第44卷 第2期 气 象 学 报 Vol. 44, No. 2
1986 年 5 月 ACTA METEOROLOGICA SINICA May, 1986

多普勒声雷达测风与直接测量仪器的观测比较*

吕乃平 李诗明 陈炎涓 陈景南 郑月明

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

文中对多普勒声雷达测风和 325 m 铁塔上风速、风向仪及超声风速仪的测量值进行了观测比较。结果表明,当信噪比大于 1 时,两种方法测量的平均风速、风向的相关较好,风速、风向廓线较为接近;声雷达测量的垂直风速平均值和均方根差比超声风速仪的测量值略偏大。这与国外进行的观测比较结果一致。

需要指出,声雷达和直接测量仪器的观测比较中存在一定差异,特别是对比每一次的观测值就可以看出,在某些情况下还存在明显差异。进一步分析声雷达测风产生偏差的原因,对误差做出合理的订正是十分必要的。

一、引 言

多普勒声雷达测量三维风速、风向的原理由 Beran[1]提出,我们于 1980 年[2]进行过初步试验。用声雷达测量大气中的风速,首先要合理地设计和选取声雷达的参数,精确地测量多普勒频偏值;其次,要在声雷达回波信号中正确地识别和提取可靠信号,以减少环境噪声对声雷达测风所造成的误差。此外,声波在大气中传输时,气象要素的平均量和湍流特性,对风速测量的精度和可靠性会产生影响,为此,将声雷达探测的风速与气象仪器直接测量的风速进行比较是十分必要的。在此基础上,对声雷达测风误差做合理订正,会进一步提高声雷达探测的精度和可靠性。

1982 年 9 月由美国国家海洋大气局的波传播实验室(NOAA,WPL)主持,将四家工厂生产的多普勒声雷达与美国波德(Boulder)大气观测站(BAO)300 m 铁塔上气象仪器直接测量的风速、风向进行三周观测比较,Gaynor 等[3](1983)分析了观测结果。本文给出了我们研制的多普勒声雷达与北京 325 m 铁塔上气象仪器直接测量的风速、风向的比较。有关声波在湍流大气中传输时的特性已有过一些分析研究[4-7]。近来,我们对声雷达测量垂直风速的误差进行了分析[8],今后,将对声雷达测风的误差做进一步分析和订正。

* 本文于 1984 年 8 月 9 日收到,1985 年 1 月 23 日收到修改稿。

二、观 测 比 较 方 法

多普勒声雷达测风可以采用三种不同的天线布局方式，我们采用双点和单点二种天线布局。声雷达测量的水平风速、风向是与 325 m 气象塔上 15 个高度的风杯式风速仪和风向仪比较的[10]，垂直风速是与超声风速仪进行比较[11]。超声风速仪安装在铁塔的 85 m 高度上，在比较时，其采样速率取作 4 s，与声雷达的脉冲重复周期一致。若取声雷达测风的平均时间大于 10 min 时，测量垂直风速的精度为 ± 0.1 m/s。测量水平风速时，若多普勒谱宽为 100 Hz，单点天线布局测量水平风速的精度为 ± 0.5 m/s，测量风向的精度为 $\pm 5^\circ$（倾角 $\theta = 60^\circ$）；双点天线布局测量水平风速的精度为 ± 0.1—± 0.6 m/s，风向精度为 $\pm 4^\circ$—$\pm 13^\circ$（$\theta = 10^\circ$—70°），倾角 θ 是高度的函数，即探测高度增加时，测量风速、风向的精度降低。关于声波在湍流大气中传输时，对声雷达测风引起的误差，在本文第五节将进行初步分析。

由于声雷达回波功率与大气的温度脉动谱与风速脉动谱有关，回波功率的强度随高度的增加而减少。当环境噪声大，信噪比低时，会影响声雷达测风的可靠性。在我们设计的探测系统中，数据的可靠程度与采集数据时环路是否正确锁定有关。为此，采用正交检相器作为锁定指示器，增加数据可靠判别器，作为数据采集中是否给微机送数的控制指标。在数据处理过程中，舍去了采样次数少于总采样次数三分之一的点，以保证数据的可靠性。

