

多普勒测风声雷达

吕乃平 陈景南 郑月明 陈炎涓

李诗明 王援朝*

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文简要地介绍了多普勒测风声雷达的基本原理和探测方法。指出用锁相技术可以较精确地测量多普勒频偏值。根据声雷达观测资料计算了水平风速、风向和垂直风速,并与325米气象塔上直接测量的仪器进行了比较。结果表明,两种方法测量的水平风速、风向的平均值比较接近,声雷达测量的垂直风速比塔上直接测量的结果略有偏高。用声雷达测量的水平风速、风向和垂直风速的方差都比直接测量的大。

我们用多普勒测风声雷达的连续观测资料,计算了垂直风速谱,得到了在对流边界层中垂直速度谱随高度的分布规律。在一定的频率范围内(低频部分)得到了功率谱 $\langle P(f) \propto f^{-1} \rangle$ 的规律,并将240米高度上用声雷达测量的垂直速度谱和直接测量的垂直速度谱进行了比较。

一、前 言

边界层大气中风速的测量对于大气湍流、大气扩散和污染等问题的研究是十分重要的。某些天气过程与低空风场的结构有着密切的联系。低空的风速切变对于飞行的安全有着直接影响。七十年代以来,遥感测风的技术得到了迅速的发展^[1-3]。其中,多普勒测风声雷达在气象、环境和军事部门得到了广泛的应用,它能实时地提供边界层大气中的风速、风向和风速廓线的资料。目前,在美国的一些国际机场和军用机场都设有多普勒测风声雷达测风系统。我们在对单点声雷达测温系统^[4]研制成功的基础上,进一步对多普勒测风声雷达进行了研制,取得了初步结果。在白天对流条件下,对垂直风速的探测高度可达500—600米,采用双点多普勒测风系统进行了水平风速、风向的测量,并和气象塔上直接测量的结果进行了比较。

二、基本 原 理

用声雷达向大气发射一个固定频率的声脉冲,由于大气中风的作用,产生了多普勒效应,使声雷达接收到的回波频率与发射频率产生频偏,多普勒频偏的大小直接与风速有

1981年5月4日收到初稿,1981年6月18日收到修改稿。

* 参加本工作的还有范锡安、曲绍厚、苏立荣、谢葆良、安磊明等同志。

普勒测风声雷达的主要技术参数。图 2 是多普勒测风声雷达的方框图。

表 1 多普勒测风声雷达主要参数

发射频率	2000 赫
发射功率	100 瓦 (电功率)
天线直径(垂直发射, 接收天线)	3.0 米
天线射束指向性	7° (半功率点)
脉冲宽度	100 毫秒
脉冲重复周期	4 秒
锁相环跟踪范围	±100 赫
锁相环噪声带宽	15 赫
锁相环捕获时间	80 毫秒

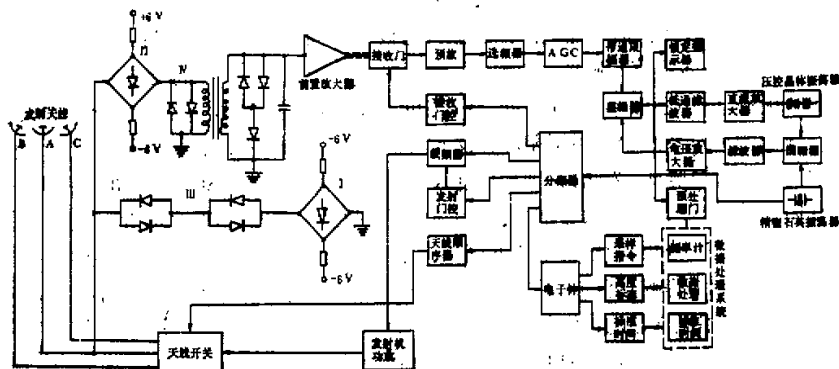


图 2 多普勒测风声雷达方框图

1. 天线系统 天线系统共有三个天线, 与图 1 中的天线布局相同。目前采用的两个侧向发射天线分别为 YH-100 1 型号筒式扬声器和由玻璃钢制成的圆锥形牛角天线。这两个侧向发射天线分别放置在垂直发射和接收天线的东面和北面。A 点为垂直发射并兼作接收的天线, 是一个直径为 3.0 米、焦距为 60 厘米的抛物面天线。

