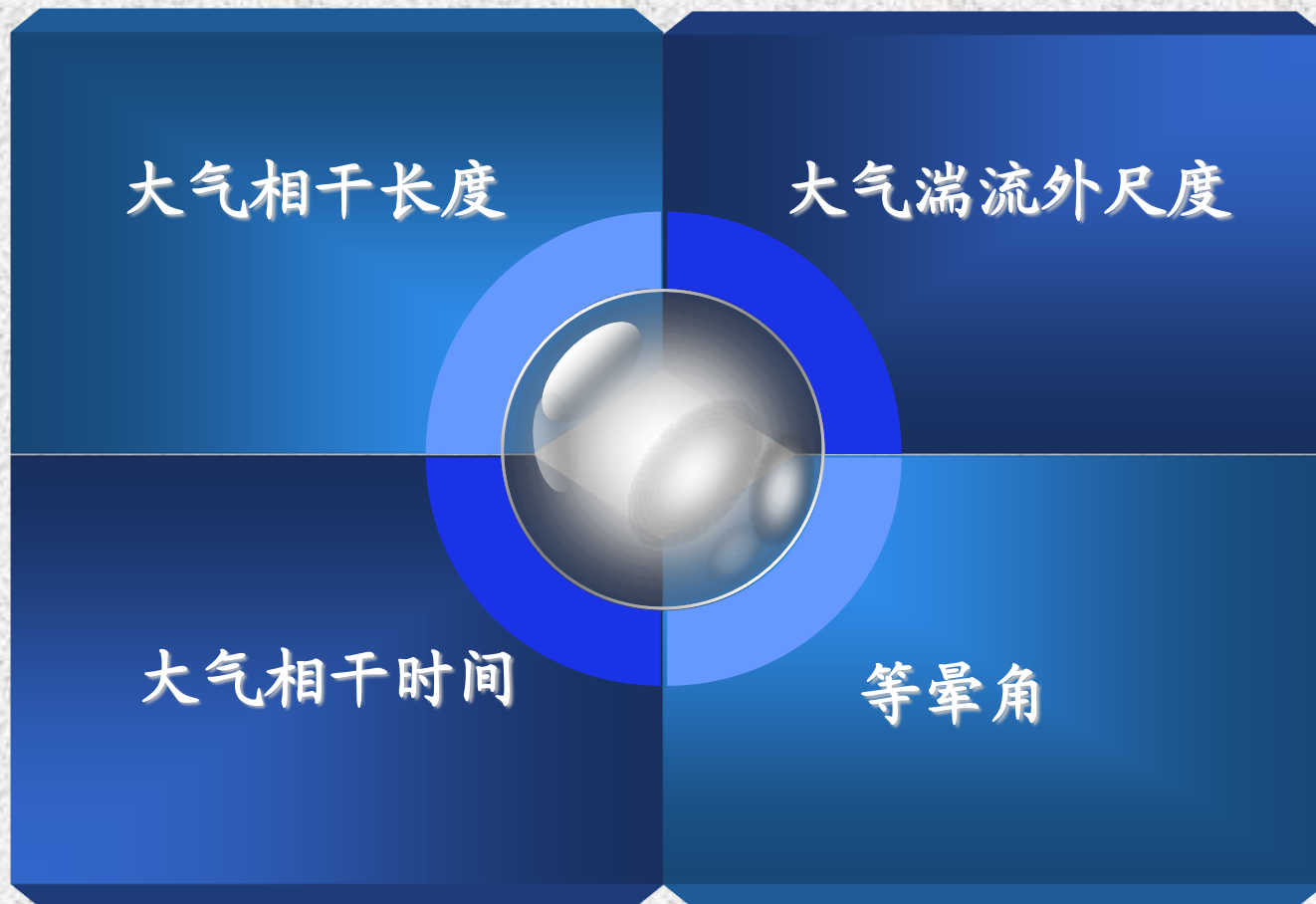
- ❖ 了解掌握大气光学特性的统计规律，为光电系统工作提供可靠的依据；
- ❖ 能够为光传输模拟程序提供输入参数；
强光传输中，能够模拟到靶处的光斑特征参数，如光斑形状、到靶功率密度等。



大气光学湍流参数测量的意义



关键大气光学湍流参数



光传输重要湍流参数

大气相干长度

$$r_0 = 0.185 \left[\lambda^2 / \int_0^z C_n^2(h) dh \right]^{3/5}$$
$$\rho_0 = 0.088 \left[\lambda^2 / \int_0^z C_n^2(h) dh \right]^{3/5}$$
$$r_0 = 2.1 \rho_0$$

大气相干长度是表示湍流的空间频谱的重要参数。空间相干长度是表征波结构函数的唯一参量，它在表征全程大气湍流强度和自适应光学相位校正技术中得到广泛应用。



大气外尺度



$$L_0^{-1/3} = \frac{\int_0^{\infty} dh L_0^{-1/3}(h) C_n^2(h)}{\int_0^{\infty} dh C_n^2(h)}$$

大尺度湍流对光波的相位起伏起主要作用，对大气湍流外尺度的准确测量十分重要。

有限的大气外尺度对大气湍流统计特征的测量有很大的影响。

大气相干时间



$$\tau_0 = 0.31r_0 / \bar{V}$$

$$\bar{V} = \left[\int_0^\infty C_n^2(h) v^{5/3} dh / \int_0^\infty C_n^2(h) dh \right]^{3/5}$$