三、水平风速、风向廓线比较

1. 双点天线

声雷达的垂直指向天线在距铁塔西面 250 m 处，两个侧向发射的 100 W 号筒式扬声器分别放置在垂直指向天线的北面和东面，与垂直天线之间的距离为 185 m。风速和风向

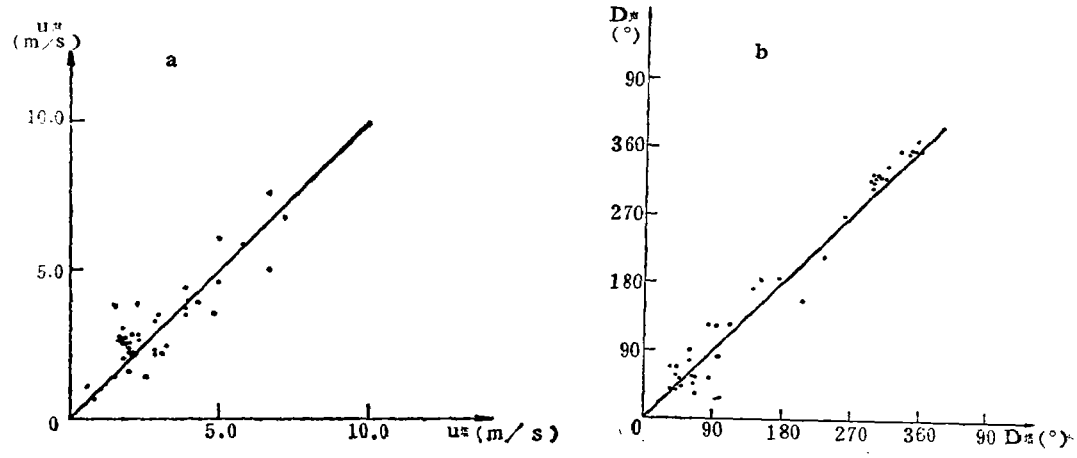


图 1　双点多普勒声雷达和直接测量的风速(a)、风向(b)相关图

的计算公式见文献[2]。我们于 1983 年 8 月和 11 月用 2000 Hz 发射频率进行了多次观测。风向和风速的平均时间为 10 min,对 34,85 和 153 m 三个高度作出声雷达和直接测量的风速、风向相关图,以 85 m 高度为例绘于图 1(a,b)。图中实线为 45°(相关系数为 1)的直线,点子分散在直线的两边,除个别点子偏离稍大外,一般相关较好。由图 2 可见,声雷达和塔上直接测量的风速、风向廓线比较一致。

2. 单点天线

单点天线的多普勒声雷达包括一个垂直指向的天线(直径 3.0 m)和两个倾斜天线(直径 1.5 m),倾斜天线的轴线与垂直方向的夹角为30°,两个天线分别指向北面和西面。其风速计算公式为:

$$\begin{cases} V_X=(V_C-V_A\sin\theta)/\cos\theta \\ V_Y=(V_B-V_A\sin\theta)/\cos\theta \\ V_Z=V_A \end{cases} \qquad (1)$$

