

感热通量修正



康宝智信测量技术（北京）有限公司

李彦磊, 2021-08-18

主要内容

一. 为什么使用超声温度

二. 超声温度的计算过程

1. 风速分解
2. 超声温度定义
3. 侧风订正
4. 阴影效应订正

三. 感热通量修正



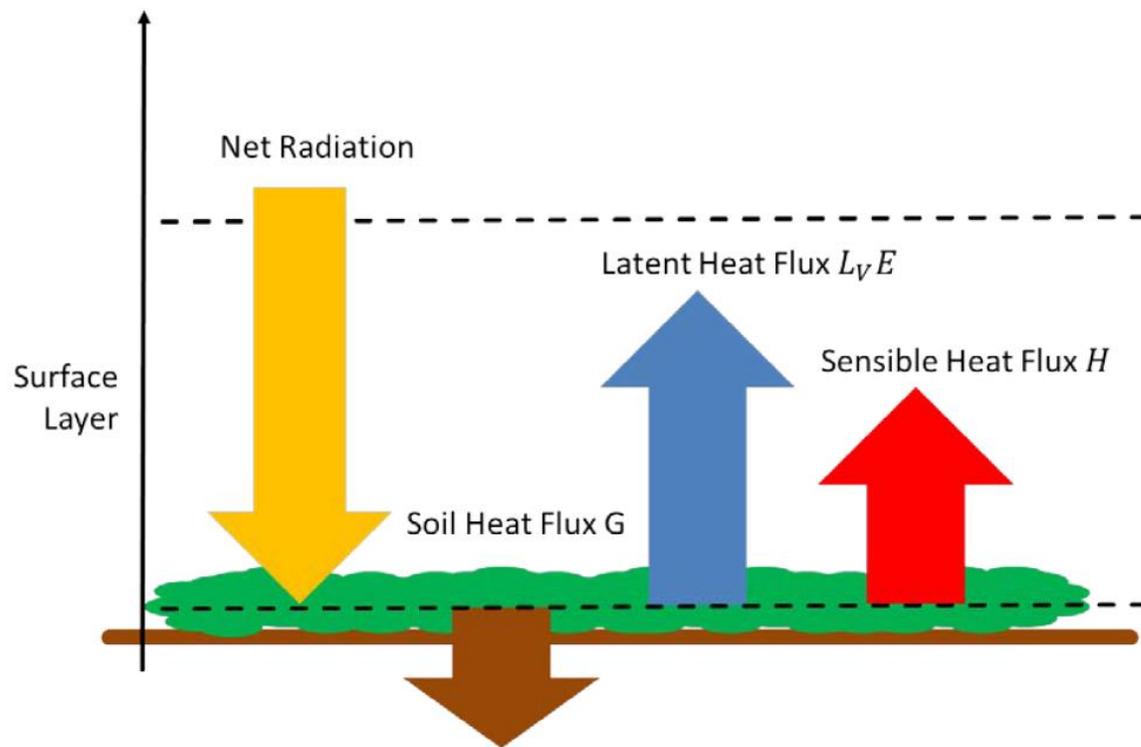
为什么使用超声温度

感热通量：单位时间内，在垂直方向上通过单位面积的热量，也称为显热通量，单位是 $J/m^2 \cdot s$ 或 W/m^2 。感热通量是一个**矢量**，有大小和方向之分。

梯度法：
$$H = \rho C_p K \frac{\partial T}{\partial z}$$

涡动相关法：
$$H = \overline{\rho_d C_p w' T'}$$

波文比能量平衡法：
$$H = \frac{R_n - G}{1 + \frac{1}{\beta}}$$



为什么使用超声温度

涡动相关法: $H = \overline{\rho_d C_p w' T'}$

涡动相关方法需要高频同步响应

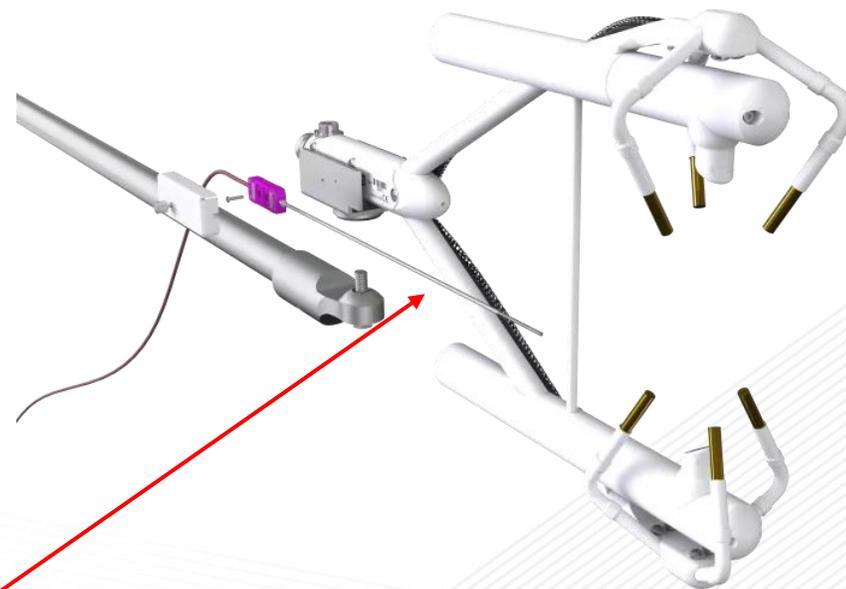
坚固耐用，保证数据的连续性



快速温度



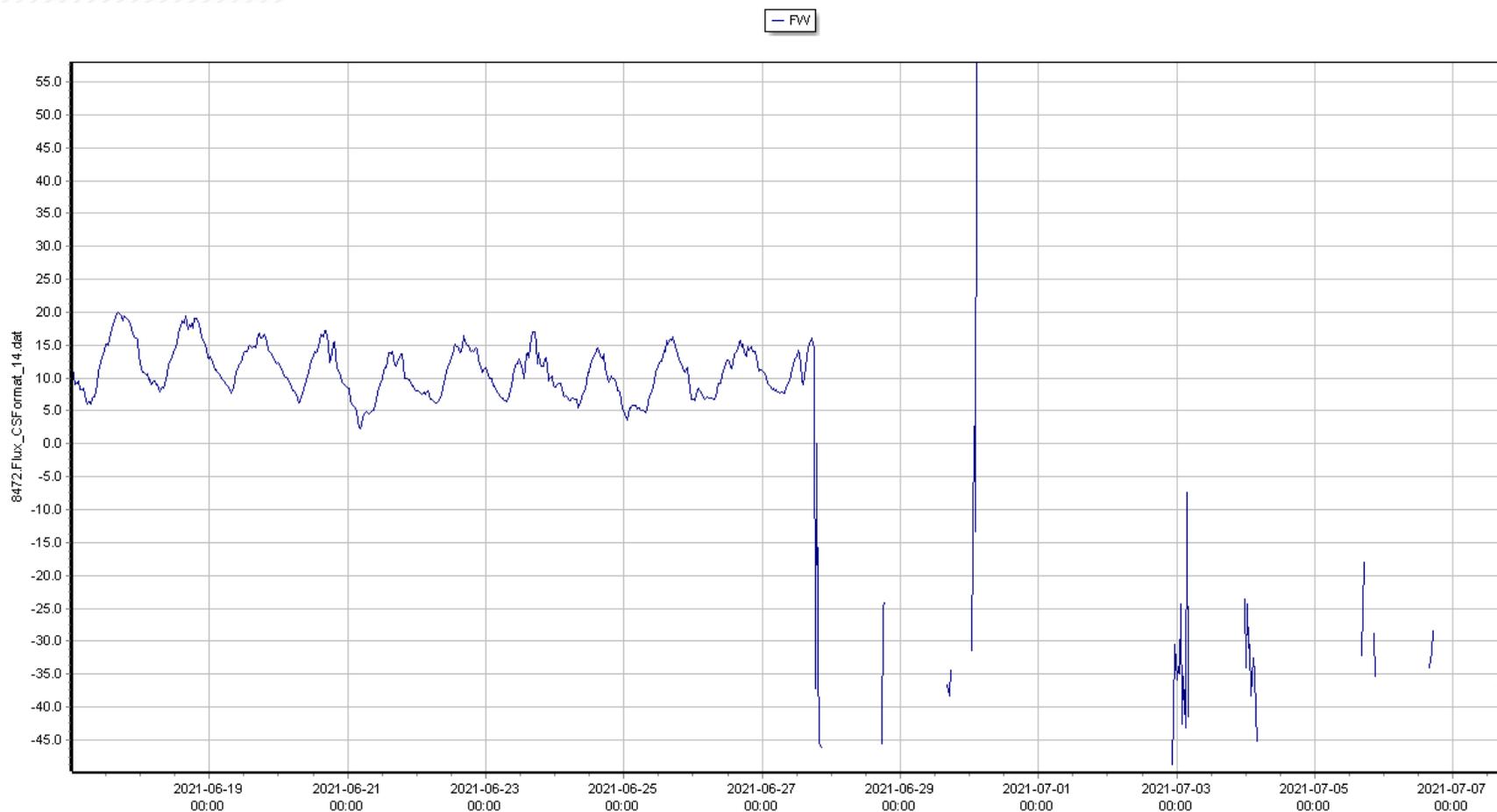
慢速温度



热电偶在严酷环境使用过程中相对容易损坏



为什么使用超声温度



g_strgth	Min	FW	FW_SIGMA	sun_az
		10.52	0.52	80.12
		11.42	0.84	83.34
		12.03	0.67	86.72
		13.00	0.91	90.41
		13.31	0.86	94.69
		14.15	1.10	100.04
		13.62	0.58	107.57
		12.13	1.39	120.12
		9.68	0.89	145.63
		8.91	0.28	190.86
		11.64	0.81	228.23
		13.34	0.82	246.45
		14.48	0.94	256.18
		15.16	0.93	262.53
		15.56	0.79	267.31
		16.08	0.99	271.28
		14.66	4.37	274.81
		-37.12	13.76	278.10
		0.04	21.08	281.28
		-31.19	18.47	284.45
		-45.37	5.16	287.68
		-45.93	3.38	291.03
		-46.26	3.13	294.57
		NAN	NAN	298.36
		NAN	NAN	302.45
		NAN	NAN	306.92
		NAN	NAN	311.85
		NAN	NAN	317.30
		NAN	NAN	323.35
		NAN	NAN	330.01
		NAN	NAN	337.30
		NAN	NAN	345.15
		NAN	NAN	353.41
		NAN	NAN	102.67
		NAN	NAN	10.27
		NAN	NAN	18.37
		NAN	NAN	25.99
		NAN	NAN	33.01
		NAN	NAN	33.40