风速决定着AO系统的频率响应特性。

大气湍流相干时间直接与Greenwood频率和Tyler频率相关，这两者又分别决定自适应光学系统变形镜和倾斜镜控制带宽要求。

等晕角

$$\theta_0^{-5/3} = 114.7 \lambda^{-2} \cos^{-8/3}(z) \int C_n^2(h) h^{5/3} dh$$

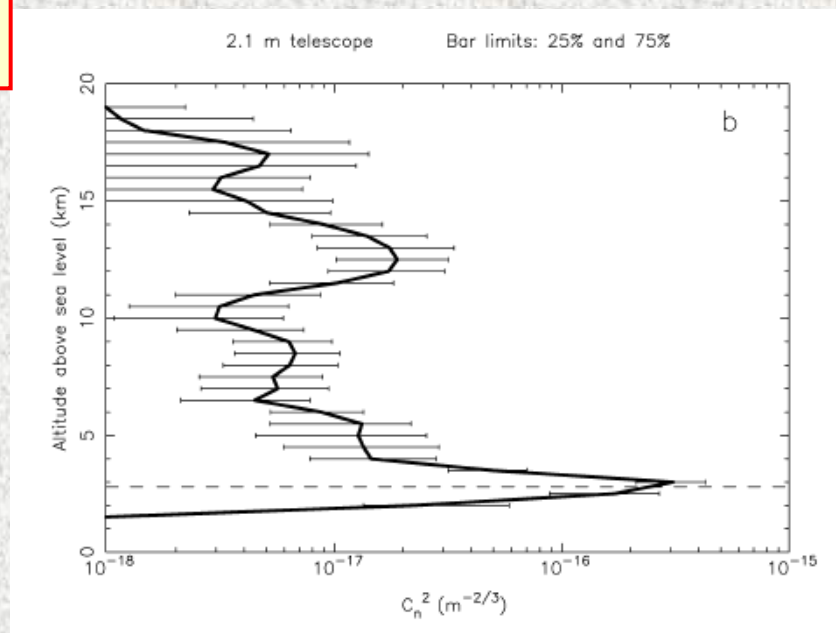
等晕角是表征通过大气湍流到达观测点的光波波前的角度相关性的特征参数。如果到达系统的不同方向的两束光之间的夹角超过等晕角，它们之间的相关性将迅速降低。