其中 A 是垂直天线,B, C 是两个倾斜天线。径向风速为 $V_i(i=A,B,C)$

$$V_i=-\frac{c}{2}\Delta f_i/f_i \qquad (2)$$

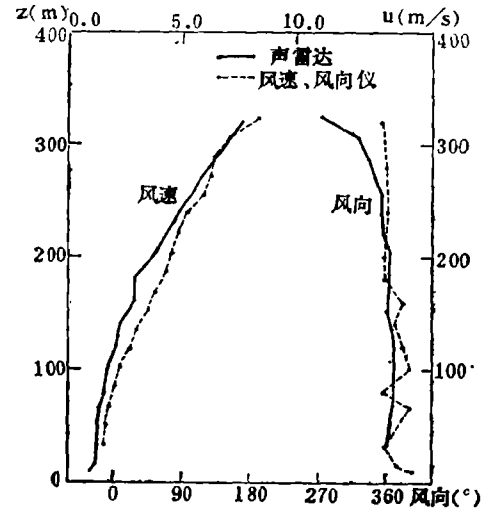
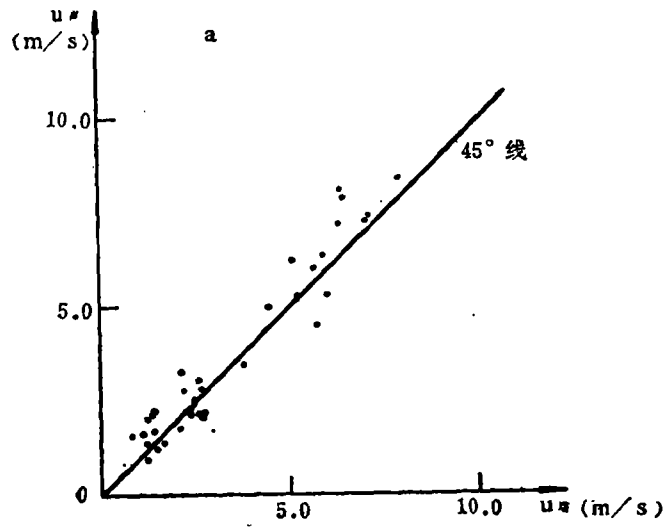


图 2 双点多普勒声雷达和直接测量的风速、风向廓线比较
(1983 年 11 月 21 日 10:05—10:15)

同样以 85 m高度为例,将比较结果绘于图 3(a,b)。由图可见,两种方法测量的风速、风向相关较好。图 4 为 1983 年 12 月 6 日 10:50—11:00 的风速、风向廓线比较。该例中直到 460 m 高度,声雷达的采样次数均大于总采样次数的三分之一。从我们所做的几十组廓线比较看来,只要声雷达回波的信噪比大于 1,采样次数满足要求,单点多普勒声雷达和



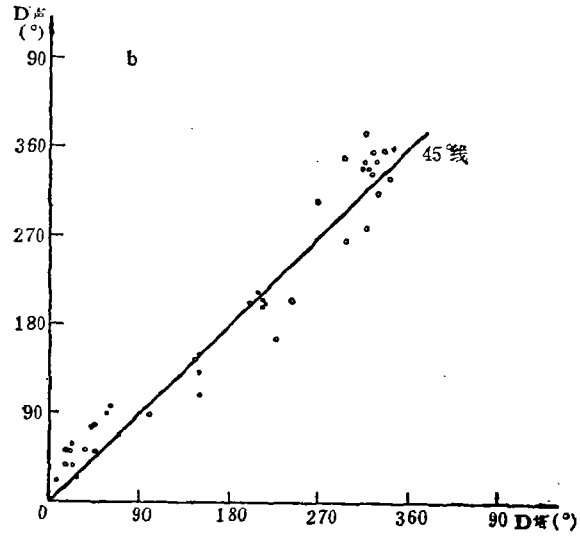


图 3　单点多普勒声雷达和直接测量的风速(a)、风向(b)相关图

直接测量的风速、风向廓线较为一致，但在个别情况下仍会出现较大偏离。因此，进一步研究声波在实际大气中传输时由平均风速和湍流对声雷达测风可能引起的误差，将能提高声雷达测量风速、风向的精确度和可靠性。