热电偶在工作后的40天左右损坏



为什么使用超声温度



主要内容

一. 为什么使用超声温度

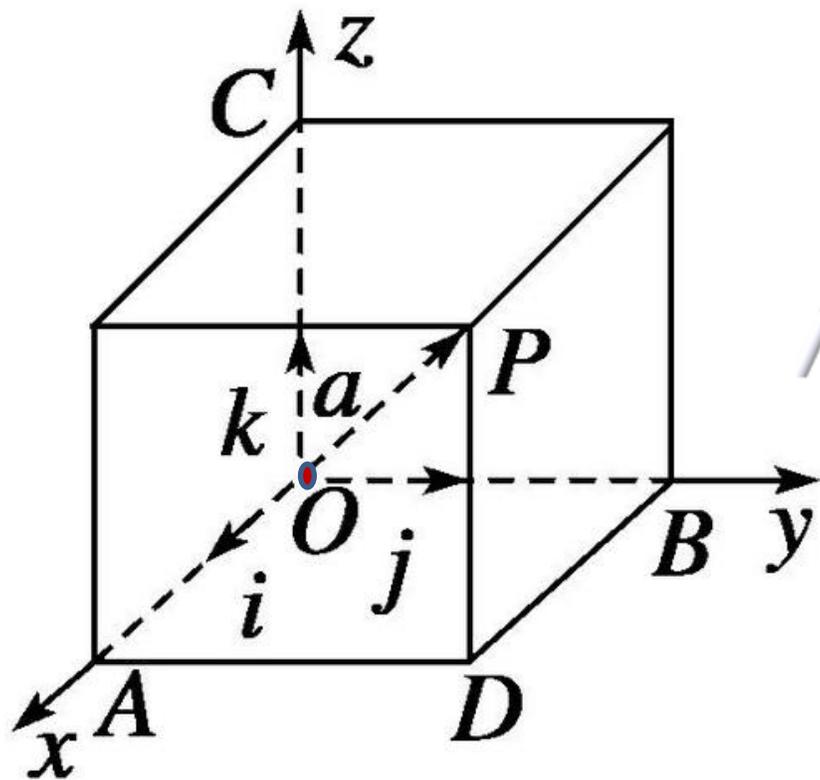
二. 超声温度的计算过程

1. 风速分解
2. 超声温度定义
3. 侧风订正
4. 阴影效应订正

三. 感热通量修正



向量分解



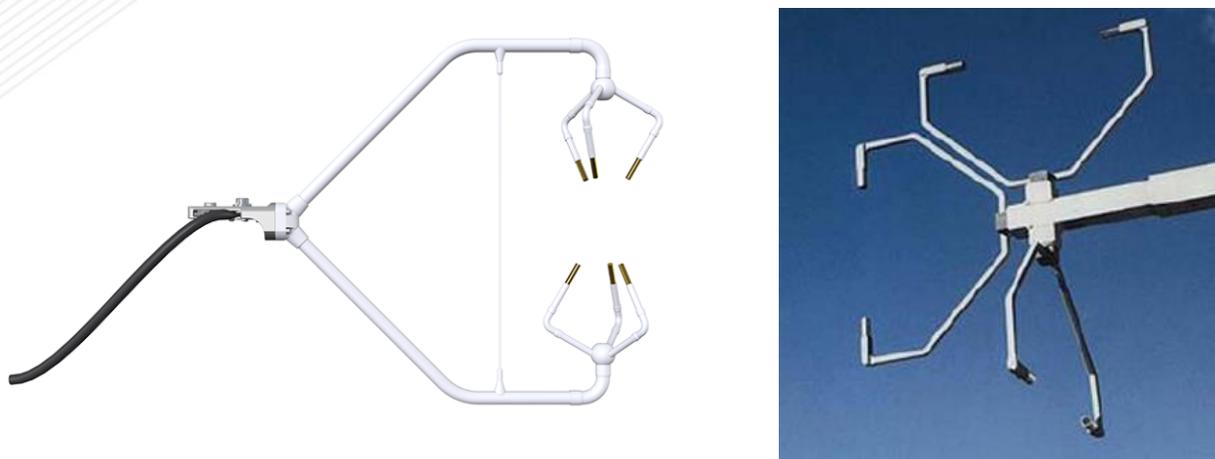
$$\overrightarrow{OP} = (a\vec{i} + b\vec{j}) + c\vec{k}$$

可以把O和P两点理解为三维超声风速仪的一对信号收发器，OP为信号传输路径

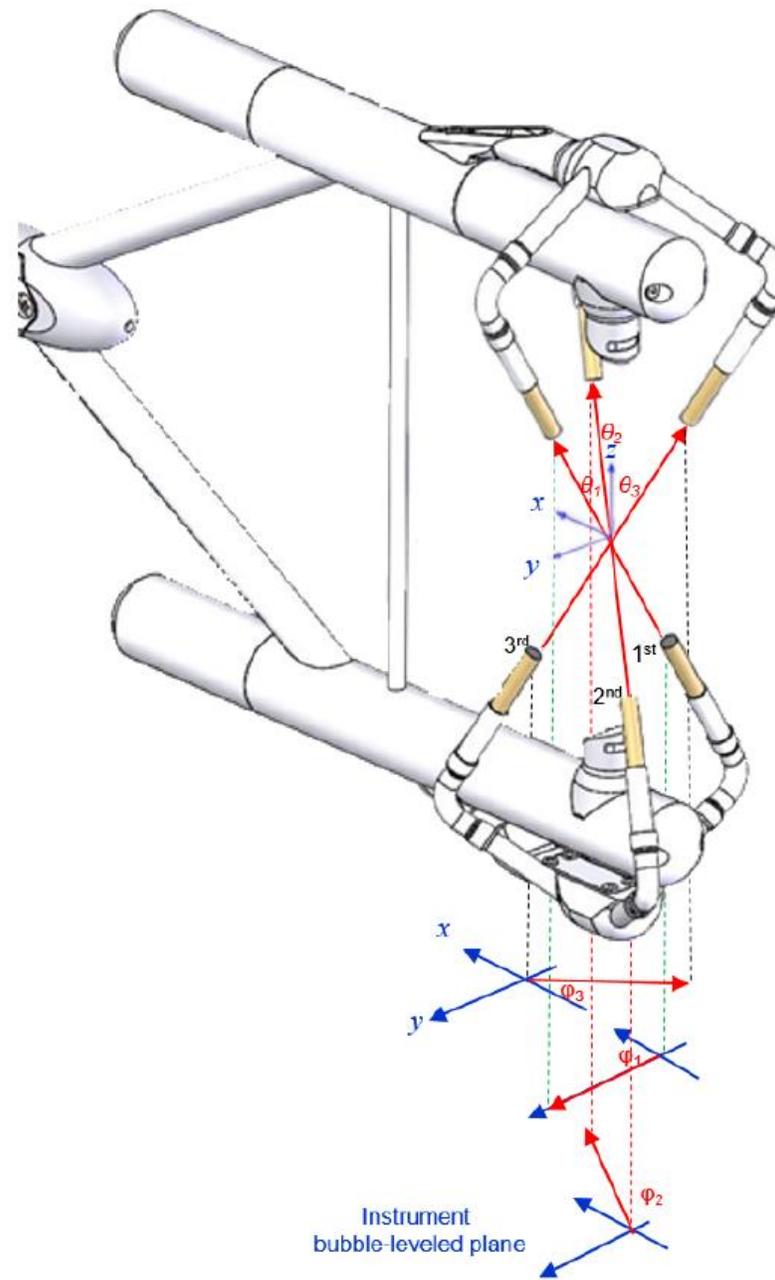


风速分解与合成

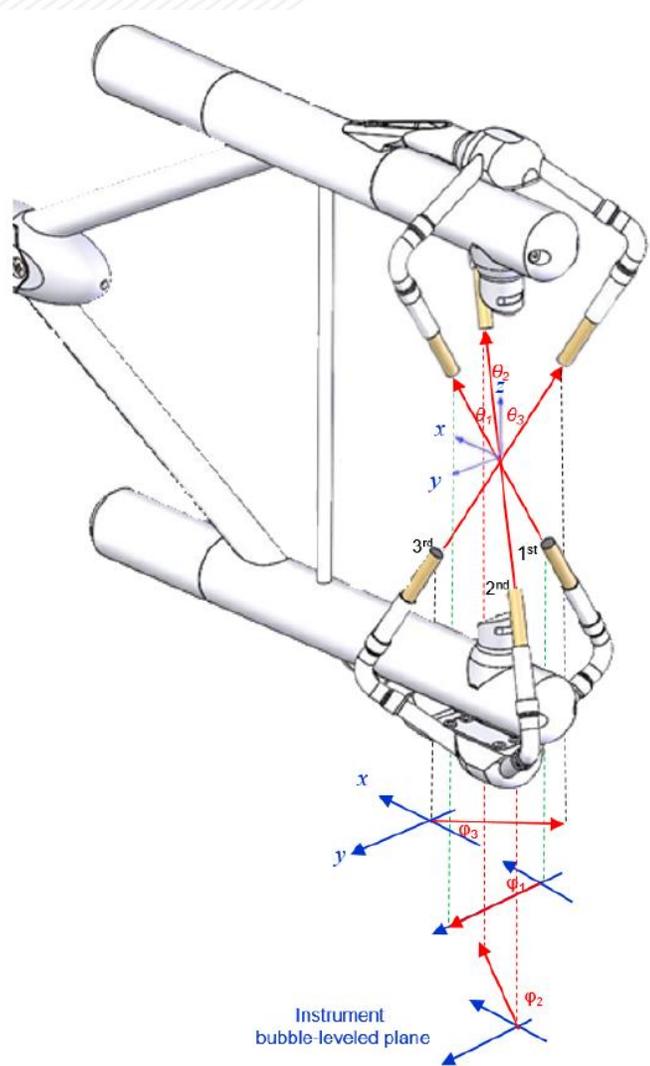
1, 风速 U 在超声坐标系分解为 U_x , U_y , U_z



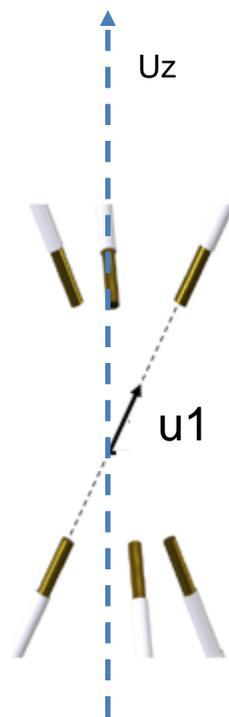
2, 超声路径上测量的风速 U_1 , U_2 , U_3 , 也可以分解到超声坐标系的3个坐标轴上, 可用 U_x , U_y , U_z 表示