等晕角是决定自适应光学系统校正视场的一个主要参数。



四个参数的共同特点

四个测量参数均是与 C_n^2 廓线相关，而直接测量 C_n^2 廓线，尤其是指定路径上的 C_n^2 廓线较为困难。



目前测量方法现状

寻求新的测量方法

目前测量的特点

非光学方法

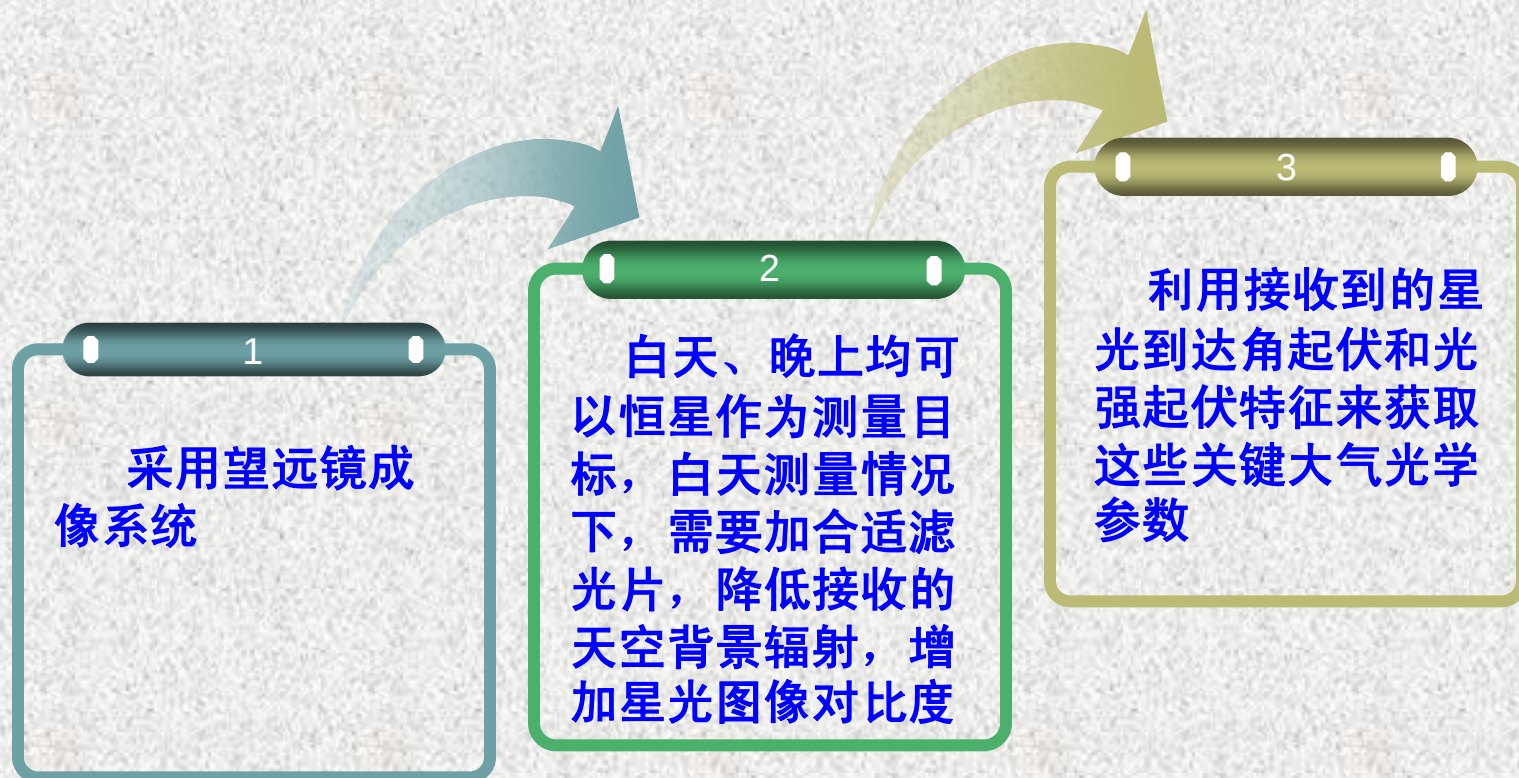
各测量功能单一

一些设备较为昂贵

使用不方便

测量方法

湍流大气光传播的相位起伏、光强起伏容易测量，而且易于构造简单，测量方便的仪器。



测量方法

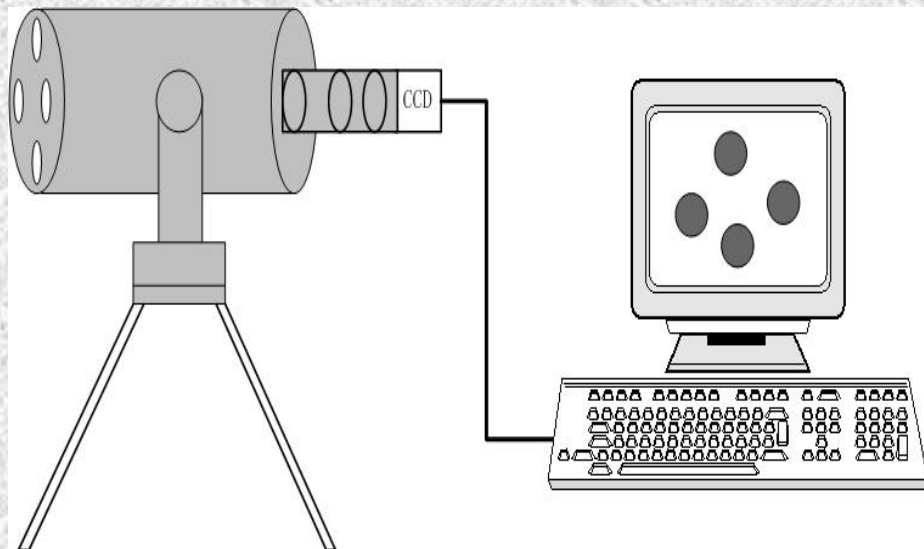
测量手段

1. 根据到达角起伏强度测量大气相干长度;
2. 根据到达角起伏的变化速度测量横向平均风速;
3. 根据到达角起伏协方差与湍流外尺度的关系进行外尺度的测量;
4. 根据恒星的光强的起伏方差, 测量等晕角。

测量设备

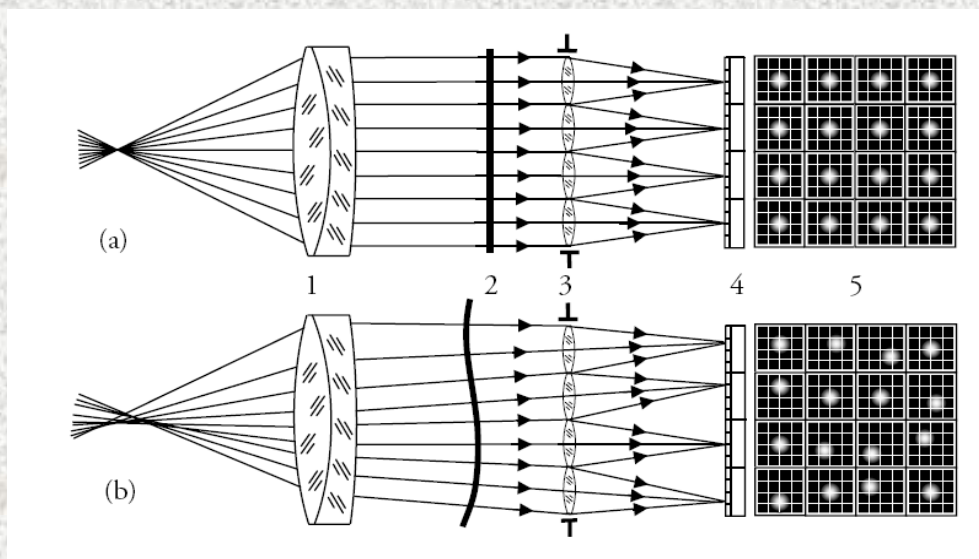
设备主要包括:

- 1、采用Meade天文望远镜，利用其自动跟星功能；
- 2、光瞳板采用四孔设计，后续光学系统内加光楔，让目标像在CCD上成四像；
- 3、高帧频逐行扫描CCD；
- 4、白天测量上，光学系统加装蓝色滤光片，减少天空背景辐射，增加图像对比度。



测量原理

光波的到达角起伏



$$\alpha = \Delta L \times p / F$$

光波波前在子孔径范围的平均倾斜

光波到达角起伏方差

图像运动方差

$$\sigma_{cx}^2 = \lambda^2 \iint f_x^2 W_{\Phi}(f) \left[\frac{2J_1(\pi Df)}{\pi Df} \right]^2 d^2 f$$

$$W_{\Phi}(f) = 0.0229 r_0^{-5/3} (f^2 + f_0^2)^{-11/6}$$

$$\sigma_c^2(D, L_0) = 0.16977 \lambda^2 r_0^{-5/3} D^{-1/3} \left\{ 1 - 1.52496 (Df_0)^{1/3} + 5.57342 (Df_0)^2 - 6.45031 (Df_0)^{7/3} \right\}$$