隔音围墙由三层材料组成, 最外层是圆筒形砖墙, 中间夹层由八块弧形玻璃板构成, 内层是 5 厘米厚的泡沫塑料。该围墙有良好的隔音吸音性能, 大大减小了环境噪声的影响。

2. 发射机 发射机由石英晶体振荡器、分频器、载频发生器、发射门控脉冲发生器、功率放大器和天线顺序开关等组成。水平风速的测量是采用时分制, 按照预定的工作程序由天线开关控制 A、B、C 三个点依次轮流发射, 相应两个点的发射时间间隔为 4 秒, 发射脉冲宽度为 100 毫秒, 三个点的发射频率为 2000 赫, 发射电功率为 100 瓦。

在天线开关中, 使继电器比发射脉冲早 1 秒吸合, 迟 0.8 秒释放, 避免继电器因颤抖等原因产生接触不良所造成的电蚀故障。

在垂直发射时, 因为收发共用一个天线, 必须防止发射大功率信号时损坏接收通道的器件, 因此在前置放大器中设有两个桥式自动开关 I 和 II, 低电平抑制器 III 和限幅器

IV。桥式自动开关因有固定偏置,接收时是导通的,但由于有低电平抑制器,接收的微弱回波讯号只能通过 II 进入升压变压器,然后进入接收通道。在发射时,强大的发射脉冲虽能通过低电平抑制器,但都使桥式开关反偏置而截止,信号越强,反偏越大,发射脉冲只能进入喇叭发射出来。

发射机的载频、脉冲宽度、时间间隔等均由数字电路对石英振荡器的高稳定频率分频获得,因此精度高。

3. 接收机 接收机包括前置放大器,预选放大器,选频放大器、自动增益控制器、锁相环等组成。

发射结束后,微弱的回波信号经桥式开关进入升压变压器,将信号提高 100 倍,然后进入增益为 100 倍的低噪声前置放大器,再通过数百米长馈线到达主机。

主机前端设有接收门、预选放大器。接收门在发射信号结束后 50 毫秒开启,在发射前 50 毫秒关闭,以保护信号通道。预选放大器设有双向限幅器和高阻输入级,总增益为 100 倍,为了进一步提高信噪比,在预选后面设有矩形系数好、带宽符合要求的勃特沃斯型选频放大器,其中心频率为 2000 赫,带宽 200 赫,矩形系数为 4, -50 分贝/倍频程。

在我们的测风系统中采用锁相测频法来检测频偏,因此,要求信号进入锁相环之前要有足够的幅度和信噪比,为此,在锁相环前设有自动增益控制器 (AGC), AGC 采用场效应管作变阻元件,控制运算放大器增益。为了扩大控制范围,采用二级 AGC 型,起控电压 30 微伏,控制范围 70 分贝,输出幅度 460 毫伏。信号进入锁相环之前,先经过带通限幅器,将回波信号整形为等幅正弦波,并与压控振荡器 (VCO) 输出的等幅正弦信号一起输入鉴相器,以保持鉴相器增益的稳定。

鉴相器由模拟乘法器 BG314 构成。低通滤波器是用运算放大器 FC54 构成的二阶有源低通滤波器。为了控制 VCO 中变容二极管的线性范围,直流放大器的输出采取双向限幅,这样, VCO 的电压-频率曲线较好。 VCO 是由一只频率为 5000 千赫的精密石英晶体振荡器 (ZGU-5) 和另一只同类型晶体振荡器改制成的,频率为 5002 千赫 ± 100 赫。通过混频器,得到差拍为 2000 赫 ± 100 赫的音频频率。载频为 2000 赫,由 5000 千赫晶振分频得到。