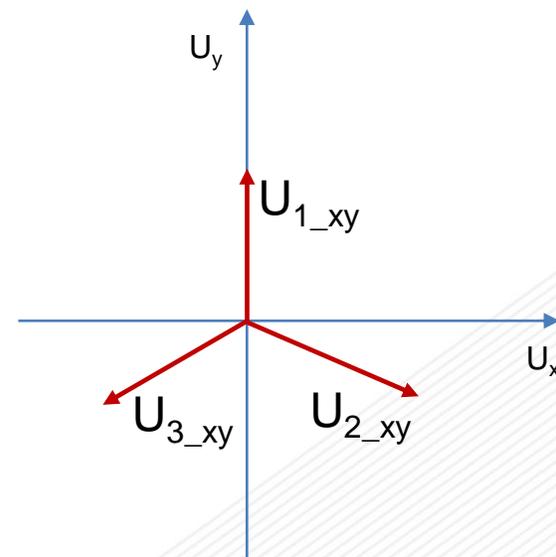
风速分解与合成



u_1 , u_2 , u_3 分别为三对信号传输路径测量得到的风速大小，它们与 U_z 的夹角都是 30°



U_{1_xy} , U_{2_xy} , U_{3_xy} 在超声坐标系的x-y平面中分向量，与 U_x 轴的夹角分别是 90° , 330° , 210°



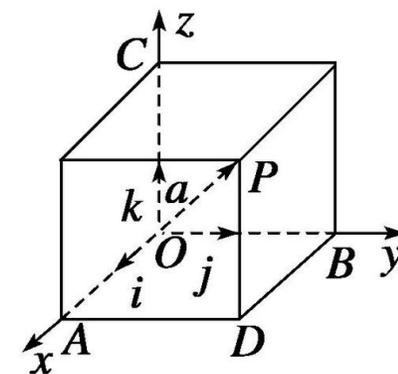
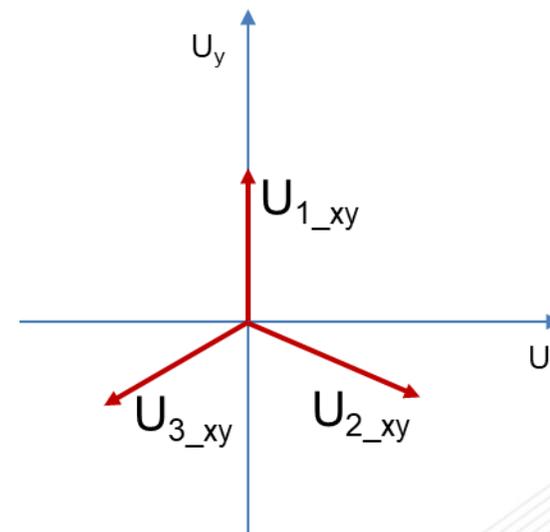
风速分解与合成

$$\begin{aligned}
 u_1 &= (u_x \cos\varphi_1 + u_y \sin\varphi_1) \sin\theta_1 + u_z \cos\theta_1 \\
 u_2 &= (u_x \cos\varphi_2 + u_y \sin\varphi_2) \sin\theta_2 + u_z \cos\theta_2 \\
 u_3 &= (u_x \cos\varphi_3 + u_y \sin\varphi_3) \sin\theta_3 + u_z \cos\theta_3
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_1 \cos\varphi_1 & \sin\theta_1 \sin\varphi_1 & \cos\theta_1 \\ \sin\theta_2 \cos\varphi_2 & \sin\theta_2 \sin\varphi_2 & \cos\theta_2 \\ \sin\theta_3 \cos\varphi_3 & \sin\theta_3 \sin\varphi_3 & \cos\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad A^{-1} A \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$$

$$\varphi_1 = 90^\circ \quad \theta_1 = 30^\circ$$



超声温度的定义

$$c^2 = \gamma \frac{P}{\rho}$$

defined by Barrett and Suomi, 1949

$$T = \frac{c^2}{\gamma R}$$

$$P = \rho RT$$

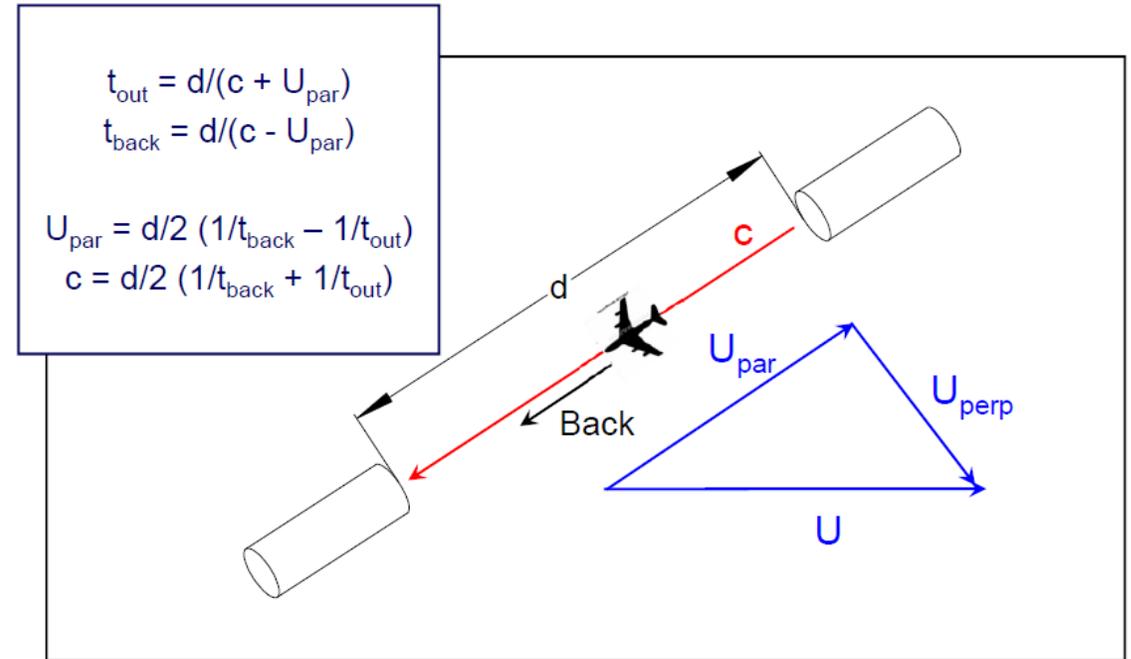
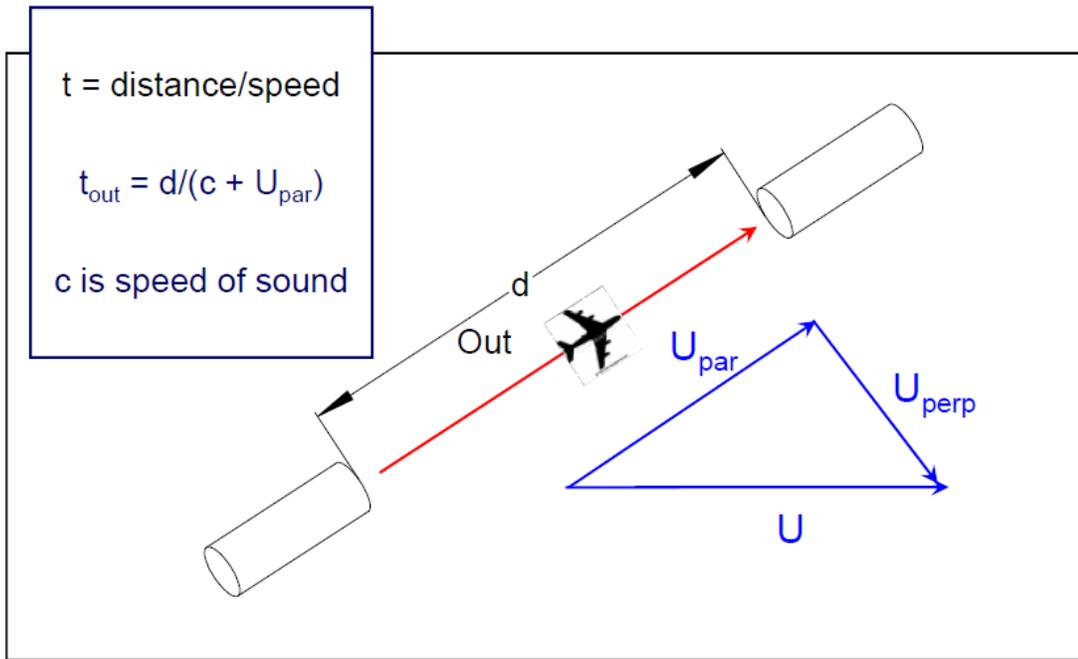
在没有测量水汽含量的传感器存在的条件下，湿空气的比热比 γ 和比气体常数 R 无法计算，因此我们定义超声温度为：

$$T_s = \frac{c^2}{\gamma_d R_d}$$

($\gamma_d = \frac{C_{pd}}{C_{vd}}$, R_d 为干空气的比气体常数)



风速与超声速度



$$u_i = \frac{d_i}{2} \left[\frac{1}{t_{bi}} - \frac{1}{t_{oi}} \right]$$

$$c_i = \frac{d_i}{2} \left[\frac{1}{t_{bi}} + \frac{1}{t_{oi}} \right]$$



风速与超声速度

$$u_1 = \frac{d_1}{2} \left[\frac{1}{t_{b1}} - \frac{1}{t_{o1}} \right]$$
$$u_2 = \frac{d_2}{2} \left[\frac{1}{t_{b2}} - \frac{1}{t_{o2}} \right]$$
$$u_3 = \frac{d_3}{2} \left[\frac{1}{t_{b3}} - \frac{1}{t_{o3}} \right]$$

$$c_1 = \frac{d_1}{2} \left[\frac{1}{t_{b1}} + \frac{1}{t_{o1}} \right]$$
$$c_2 = \frac{d_2}{2} \left[\frac{1}{t_{b2}} + \frac{1}{t_{o2}} \right]$$
$$c_3 = \frac{d_3}{2} \left[\frac{1}{t_{b3}} + \frac{1}{t_{o3}} \right]$$

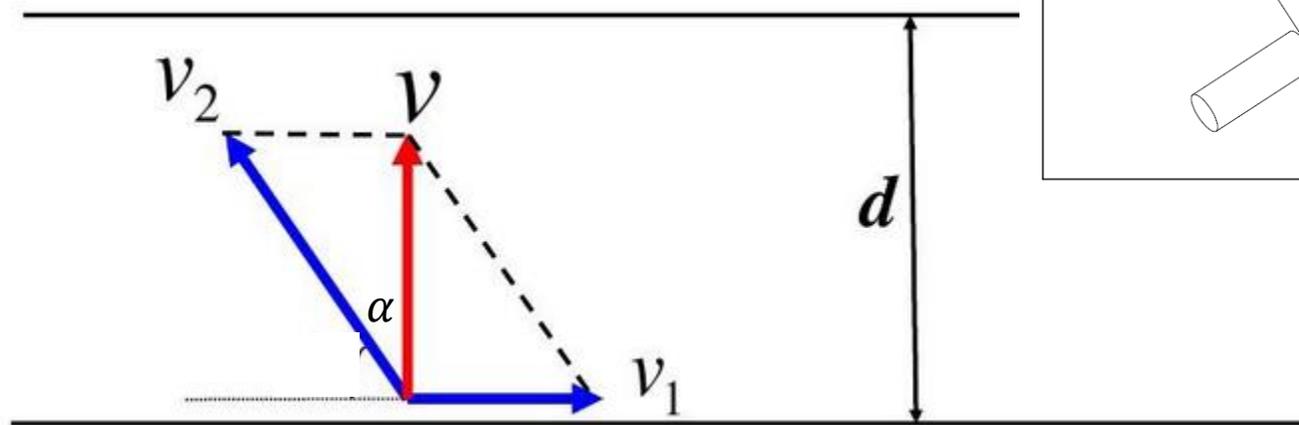
$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} T_{s1} \\ T_{s2} \\ T_{s3} \end{bmatrix} = \frac{1}{\gamma_d R_d} \begin{bmatrix} c_1^2 \\ c_2^2 \\ c_3^2 \end{bmatrix}$$