光波到达角协方差

径向到达角协方差

$$B_{\alpha}(x, y) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} D_{\varphi}(x, y)$$

$$D_{\varphi}(r) = 4\pi \int_0^{+\infty} f W_{\varphi}(f) [1 - J_0(2\pi r f)] \left[\frac{2J_1(\pi D f)}{\pi D f} \right]^2 df$$

$$B_{\alpha}(x) = \lambda^2 r_0^{-5/3} x^{-1/3} \left(-0.25894 (x f_0)^{1/3} + 4.58925 (x f_0)^2 \right. \\ \left. - 6.57171 (x f_0)^{7/3} + 0.09687 \right)$$

大气相干长度的测量

差分到达角方差

$$\sigma_{diff}^2(D, L_0, d) = 2 \left[\sigma_c^2(D, L_0) - B_\alpha(d) \right]$$

$$\sigma_{diff\parallel}^2(d) = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} (d)^{-1/3} \left[0.16998 \left(\frac{d}{D} \right)^{1/3} - 0.09685 - 0.00673 \left(\frac{d}{D} \right)^{-2} \right]$$

$$\sigma_{diff\perp}^2(d) = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} (d)^{-1/3} \left[0.16998 \left(\frac{d}{D} \right)^{1/3} - 0.14531 + 0.00505 \left(\frac{d}{D} \right)^{-2} \right]$$

一组基线可以测量到两个方向的数值

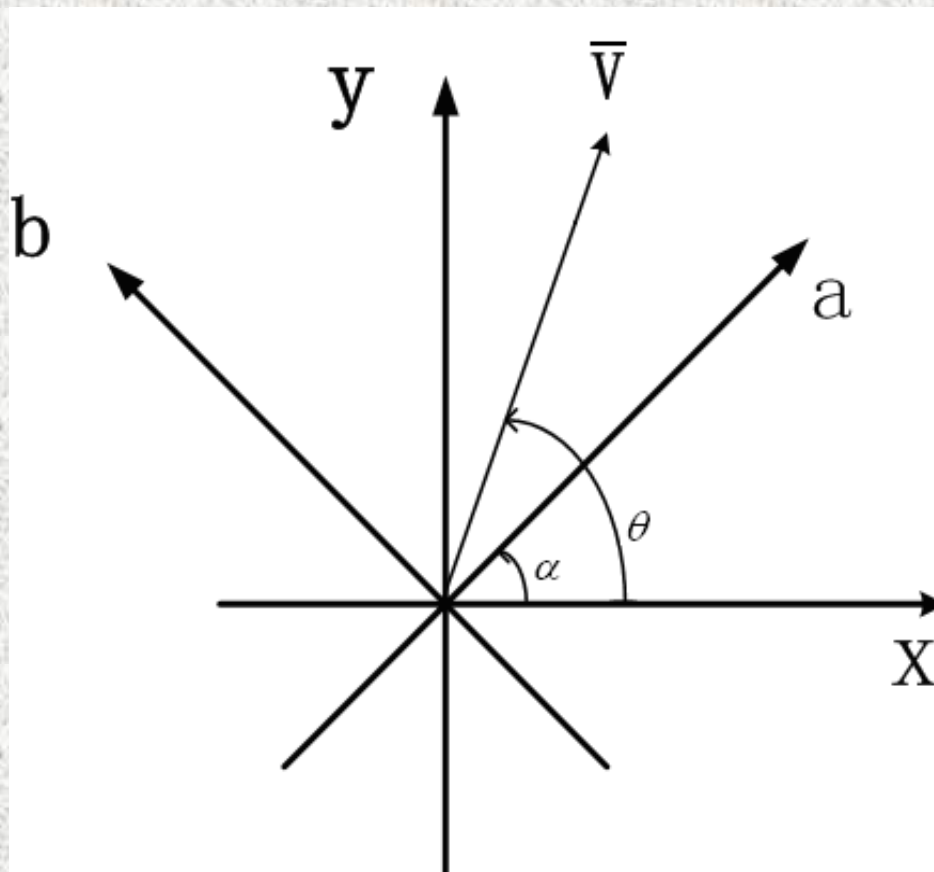
到达角协方差用于外尺度度测量

$$R = B_{\alpha}(x) / \sigma_{diff}^2$$
$$= \frac{0.09685 + 0.00673 \left(\frac{d}{D} \right)^{-2} - 0.25894 \left(\frac{d}{L_0} \right)^{1/3}}{2 \left(0.16998 \left(\frac{d}{D} \right)^{1/3} - 0.09685 - 0.00673 \left(\frac{d}{D} \right)^{-2} \right)}$$

到达角协方差比上差分到达角方差，可以消除Fried参数，忽略外尺度高阶项。



光路横向等效平均风速



光路横向截面

光路横向等效平均风速测量方法

光波到达角起伏速度方差

$$\sigma_{\partial\alpha/\partial t}^2 = 0.1295\lambda^2 r_0^{-5/3} D^{-7/3} \left[\left(\cos^2((\theta - \alpha)) + 1 \right) \overline{v^2} + 2\overline{\Delta v^2} \right]$$

$$D_{\partial\alpha/\partial t}(d, 0) = 2 \left(B_{\partial\alpha/\partial t}(0, 0) - B_{\partial\alpha/\partial t}(d, 0) \right)$$

$$D_{\partial\alpha/\partial t}(\alpha, \theta) = 0.259\lambda^2 r_0^{-5/3} D^{-7/3} \left[\left(2\cos^2(\theta - \alpha) + 1 \right) \overline{v^2} + 2\overline{\Delta v^2} \right]$$