3. 统 计 比 较

为了对声雷达探测和直接探测两种方法测量的风速、风向给出统计意义上的比较，我们计算了风速差的平均值$\overline{\Delta u}=\overline{(u_{塔}-u_{声})}$和$\sigma_{\Delta u}$即风速差值的均方根，以及$\Delta D$和$\sigma_{\Delta D}$，其中$D$记作风向的测量值。为了便于分析比较，在表 1 和表 2 中列出了 1982 年在美国波德大气观测站 (BAO)做的比较结果[3]。

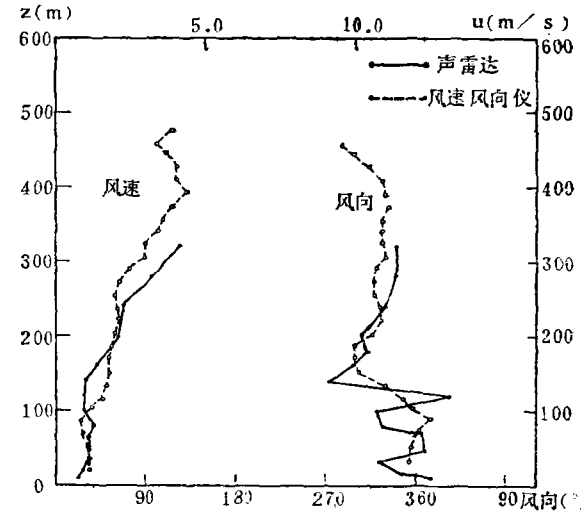


图 4　单点多普勒声雷达和直接测量的风速、风向廓线比较

表中$\overline{\Delta u}$与$\overline{\Delta D}$的值愈小，表示声雷达与直接测量的结果愈接近；$\sigma_{\overline{\Delta u}}$及$\sigma_{\overline{\Delta D}}$表示测量值的离散程度。从表中所列的统计结果看出，双点和单点的声雷达与塔上仪器测量的平均风速、风向的差值较小，但$\sigma_{\overline{\Delta u}}$与$\sigma_{\overline{\Delta D}}$较大，$0.6\ \mathrm{m/s}<\sigma_{\overline{\Delta u}}<2.0\ \mathrm{m/s}$，$18^{\circ}<\sigma_{\overline{\Delta D}}<36^{\circ}$。意味着测量的平均值存在一定的偏差。仔细分析我们测量的几十组廓线，其中大部分廓线的一致性较好，但在某些情况下仍出现较大偏差。产生差别的原因是多方面的，如塔上测量仪器本身的误差，声雷达测量中环境噪声的影响，声雷达测量的仪器误差以及声波在实际大气中传输时，由平均风速和

表 1 多普勒声雷达和塔上测量的风速比较

声雷达类型	天线布局	观测时段	高度(m)	次 数	$\overline{\Delta u}=\overline{(u_{塔}-u_{声})}$ (m/s)	$\sigma_{\Delta u}$ (m/s)
大气物理所	双 点	08:00—17:00	34	40	0.23	0.96
			85	40	−0.10	0.94
			153	38	−0.34	1.46
大气物理所	单 点	08:00—17:00	51	34	−0.02	0.63
			85	34	−0.05	0.62
			153	30	−0.18	0.70
Aerovironment	单 点	12:00—17:00	200	69	−0.11	1.33
Remtech	单 点	12:00—17:00	200	44	0.10	0.91
Radian	双 点	12:00—17:00	200	64	0.09	1.91
Xontech	双 点	12:00—17:00	200	67	0.06	1.96

表 2 多普勒声雷达和塔上测量的风向比较

声雷达类型	天线布局	观测时段	高度(m)	次 数	$\overline{\Delta D}=\overline{(D_{塔}-D_{声})}$ (°)	$\sigma_{\Delta D}$(°)
大气物理所	双 点	08:00—17:00	34	40	−3.8	30.0
			85	40	−9.2	21.2
			153	38	−3.0	29.5
大气物理所	单 点	08:00—17:00	51	34	9.9	24.7
			85	34	−7.1	28.3
			153	30	−16.0	36.0
Aerovironment	单 点	12:00—17:00	200	69	−5.93	19.69
Remtech	单 点	12:00—17:00	200	44	3.89	30.69
Radian	双 点	12:00—17:00	200	64	−8.11	18.25
Xontech	双 点	12:00—17:00	200	67	−6.31	29.24