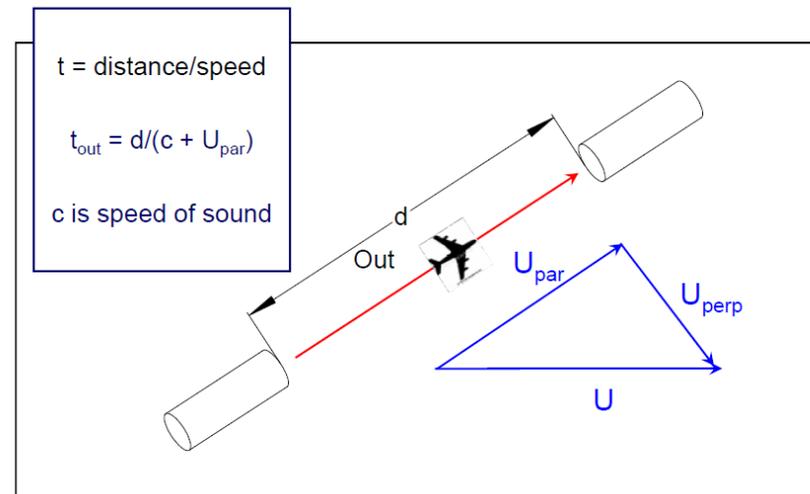


侧风订正

过河，角度计算，水流与河岸平行，流速 v_1 ，船的速度为 v_2



$$\sin\alpha = \frac{v_1}{v_2} \quad v = v_2 \cos\alpha$$



$$c_i = \frac{d_i}{2} \left[\frac{1}{t_{bi}} + \frac{1}{t_{oi}} \right]$$



侧风订正

考虑侧风影响:

$$t_1 = \frac{d}{c \cos \alpha + v_l} \quad t_2 = \frac{d}{c \cos \alpha - v_l}$$

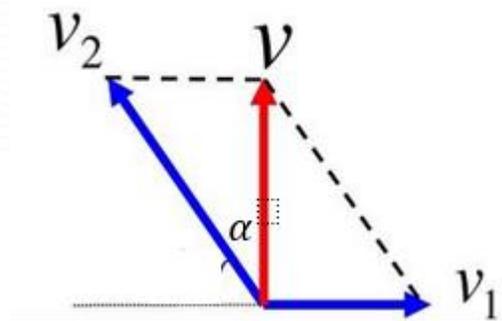
结合超声温度定义:

$$c^2 = \frac{d^2}{4} (1/t_1 + 1/t_2) + v_n^2 \quad c^2 = \gamma_d R_d T_s$$

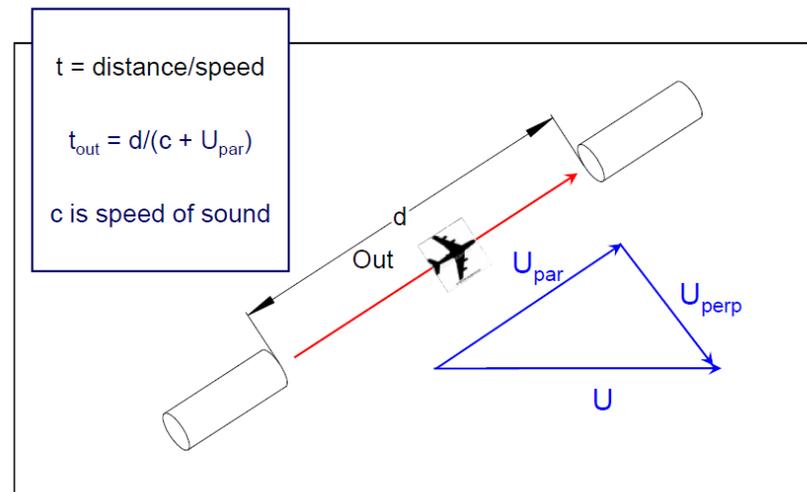


$$T_s = \frac{d^2}{1612} (1/t_1 + 1/t_2) + \frac{1}{403} v_n^2$$

Implemented in the firmware of CSAT3



$$\alpha = \arcsin(v_n/c)$$



$$V_{n1}^2 = \frac{3}{4} u^2 + v^2,$$

$$V_{n2}^2 = \frac{15}{16} u^2 + \frac{13}{16} v^2 + \frac{\sqrt{3}}{8} uv,$$

$$V_{n3}^2 = \frac{15}{16} u^2 + \frac{13}{16} v^2 - \frac{\sqrt{3}}{8} uv,$$



侧风订正

$$T_s = \frac{d^2}{1612} (1/t_1 + 1/t_2) + \frac{1}{403} v_n^2$$

- › 每对超声路径d都必须精确测量
- › 0.1mm路径d的标准偏差将导致0.3K的温度测量误差
- › 在使用其他型号超声传感器时，注意是否已经做了侧风订正

Select Items for Flux Computation

Master Anemometer : CSAT-3 [Anemometer 1]

Cross wind correction of sonic temperature applied by the anemometer firmware

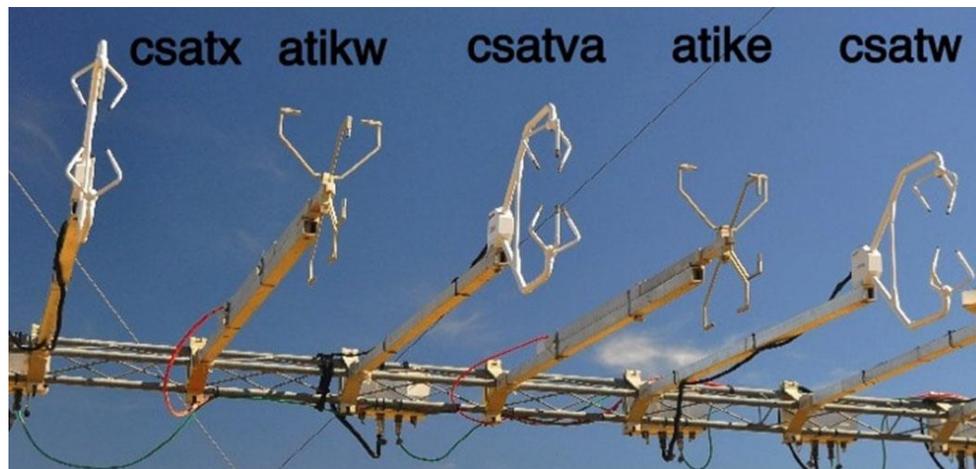
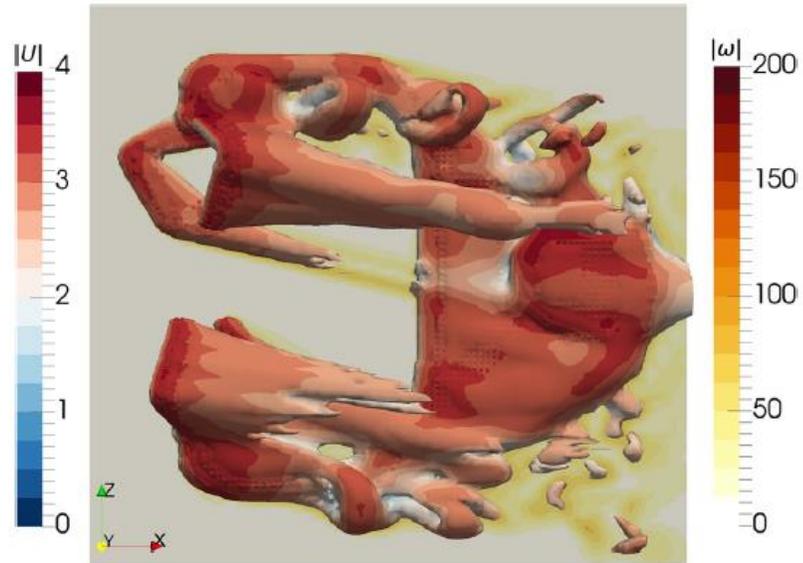
Anemometer Diagnostics : None

Fast temperature reading (alternative to sonic temp) : None



阴影校正

所谓阴影效应是指超声风速仪本身对风测量的影响，所有的超声传感器都会存在阴影效应的问题



阴影校正分析都缺少参考标准



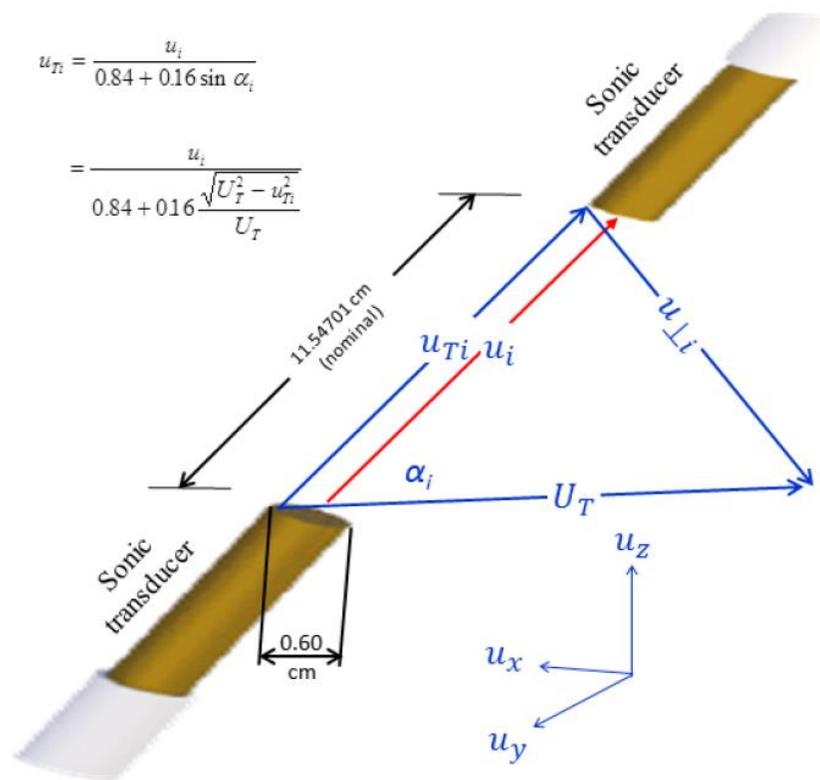
阴影校正

根据Horst (2015) 等, 阴影校正方程为: $U_{Ti} = \frac{u_i}{0.84+0.16\sin\alpha_i}$

如右图所示: $\sin\alpha_i = \frac{\sqrt{U_T^2 - U_{Ti}^2}}{U_T}$,

最终得到

$$U_{Ti} = \frac{u_i}{0.84+0.16\frac{\sqrt{U_T^2 - U_{Ti}^2}}{U_T}}$$



阴影校正



Comparison of turbulence measurements by a CSAT3B sonic anemometer and a high-resolution bistatic Doppler lidar

Matthias Mauder¹, Michael Eggert², Christian Gutsomuths², Stefan Oertel², Paul Wilhelm², Ingo Voelksch¹, Luise Wanner¹, Jens Tambke³, Ivan Bogoev⁴