在当前的基线配置下，到达角起伏速度协方差相对于到达角起伏速度方差值很小，在计算中可以忽略，因此



光路等效横向平均风速测量方法

$$\alpha = 0^\circ, \alpha = 90^\circ, \alpha = 45^\circ, \alpha = 135^\circ$$

$$D_{\partial\alpha/\partial t}(0^\circ, \theta) - D_{\partial\alpha/\partial t}(90^\circ, \theta) = 0.259\lambda^2 r_0^{-5/3} D^{-7/3} 2\bar{v}^2 \cos(2\theta)$$

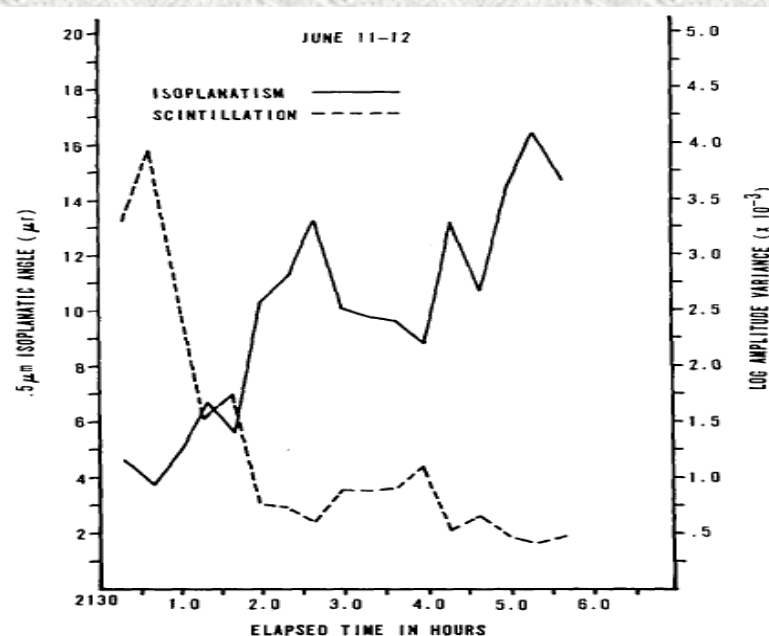
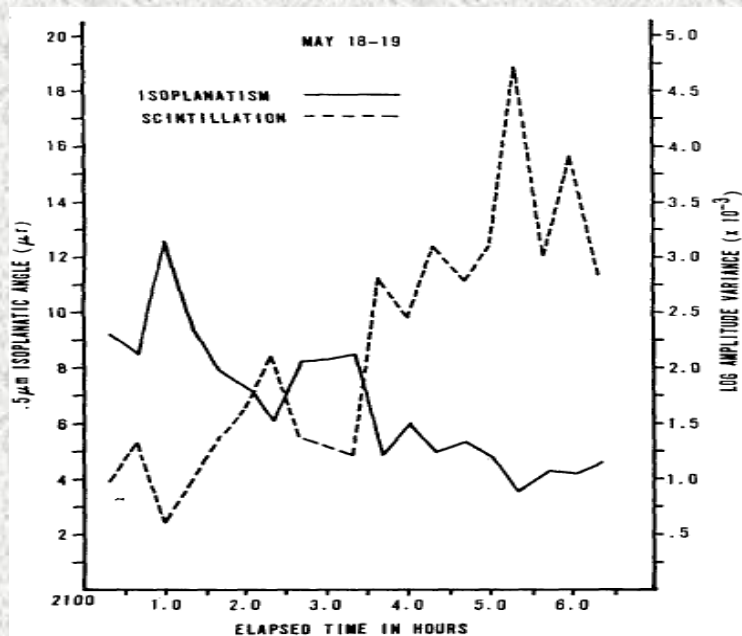
$$D_{\partial\alpha/\partial t}(45^\circ, \theta) - D_{\partial\alpha/\partial t}(135^\circ, \theta) = 0.259\lambda^2 r_0^{-5/3} D^{-7/3} 2\bar{v}^2 \sin(2\theta)$$

$$\operatorname{tg}(2\theta) = \frac{D_{\partial\alpha/\partial t}(45^\circ, \theta) - D_{\partial\alpha/\partial t}(135^\circ, \theta)}{D_{\partial\alpha/\partial t}(0^\circ, \theta) - D_{\partial\alpha/\partial t}(90^\circ, \theta)}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\left(D_{\partial\alpha/\partial t}(0^\circ, \theta) - D_{\partial\alpha/\partial t}(90^\circ, \theta) \right) / \left(0.518\lambda^2 r_0^{-5/3} D^{-7/3} \cos(2\theta) \right)}$$

$$\bar{v}_c = \bar{v} \cos(\theta)$$

等晕角



$$\theta_0^{-5/3} = 114.7 \lambda^{-2} \cos^{-8/3}(z) \int C_n^2(h) h^{5/3} dh$$

$$\beta_I^2(D) = 9.62 \lambda^{-2} \int_0^L C_n^2(h) W(h) dh$$

对于直径为D的圆形接收孔径

$$W(h) = \int_0^\infty f^{-8/3} \sin^2(\pi \lambda h f^2) \left[\frac{2J_1(\pi D f)}{\pi D f} \right]^2 df$$

等晕角测量

$$W(h) = \int_0^{\infty} f^{-8/3} \sin^2(\pi \lambda h f^2) \left[\frac{2J_1(\pi D f)}{\pi D f} \right]^2 df$$

选择合适的接收口径，经过拟合和数值约束条件后得到D为110.3或者108.1的时候比较合适。等晕角和光强起伏方差之间的关系为

$$\theta_0 = A \left[\log \left(1 + \frac{\sigma_s^2}{S} \right) \right]^{-3/5}$$