湍流等因子对测风产生的误差。从表中看出，我们设计的声雷达和国外四个厂家生产的声雷达给出的比较结果相近。

四、垂直风速的比较

为了提高测量垂直风速的频率，只用一个垂直指向天线作发射和接收。我们于1983年10月进行了多次垂直风速的观测，脉冲重复周期为4s，采样时间为22 min。计算 $\bar{w}$ 和 σ_w 时，取采样次数大于总采样次数90%的点。

由于垂直风速的平均值一般比水平风速小一个量级，因此，对垂直风速的平均值做出精确的估计是困难的。图5中空心点是对流条件下85 m高度上超声与声雷达测量的垂直速度平均值的比较，图中实心点是英国Caughey[1]给出的观测结果。图中点子的离散较大，数值仍是相近的，声雷达测量的垂直风速有正的偏高趋势。Gaynor[3]1983年做的比较中，没有分析垂直风速平均值的结果。我们认为，尽管 $\bar{w}$ 较小，声雷达和超声测量的结果仍然是相关的，用声雷达测量垂直风速的平均值是有代表性的。图6是不稳定条件下

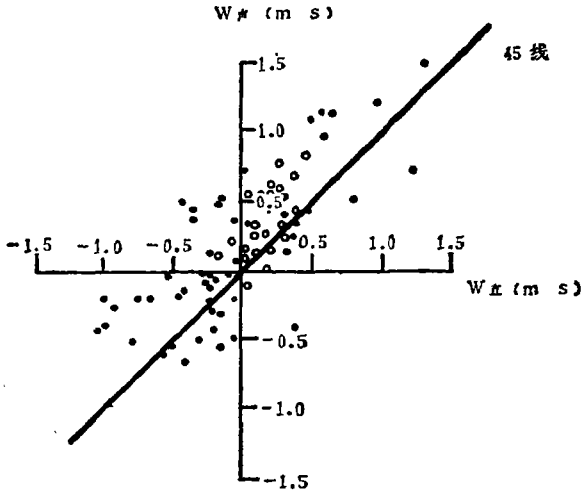


图 5　声雷达和直接测量的垂直速度比较

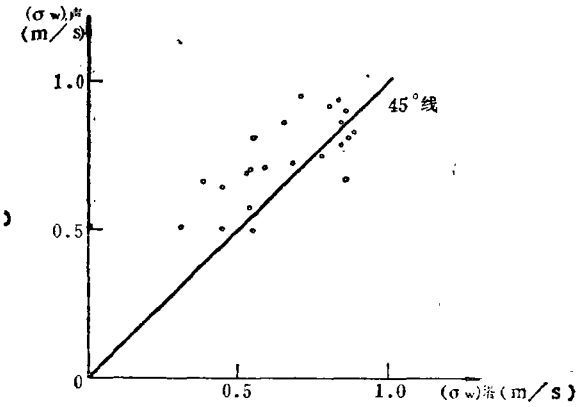


图 6　多普勒声雷达和超声风速仪测量的垂直速度均方根差的相关

表 3　多普勒声雷达和超声风速仪测量的垂直风速比较

声雷达类型	观测时段	高度(m)	次数	$\overline{\Delta\sigma_w}=\overline{\sigma_{w塔}-\sigma_{w声}}$	$\overline{\sigma_{\Delta\sigma_w}}$
大气物理所	08:00—15:00	85	22	−0.05	0.16
Aerovironment	12:00—17:00	200	45	−0.06	0.34
Remtech	12:00—17:00	200	35	−0.01	0.15
Radian	12:00—17:00	200	37	−0.17	0.32
Xontech	12:00—17:00	200	32	−0.05	0.38