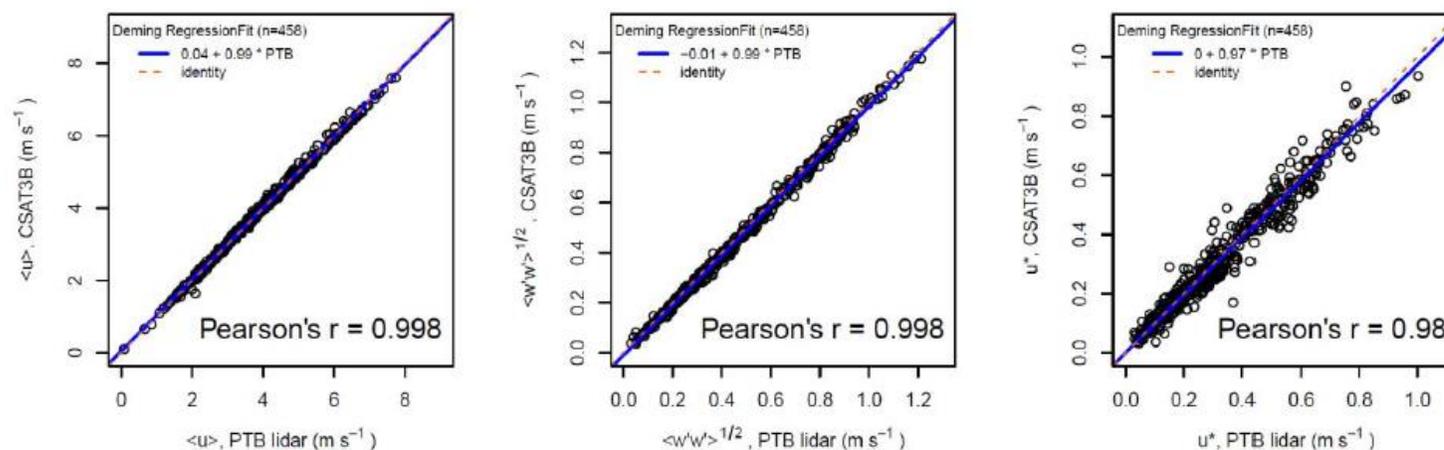


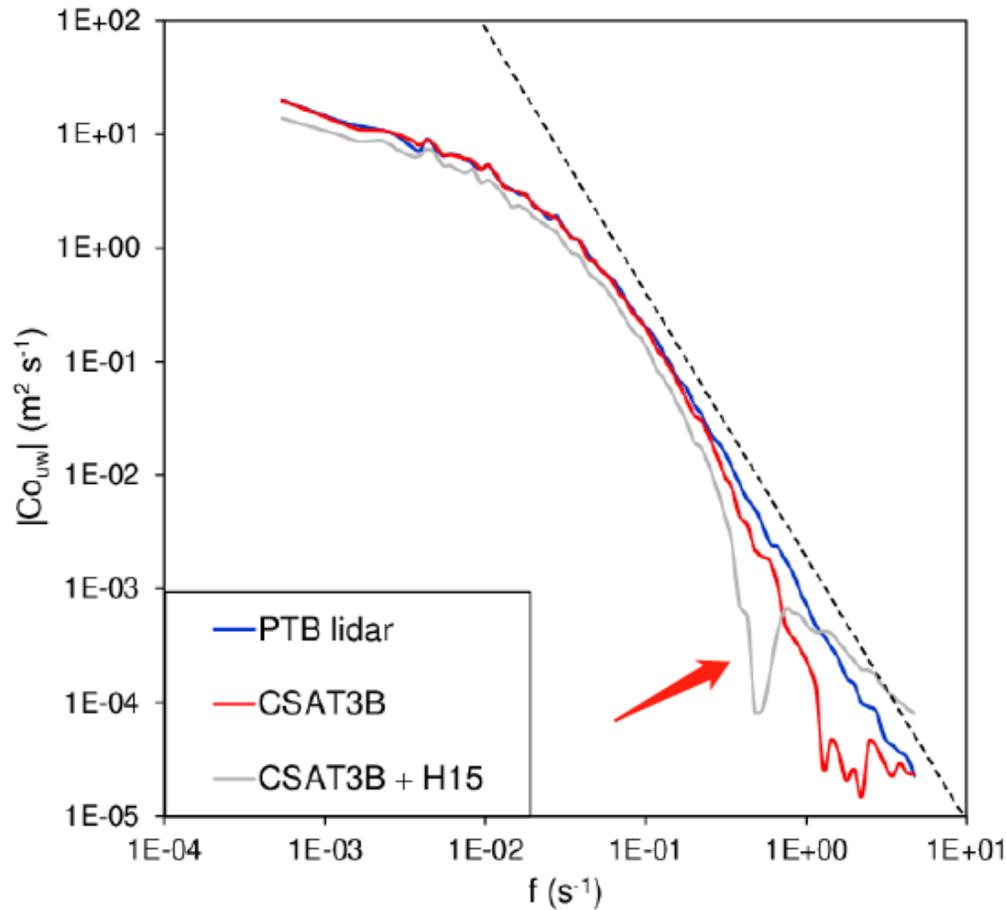
Figure 5: Comparison for mean wind velocity (left), standard deviation of the vertical velocity component (centre), and friction velocity (right), including the regression equation and correlation coefficient. A solid blue line indicates the Deming regression and the dashed red line indicates identity.

该对比特点:

- ◆ 在真实环境中比对
- ◆ 不同设备之间相互没有干扰
- ◆ PTB Lidar不具有任何flow-distortion



阴影校正



We also evaluated whether the overall accuracy of the CSAT3B measurements can be improved by the H15 flow-distortion correction, and our results indicate that **this method cannot be recommended for standard applications (H15修正并不能作为标准修正方法)**

Comparison of turbulence measurements by a CSAT3B sonic anemometer and a high-resolution bistatic Doppler lidar

Ensemble cospectra between u and w (absolute value) based on turbulence measurements from the PTB lidar and the CSAT3B sonic anemometer. The dashed line indicates the theoretical $-5/3$ power law in the inertial subrange



主要内容

一. 为什么使用超声温度

二. 超声温度的计算过程

1. 风速分解
2. 侧风订正
3. 超声温度定义
4. 阴影效应订正

三. 感热通量修正

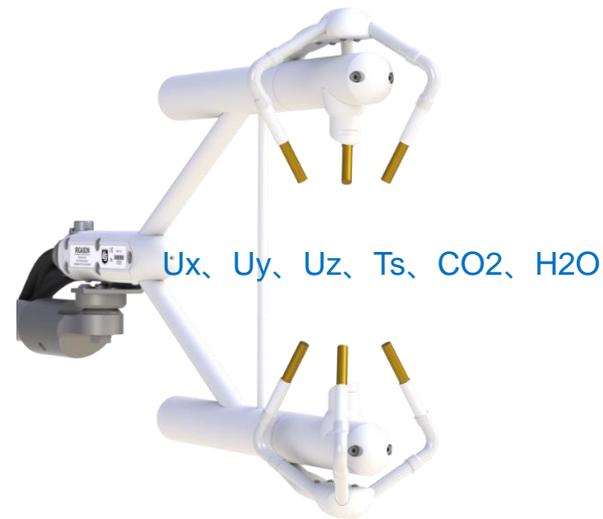


感热通量修正

$$T_s = \frac{c^2}{\gamma_d R_d}$$

$$T_s \approx T(1 + 0.51q)$$

- › 理想设备：所有要素都来自同一空间
- › IRGASON 能够计算得到真正的空气温度，超声和气体分析仪可以同步获得同一空间的数据



IRGASON



感热通量修正

超声温度与空气温度的关系 $T_s = T(1 + 0.51q)$

根据雷诺分解: $T = (\bar{T}_s + T'_s)(1 - 0.51(\bar{q} + q'))$ ①

垂直风速与温度协方差 $\overline{wT} = \overline{(\bar{w} + w')(\bar{T} + T')} = \bar{w}\bar{T} + \overline{w'T'}$ ②

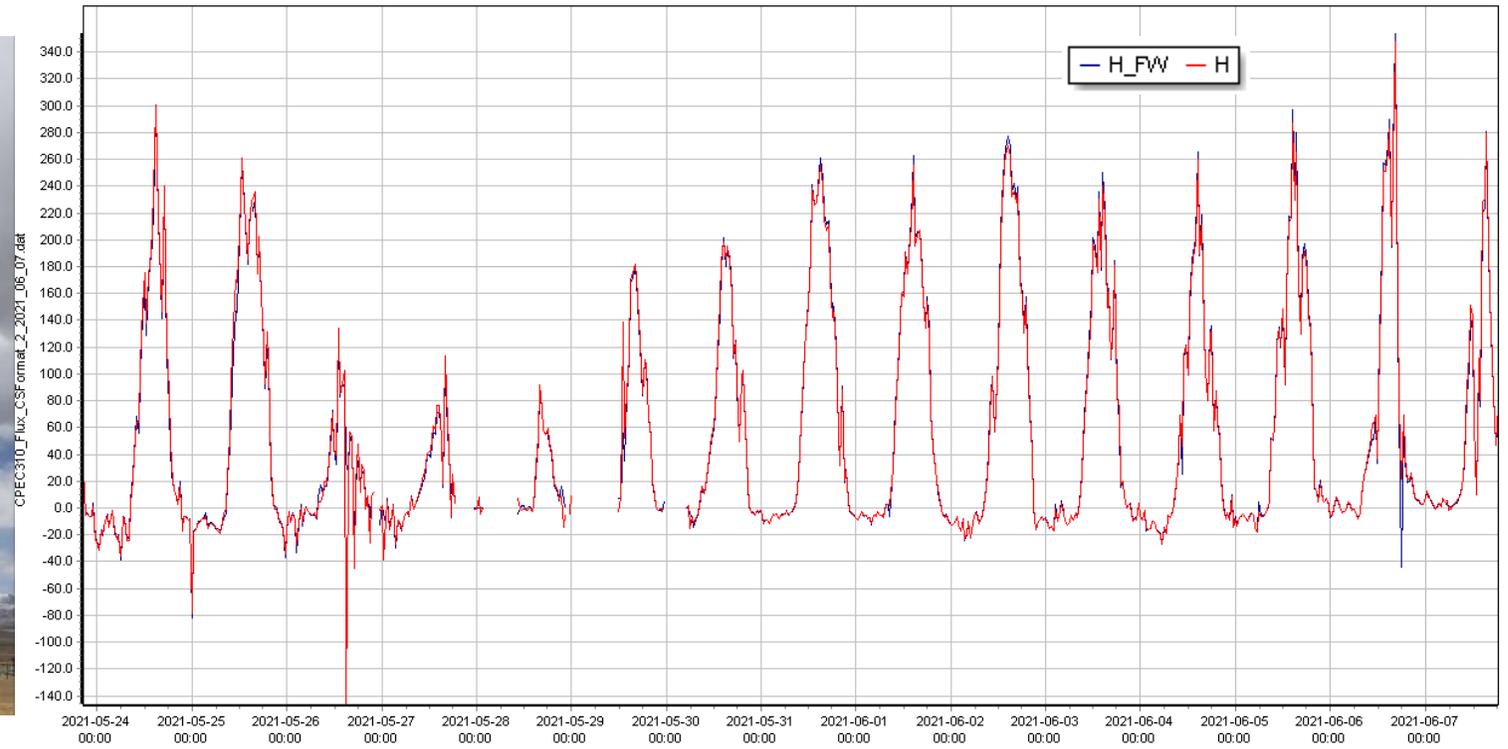
由1和2可得: $\overline{w'T'} = (1 - 0.51\bar{q})\overline{w'T'_s} - 0.51\bar{T}_s\overline{w'q'}$

对3式两边同时乘上 $\rho_a C_P$, 并将 $q = \rho_v/\rho_a$ 带入得到:

$$H = (1 - 0.51\bar{q})\rho_a C_P \overline{w'T'_s} - 0.51\rho_a C_P (\bar{T}_s/\rho_a) \overline{w'\rho'_v}$$