对大量先验数据进行拟合，得到 $A=0.9676 \times 10^{-6} \text{rad}$ 。

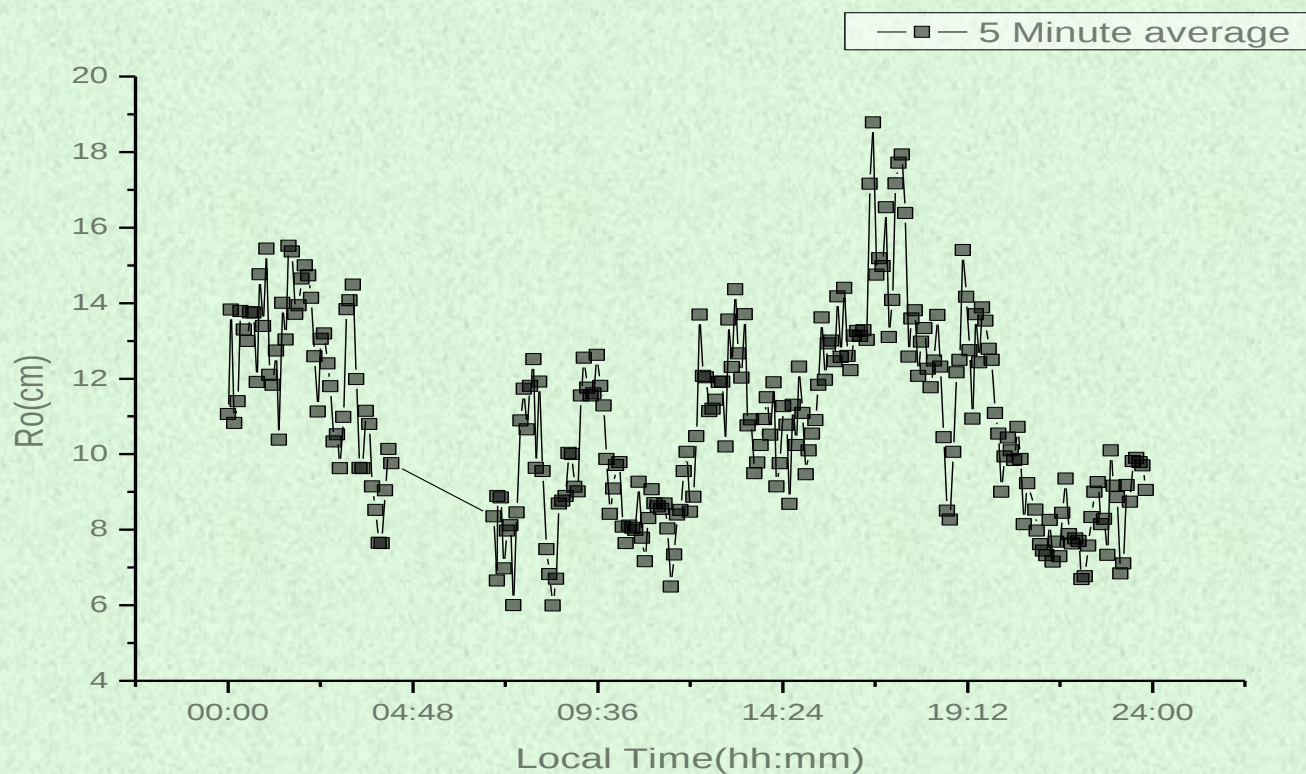
先前，进行等晕角测量的时候，直接将用于相干长度测量的恒星图像进行分光，探测器为光电倍增管，数据采集卡进行数据获取。

下一步可以考虑采用高帧频、高灵敏度**CCD**、高量化区间采集卡，直接进行**CCD**图像测量，从而可以一次计算过程，同步得到四个关键参数。



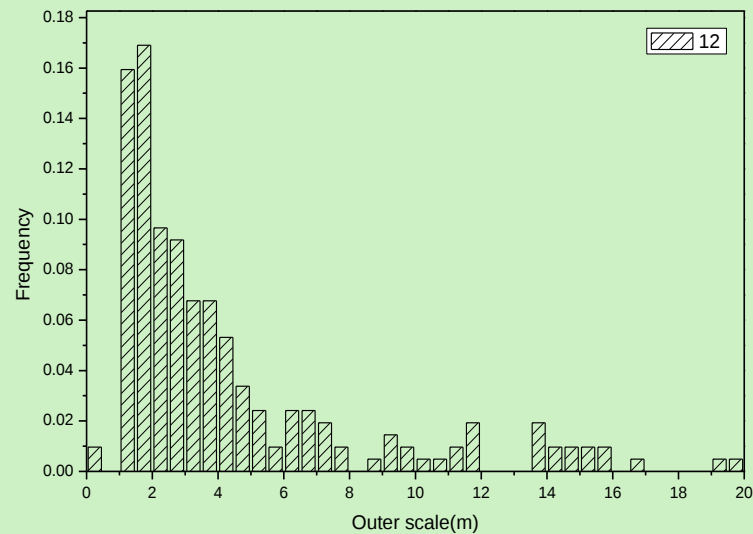
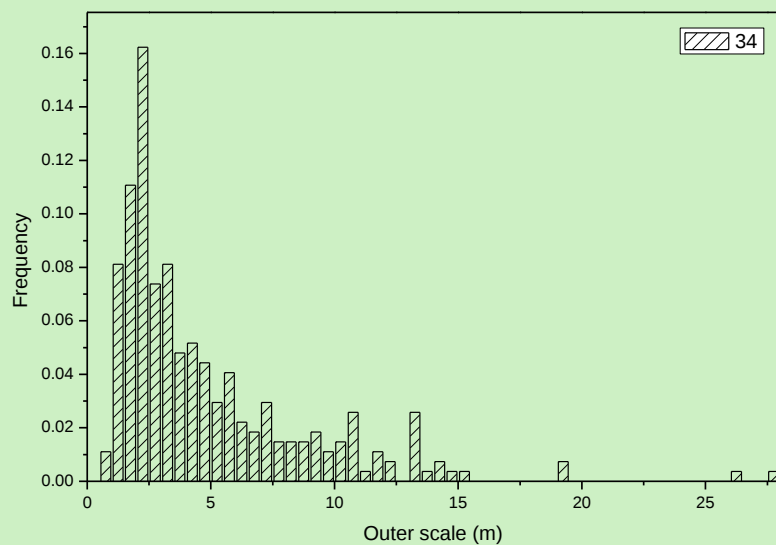
测量结果