声雷达和超声风速仪测量的垂直速度均方根差的相关，其中每个点的平均时间为 22 min。用图中 22 组点计算的$\overline{\Delta\sigma_w}=\overline{(\sigma_{w塔}-\sigma_{w声})}$和$\sigma_{\Delta\sigma_w}$列于表 3。声雷达测量的$\sigma_{\Delta\sigma_w}$略高于超声风速仪的测量值。这与 Gaynor[3]给出的比较结果是一致的。

五、比较结果的讨论

从声雷达和直接测量的水平风速、风向及垂直风速的观测比较中可以看出，两种方法得到的结果基本上是一致的。需要指出，上述统计比较中存在一定差异，特别是对比每一次的观测值就可以看出，在某些情况下还会出现明显差异。为了提高声雷达测风的精确度和可靠性，对产生偏差的原因做进一步分析研究是十分必要的。

目前对声雷达测风误差的理论分析，可以部分地解释上述比较中产生的差异。Spizzichino[4](1974)分析了声雷达测量水平风速和垂直风速的仪器误差，其表达式为

$$\sigma_u=\frac{\sqrt{3}}{4}\frac{\lambda^2 B_1}{N}\frac{1}{\tau\cos^2\theta} \tag{3}$$

$$\sigma_w=\frac{\sqrt{3}}{4}\frac{\lambda^2 B_2}{N}\frac{1}{\tau} \tag{4}$$

其中N是声脉冲发射次数,τ是取样门的实际宽度,B是多普勒谱的带宽,θ是声雷达的倾角,λ是声波波长。若$B_2=10$ Hz,发射频率为2000 Hz,$\tau=0.1$ s,取$N=1$,$\sigma_w=1.1$ m/s;当$N=100$,$\sigma_w=0.1$ m/s。测量水平风速时,若$B_1=100$ Hz,$(B_1\gg B_2)$,取$N=1$,$\theta=60°$时,$\sigma_u=7.0$ m/s;当$N=100$,$\sigma_u=0.7$ m/s。σ_w和σ_u均随N增大而减小。本文给出的比较结果中,平均时间取作10或20 min,脉冲重复周期为4 s,相应的N为150或300。通常,测量平均风速、风向廓线时,取大的N值则误差小。若用声雷达研究某些短周期现象或分析湍流谱,N必需较小。注意到取$N=1$和$N=100$时,多普勒谱宽是不同的,前者明显小于后者。因此,单次测量($N=1$)的误差远小于上面给出的估计值。目前,我们缺乏大气中多普勒谱宽的资料,不能定量地给出实际的误差估计值。由于多普勒谱宽与风速大小、声束宽度等因子有关,如风速小时谱宽较窄。因此,在某些条件下,N较小或取$N=1$得到的风速是有代表性的。陈炎涓等[8]考虑了平均风速和有限声束宽度对测量垂直风速的影响,得出了对垂直风速的平均值和均方根差值的较简单的误差订正公式,其表达式为:

$$\bar{w}=\frac{u(z)\overline{u(z)}}{c} \tag{5}$$

$$\sigma_w=u(z)\frac{\alpha_0}{2} \tag{6}$$

其中$u(z)$为z高度上的风速,$\overline{u(z)}$是0—z高度之间的整层平均风速,c是声速,α_0是半声束宽度。公式表明,水平风速对声雷达测量垂直风速平均值产生的误差订正通常是正值,即声雷达测量的$\bar{w}$比实际垂直风速的平均值有偏正的趋势,且与风速大小成正比。这与图5中$\bar{w}$有正的偏高结果相吻合。此外,由(6)式及上述关于仪器的误差分析,可以说明声雷达测量的垂直速度均方根差大于超声风速仪的测量值。Brown等[5,6]分析了从声脉冲的发射声源到散射体的前向散射以及从散射体的后向散射到一个有限角度的接收天线,存在着由于大气中湍流运动而引起多谱勒回波信号谱的扩展。Brown的计算表明,声波传播过程中,后向散射对谱的扩展超过了前向散射对谱扩展的影响。谱的扩展与声束的角度有关,声束愈窄,由横向风速引起谱的扩展可以忽略。Brown的理论说明,由于湍流的影响,声雷达测量的σ_w或σ_u比直接测量值偏高。Leelananda and Mathews[12]讨论了对多普勒声雷达测量风速廓线的订正方法。上述理论分析可以部分地说明声雷达探测中产生的偏差,而对误差分析的理论有待进一步研究和更严格的实验论证。