感热通量



CSAT3修复案例

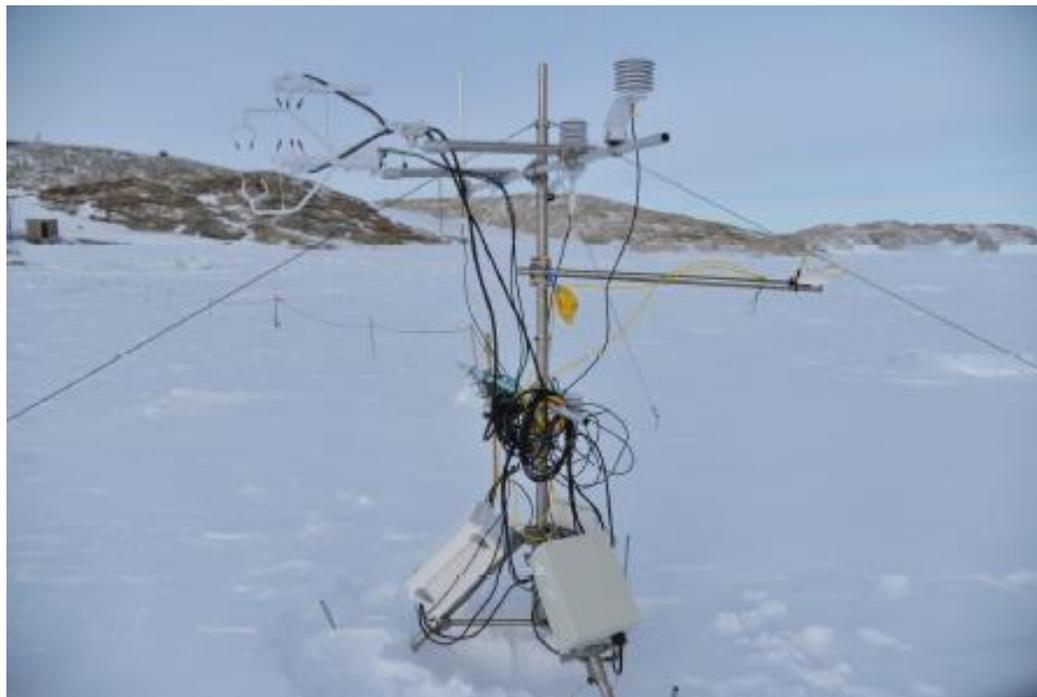
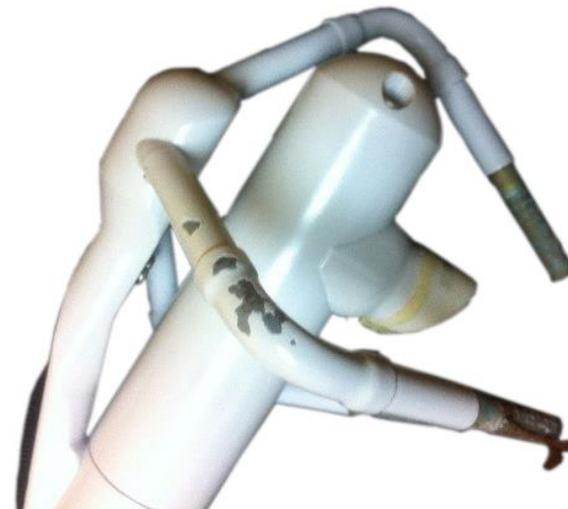
2015年，南极中山站

IRGASON的超声探头被撞变形

由于运输问题无法将配件及时送到中山站

经过评估后设备继续工作

2016年IRGASON返回CSI进行修复

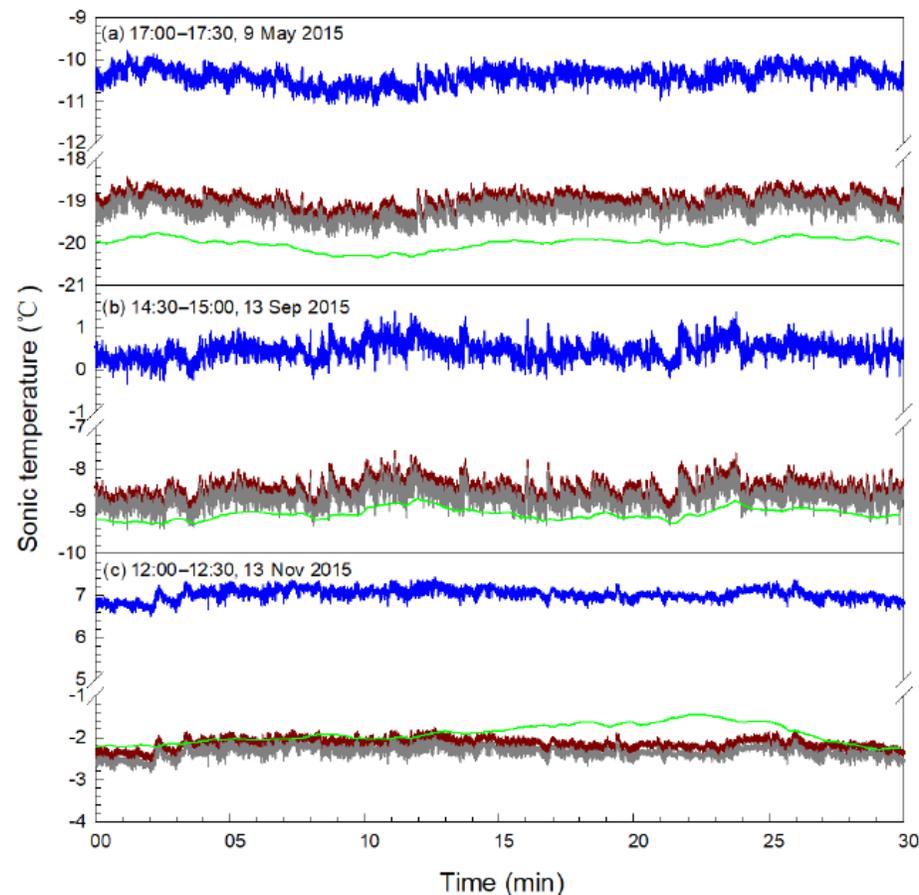


CSAT3修复案例

检查系统硬件诊断值及OS版本后：

- 1, 重新测量了3个路径的长度
- 2, 重新测量了各个角度
- 3, 根据测量结果重新计算矩阵A
- 4, 修复数据

	Geometrical deformation	First path $i = 1$	Second path $i = 2$	Third path $i = 3$
Path length	before	11.6486	11.5240	11.4968
$(d_i/d_{T_i}$ in cm)	after	11.6160	11.1245	11.3548
Zenith angle	before	29.935379	29.026608	29.612041
$(\theta_i$ in $^\circ$)	after	29.925878	25.226585	28.772601
Azimuth angle	before	90.000000	329.527953	206.80477
$(\phi_i$ in $^\circ$)	after	90.000000	324.736084	209.23382



涡动通量观测数据质量评价的方法



康宝智信测量技术（北京）有限公司

李彦磊, 2021-08-18

主要内容

湍流平稳性检验

湍流发展充分性检验

风向

谱分析

能量闭合率

源区分析



湍流平稳性检验

湍流平稳性 (Steady State Tests, SST)

指一个观测时次内主要统计量保持稳定。非平稳情况下, 在30 min的观测时段内, 一些主要的统计量会有变化趋势, 或出现结构性变化。

检验方法参考Foken, 2004, 2012:

1. 将观测时段 (30min) 分为6个子时段, 每个5min
 2. 对30min观测数据, 计算总体协方差 CV_{30}
 3. 分别计算各子时段的协方差(CV_1 to CV_6)及其均值 $CV_a = \sum_{i=1}^6 CV_i / 6$
 4. 计算非平稳指数 $RN = |(CV_a - CV_{30}) / CV_{30}| * 100\%$, 根据计算结果可以划分为9个等级
- ◆ 根据长期实践得到的经验, **如果非平稳指数小于30%**, 通常认为这个观测的时间序列是稳态的

RANGE(%)	0-15	16-30	31-50	51-75	76-100	101-250	251-500	501-1000	>1000
CLASS	1	2	3	4	5	6	7	8	9

湍流发展充分性检验

湍流充分发展的情况下，Monin-Obukhov相似理论成立。近地面层大气的许多归一化无量纲参数比如方差，能谱协谱等，只是稳定度 z/L 的函数，参考Foken, 2012，对“标准”的归一化方差与实际的计算值做比较，计算得到总体湍流特征指数（Integrated Turbulence Characteristics, ITC）

$$ITC = \left| \frac{(\sigma_{\chi/\chi_*})_{model} - (\sigma_{\chi/\chi_*})_{measurement}}{(\sigma_{\chi/\chi_*})_{model}} \right| \times 100\%$$

举例： $ITC_T = \left| \frac{(\sigma_{T/T_*})_{model} - (\sigma_{T/T_*})_{measurement}}{(\sigma_{T/T_*})_{model}} \right| \times 100\%$

$$T_* = \overline{w'T'}/u_*$$



湍流发展充分性检验

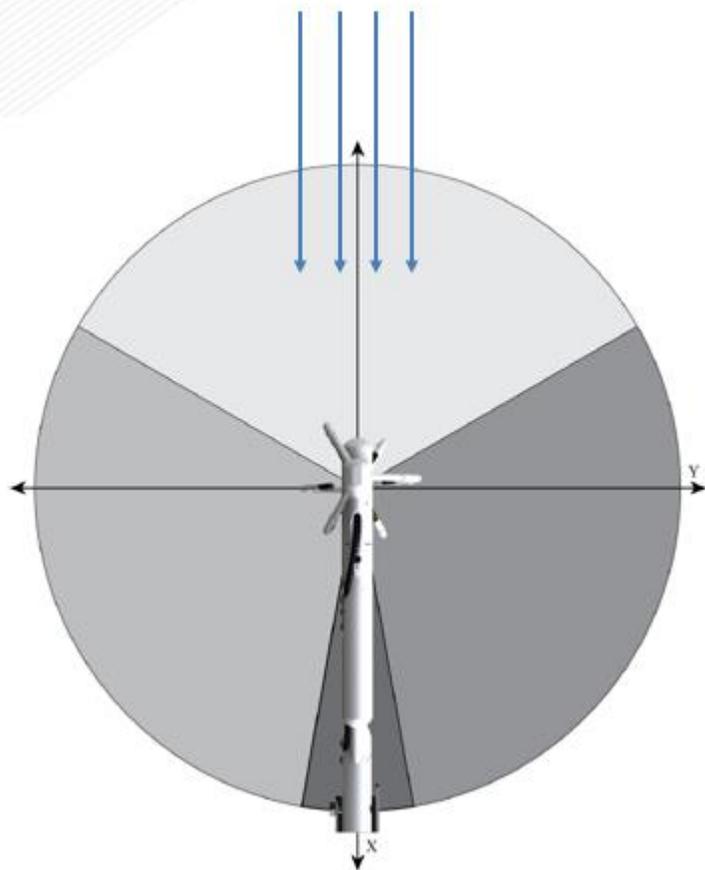
根据ITC的计算结果，可以划分为9个等级

RANGE(%)	0~15	16~30	31~50	51~75	76~100	101~250	251~500	501~1000	>1000
CLASS	1	2	3	4	5	6	7	8	9

如果总体湍流特征指数ITC**小于30%**，通常认为这个观测时段内的湍流充分混合



风向



Horizontal orientation
of the sonic anemometer

Class	Range
1	$\pm 0-30^\circ$
2	$\pm 31-60^\circ$
3	$\pm 60-100^\circ$
4	$\pm 101-150^\circ$
5	$\pm 101-150^\circ$
6	$\pm 151-170^\circ$
7	$\pm 151-170^\circ$
8	$\pm 151-170^\circ$
9	$> \pm 171^\circ$

在安装设备之前，需要确定当地的主风向，并将设备布置在目标区域的下风向



总体质量标记

综合湍流平稳性检验，湍流发展充分性检验以及风向方向，可以得到总体质量标记,可划分为1~9
九个等级

Table 4.5 Proposal for the combination of the single quality flags into a flag of the general data quality (Foken et al. 2004)