整层大气相干长度



测量结果

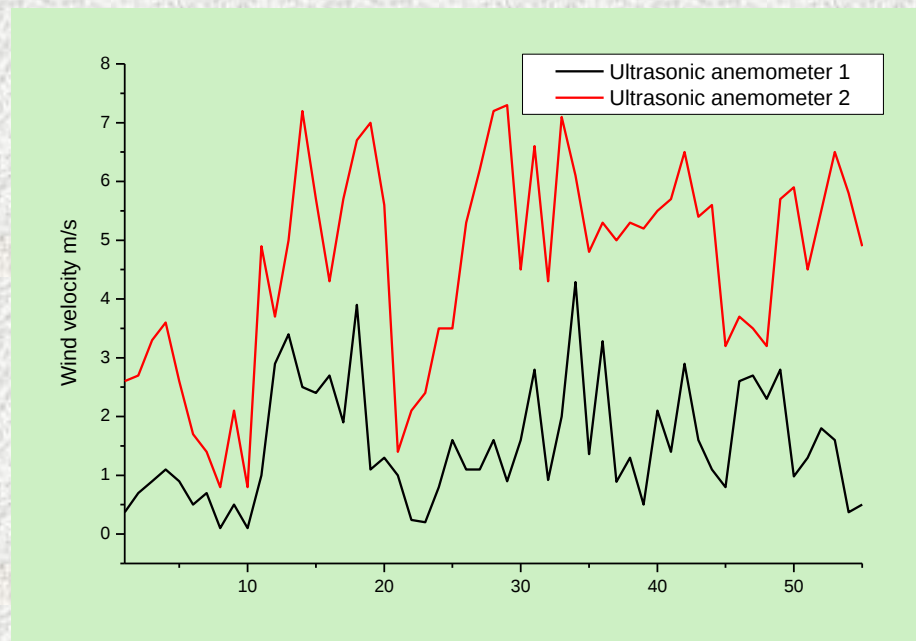
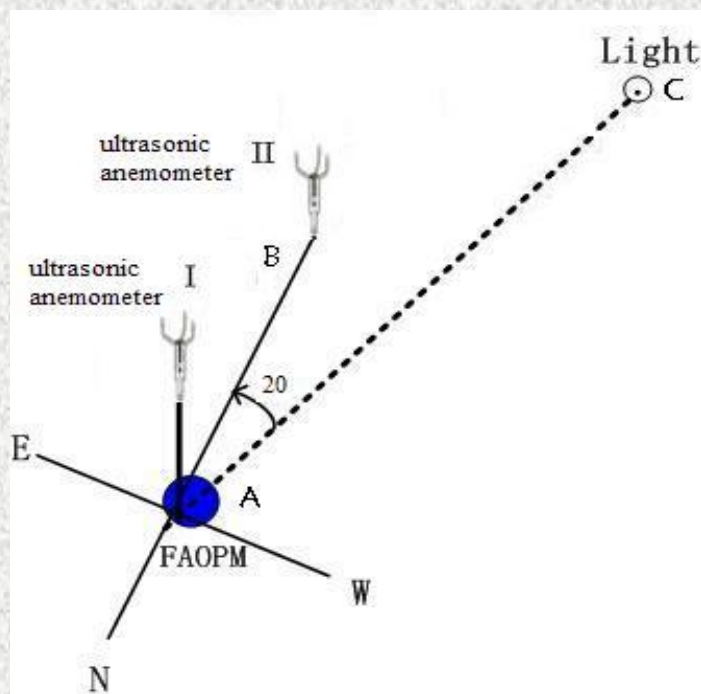
大气外尺度