从声雷达和直接测量仪器的比较结果看来,多普勒声雷达是研究边界层大气风场结构的有效探测手段,并能直接应用于军事、航空及环境保护等部门。

参 考 文 献

[1] Beran, D.W., and S.F. Clifford,"Acoustic Doppler measurement of the total wind vector" in preprints of the 2nd symposium on meteorological observations, 100—110, American Meteorological Society, Boston, Mass, 1972.

[2] 吕乃平、陈景南、郑月明、陈炎娟、李诗明、王援朝,多普勒测风声雷达,大气科学,6, No. 4, 1982。

[3] Gaynor, J.E., J.C. Kaimal and T.J. Lockhart, "Evaluation of wind parameters measured by four

acoustic Doppler system" Fifth symposium on meteorological observations and instrumentation, Toronto, April, 11—15, 1983.

[4] Spizzichino, A., Discussion of the operating condition of a Doppler Sodar, *J. Geophys. res*, **79**, 5585—5591,1974b.

[5] Brown, E.H., and S.F. Clifford, Spectral broadening of an acoustic pulse propagating through turbulence, *J. Acoust. Soc. Amer.*, **54**,36—39 1973a.

[6] Brown, E. H., Turbulent spectra broadening of backscattered acoustic pulses, *J. Acoust. Soc. Amer.*, **56**, 1398—1406,1974a.

[7] Brown, E.H., and S.F. Clifford, On the attenuation of sound by turbulence, *J. Acoust. Soc. Amer.*, **60**, 788—794,1976.

[8] 陈炎涓、吕乃平，"单点声雷达探测垂直速度的一种新的处理方法"，未发表。

[9] 李兴生、郑达洲，北京气象塔的平均场自动遥测系统，北京 325 米气象塔的测量系统，中国科学院大气物理所集刊第 11 号，1983。

[10] 周乐义、赵翼俊、刘复军、李德新，超声风速仪，同上，1983。

[11] Caughey, S.J., and B. A. Crease, A comparision of acoustic Doppler vertical velocities with direct measurements in the atmospheric boundary layer, *Nature*, **262**,No. 5566.1976.

[12] Leelanada, S.A., and T. Mathews, A method of correcting wind profiles, obtained using Doppler acoustic sounder, proceedings of the international symposium on acoustic remote sensing of the atmosphere and oceans, II-85, June, 22—25,1981.

A COMPARISON OF THE WIND MEASUREMENT BY A DOPPLER SODAR AND THE IN-SITU MEASUREMENTS

Lu Naiping　Li Shiming　Chen Yanjuan　Chen Jingnan
Zheng Yueming

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

In this paper the wind speed and wind direction are compared by Doppler Sodar and in-situ measurements on 325 m meteorological tower. When the ratio of signal to noise larger than 1, the mean wind speed and wind direction are correlated very well by the two methods, the profiles of wind speed and wind direction are close too. The mean value and root mean square of vertical velocity measured by Doppler Sodar are little bid larger than the value measured by sonic anemometer at 85 m height. The observational results are in correpondence with other four Doppler Sodar which compared with BAO tower measurements.

We noticed that there are some difference in the observational results between the Doppler Sodar and in-situ measurements, especially compared with the value measured by every times. Therefor it is important to analaze the reason for the difference measured by these two methods and to make correction for the Doppler Sodar.