Flag of the general data quality	Steady state test according to Eq. 4.38	Integral turbulence characteristics according to Eq. 4.41	Horizontal orientation of the sonic anemometer
1	1	1-2	1-5
2	2	1-2	1-5
3	1-2	3-4	1-5
4	3-4	1-2	1-5
5	1-4	3-5	1-5
6	5	≤ 5	1-5
7	≤ 6	≤ 6	≤ 8
8	≤ 8	≤ 8	≤ 8
9	≤ 8	6-8	≤ 8
9	one flag equal to 9		



总体质量标记

- 或者采用简化的等级划分，可划分为0, 1, 2三个等级

湍流平稳性	湍流发展性	总体质量级
(1-2) 或 (<30%)	(1-2) 或 (<30%)	0
(≤5) 或 (<100%)	(≤5) 或 (<100%)	1
(≤6) 或 (>100%)	(≤6) 或 (>100%)	2

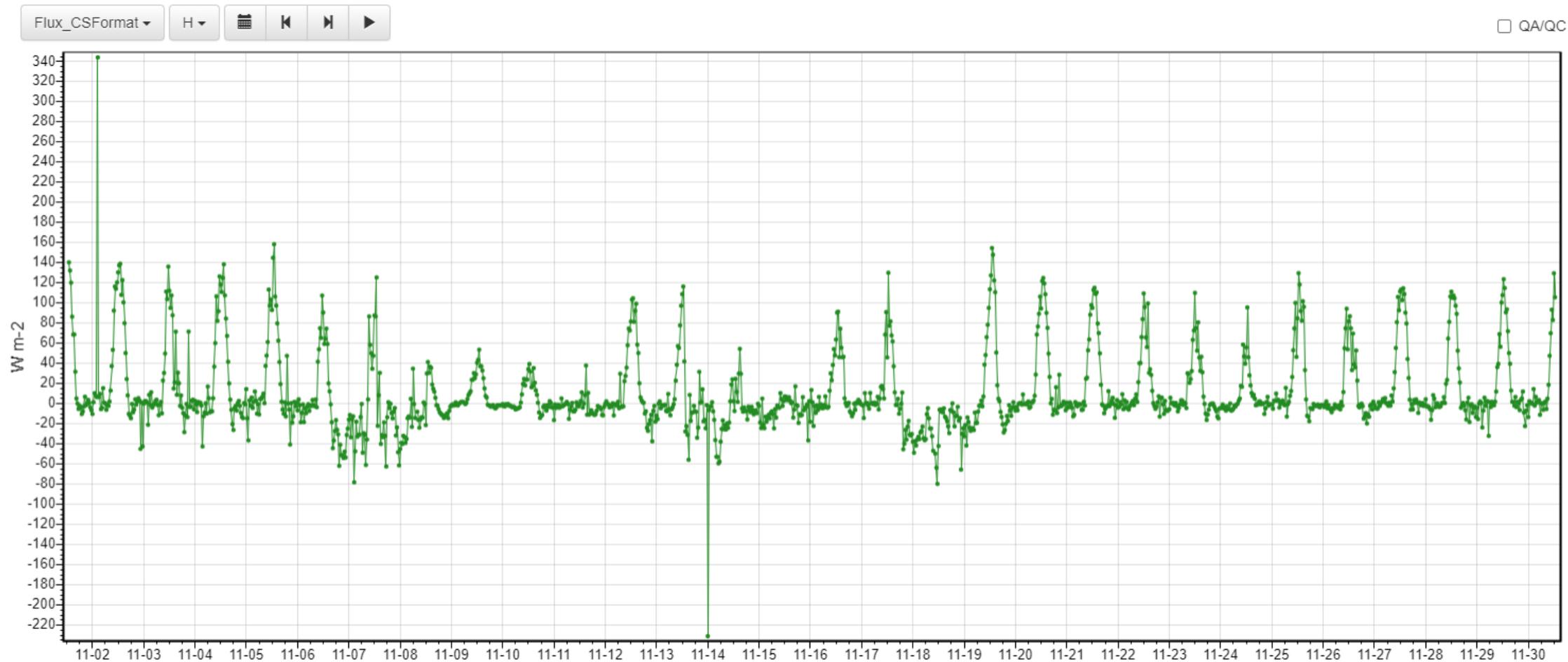
无论是哪种等级划分方法，质量等级数字越小，表示数据质量越高，反之则越差。

- ◆ 质量较好的数据，通常用于科学研究分析或论文发表 (1~3)
- ◆ 质量一般的数据，可用于连续通量观测实验 (4~6)
- ◆ 质量较差的数据，只能作为定性分析参考，但通常会好于插补数据 (7~8)
- ◆ 舍弃 (9)



总体质量标记

CPEC N40 Flux_CSFormat.H



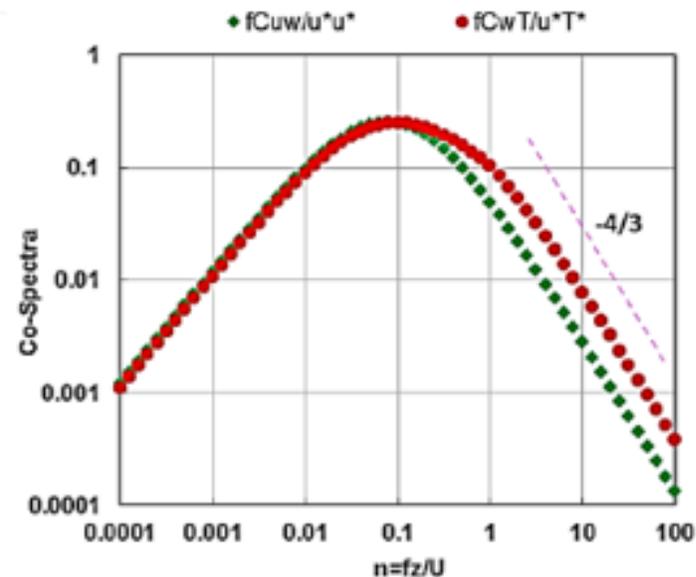
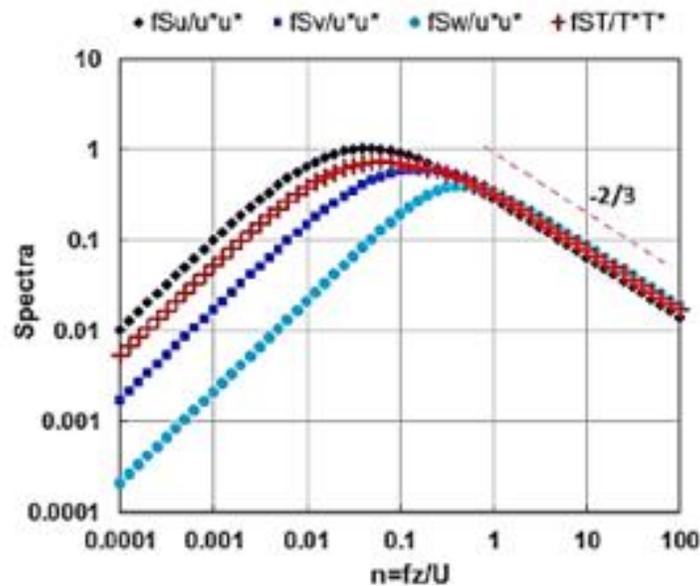
谱分析

近地面层小尺度湍流可以近似认为是局地均匀各向同性，在惯性区内，功率谱遵循-2/3定律，协谱则遵循-4/3定律

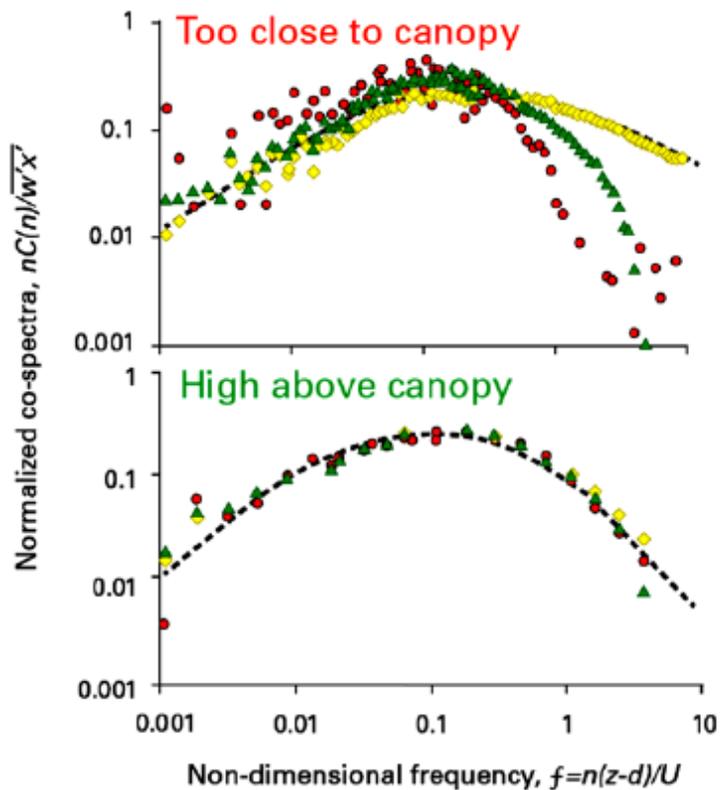
$$\text{variance} = \overline{T'^2} = \int_0^{\infty} n S_T(n) d\ln(n)$$

$$\text{covariance} = \overline{w'T'} = \int_0^{\infty} n C_{wT}(n) d\ln(n)$$

(Co)variance is area under the (co)spectral density curve



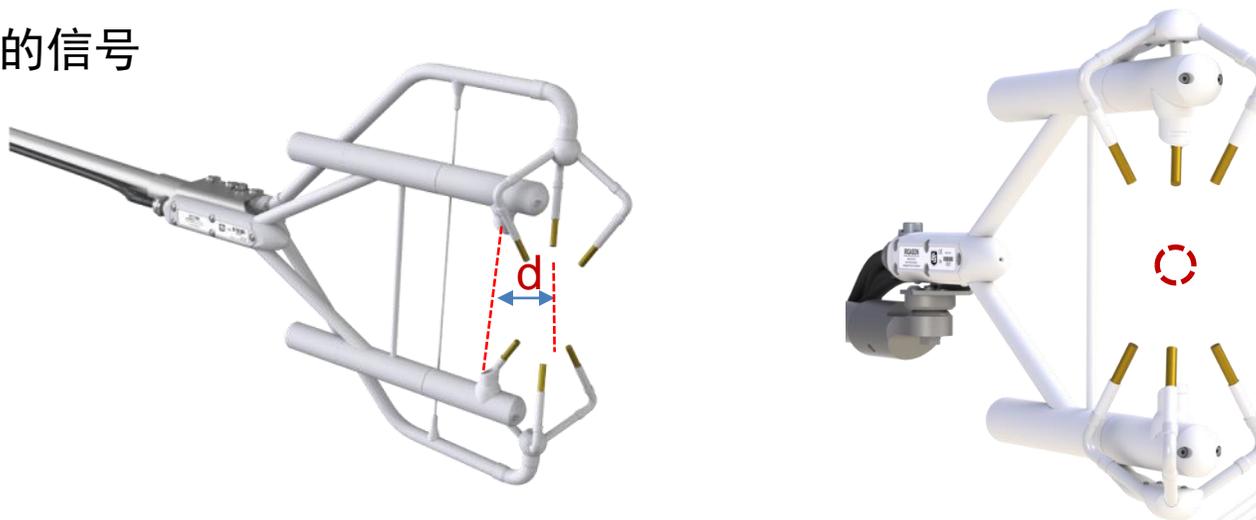
谱分析



- ~标准谱
- ◆ ~超声 $w'T'$ 谱（一般作为参考谱）
- ▲ ~IRGA光路12cm的影响
- ~超声与IRGA间距47cm的影响

(Burba, 2013)