水平方向测量，水平方向和垂直方向的外尺度

测量结果

横向平均风速

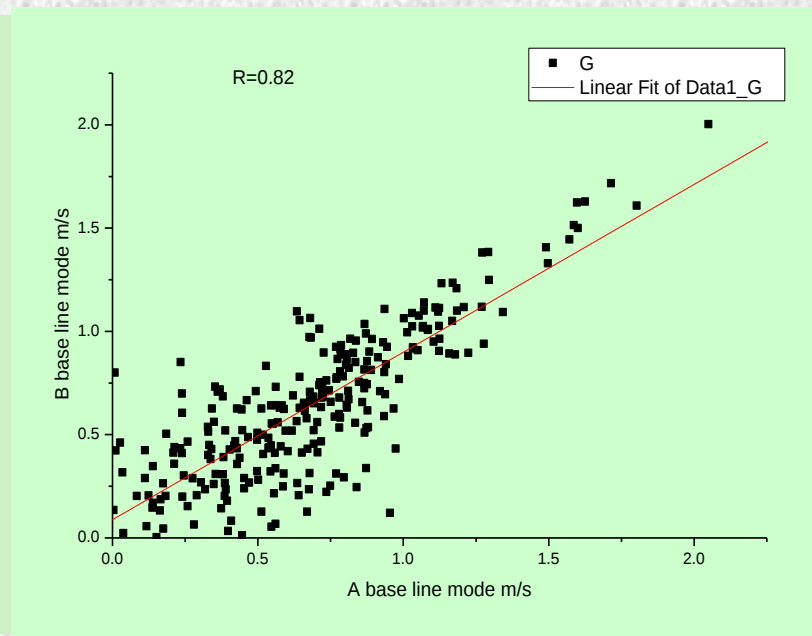
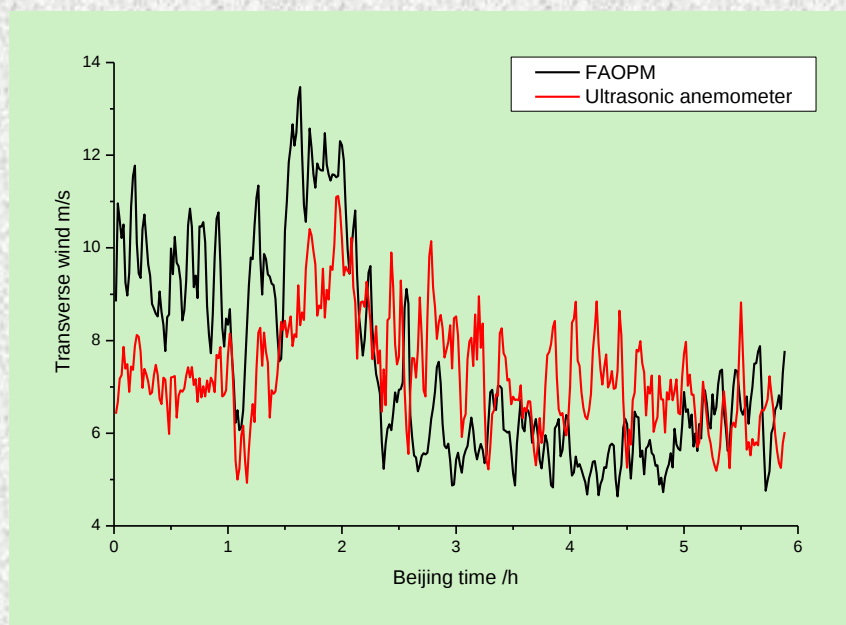


沿岸上某点和距海面500米处某点的横向风速对比

水平方向测量验证

测量结果

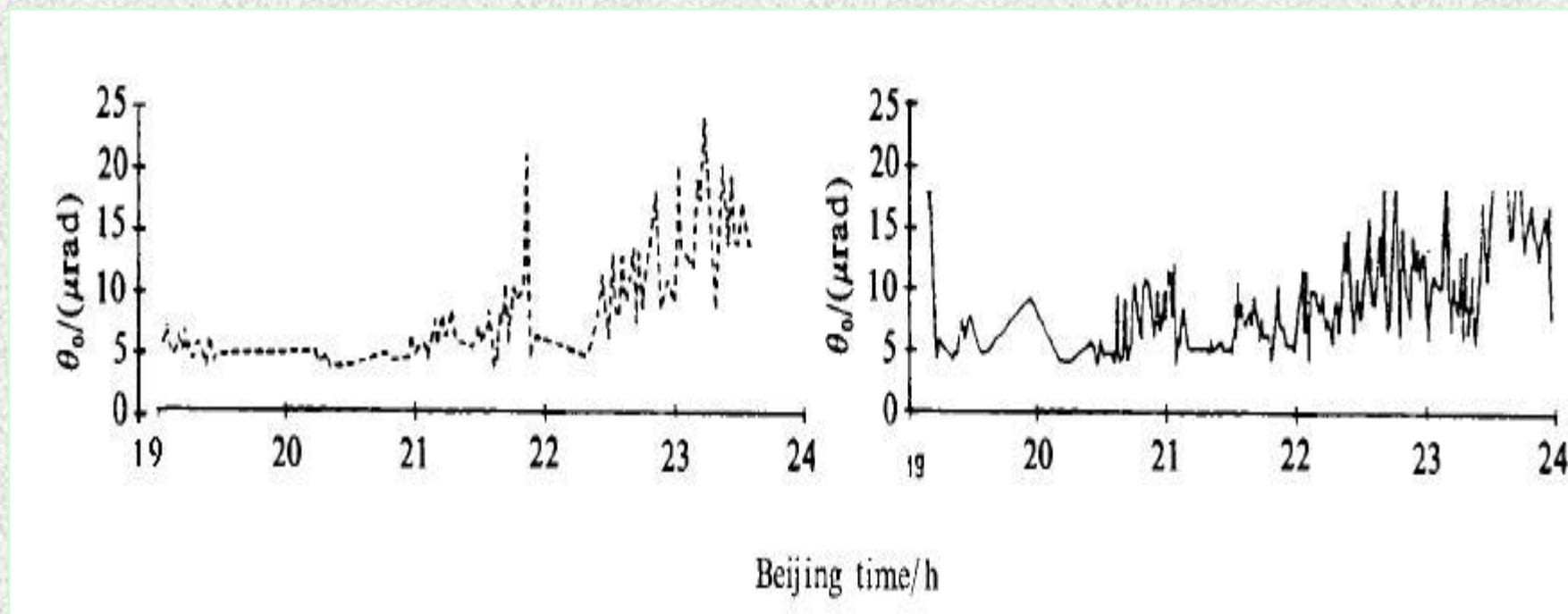
横向平均风速



两种测量技术的对比结果

测量结果

等晕角



总结

借助于光波的到达角和闪烁方法,尝试了在同一测量时间、同一光路上实现大气相干长度、大气外尺度、横向平均风速的测量、等晕角的测量。

搭建系统,结构简单,易于工程上实现。



请专家指正！

谢谢！！！！