实际观测时，如果观测高度距离冠层高度较近时，小涡旋的贡献相对较大，如果我们仍采用10Hz采样频率的话，则可能会在丢失一些高频的信号



通常可以通过累计频率分析（Ogive）来确定站点的合适的采样频率
建议在设备运行初期做频谱分析



能量平衡

能量平衡闭合被认为是检验涡动相关通量数据的一个重要标准，FLUXNET许多站点都把能量平衡闭合状况分析作为一种标准的程序用于通量数据的质量评价。

从20世纪80年代后期开始，地表能量平衡不闭合的现象在大多数试验中逐渐被发现（Foken and Oncley, 1995），即净辐射与土壤热通量之差大于感热和潜热通量的和。

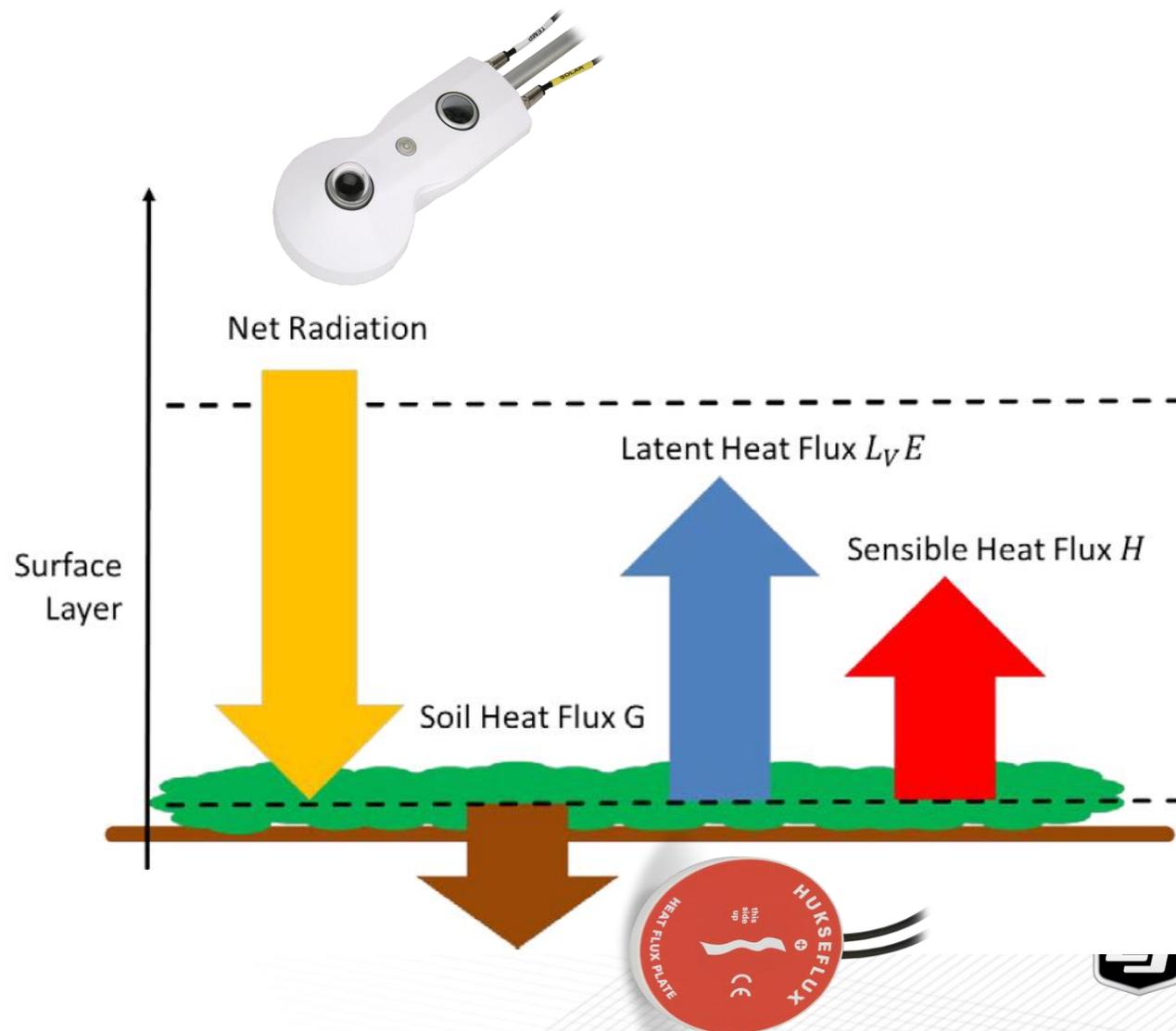
$$ERB = \frac{\sum(H + LE)}{\sum(R_n - G)}$$



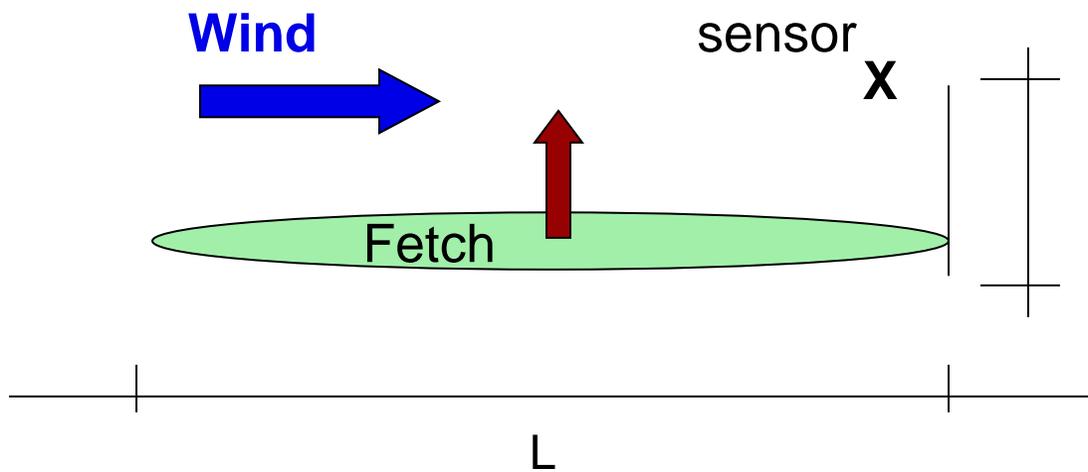
能量平衡

FluxNET、EuroFlux和 ChinaFlux的
EC观测的能量闭合度分别为80%、
74%和 73%。该方法存在能量不闭合
的问题

如果我们实测数据的能量闭合率明显偏
低的话，就需要考虑测量数据的质量是
否可靠



源区分析



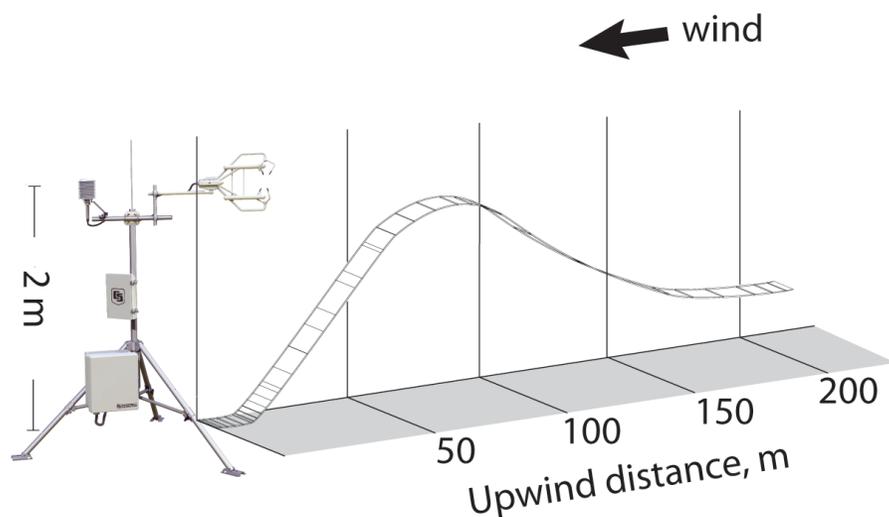
$$h_{ins} = \left[\frac{L}{100} \right]$$



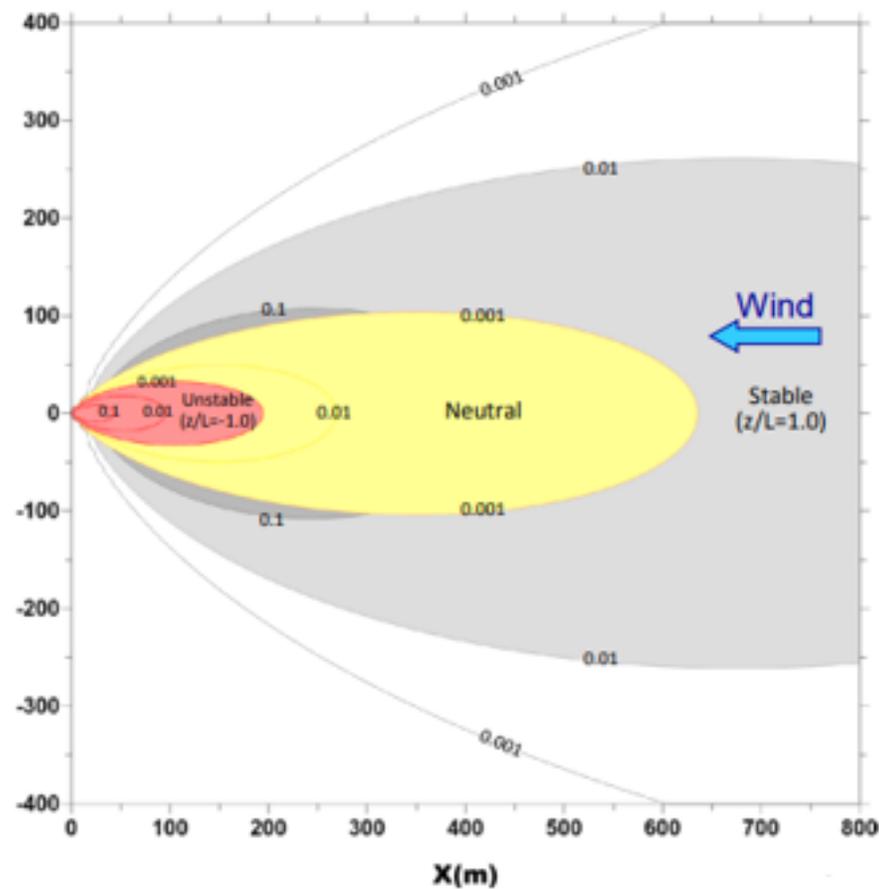
- 测量高度 粗糙度长度 大气稳定性



源区分析



- $z_0 = 0.15 \times \text{height of canopy}$
- 地面粗糙度减小，观测源区增大
- 地面粗糙度增大，观测源区减小



大气层结越稳定，观测的源区范围越大



谢谢大家