多普勒频偏值是通过测量两个晶振的差拍频率得到。在数据处理之前,设有预处理门,只有当锁相环锁定之后,才有差拍信号输出。

4. 数据处理 数据处理设有采样指令、高度标志、天线序号、标准时间等按照预定的逻辑程序输入记录器。采样指令控制频率计定时、定点采样。然后,将频偏值打印输出,打印时间间隔为 0.5 秒。

数据处理部分,今后我们将与微型计算机配合使用,以便得到实时风速、风向资料。

四、观测场地和观测方法

多普勒测风声雷达的观测实验工作是在北京市北郊 325 米气象塔观测场进行的。垂直发射和接收天线的声天线 A 与铁塔之间的距离为 250 米,两个侧向发射天线 B 和 C 分别在天线 A 的东面和北面,其布局与图 1 相同,侧向发射天线与垂直发射和接收天线之间

的距离为 175 米。

在气象塔的 15、47、140、240、320 米五个高度上安装有 Gill (螺旋桨) 风速仪, 起动风速为 0.3 米/秒。多普勒测风声雷达的发射脉冲宽度为 100 毫秒, 高度分辨率为 17 米, 由于打印机速度的限制, 打印的时间间隔为 0.5 秒, 相应的探测高度分别为 80、160、240、320、400、480、560 米。我们用单点多普勒测风声雷达测量的垂直风速与塔上直接测量的垂直风速进行了比较。

多普勒测风声雷达测量水平风速、风向时, 是通过天线开关, 每隔 4 秒按 A, B, C 三个天线依次轮流发射。根据垂直发射和倾斜发射的天线之间的水平距离和采样时间, 可以得到 125 米和 225 米两个高度上的风速、风向, 并分别与塔 120 米和 240 米两个高度上用转杯风速仪直接测量的风速、风向进行比较。

五、观测结果的初步分析

1. 垂直风速的测量 我们用塔上 140 米和 240 米高度上的垂直风速与声雷达测量的 160 米和 240 米两个高度上的垂直风速进行了比较, 结果列于表 2。其中垂直风速的平均值和均方差是在观测时段内, 由 5 次发射脉冲 (20 秒) 的平均值作为一次观测值, 再进行平均得出的。从表中可以看出, 声雷达测量的垂直风速平均值与 Gill 风速仪测量的平均值比较接近, 但略有偏高。

表 2 声雷达与塔上测量的垂直风速平均值和方差的比较 ($\Delta t = 20$ 秒)

观测时间 1980 年 10 月 28 日	垂直风速平均值 $\bar{w}$ (米/秒)				垂直风速方差 σ_w (米/秒)			
	$z = 240$ 米	$z = 240$ 米	$z = 160$ 米	$z = 140$ 米	$z = 240$ 米	$z = 240$ 米	$z = 160$ 米	$z = 140$ 米
12:16—13:17	0.22	0.16	0.46	0.25	0.30	0.16	0.51	0.30
14:00—15:00	0.35	0.32	0.30	0.14	0.46	0.33	0.53	0.44
15:01—15:43	0.40	0.18	0.32	0.12	0.48	0.23	0.49	0.29
三次平均	0.32	0.22	0.36	0.17	0.41	0.24	0.51	0.34

* A 代表声雷达测量, G 代表 Gill 风速仪测量。

2. 垂直风速谱 我们用单点声雷达的连续观测记录, 用 FFT 方法计算了垂直风速谱。以 240 米高度上的测量结果为例, 用多普勒测风声雷达和塔上直接测量的垂直风速谱进行了比较, 如图 3。用两种方法测量的垂直风速谱的变化趋势比较相近, 但在频谱分布图上出现峰值和谷值的频率稍有差异。另外, 用声雷达测量的能谱值, 比用 Gill 风速仪测量的能谱值高。这与前面分析的 $\bar{w}_R > \bar{w}_G$, $\sigma_{wR} > \sigma_{wG}$ 的结果一致。对于这一差异产生的原因有待进一步的比较和分析。

在对流条件下, 我们用多普勒测风声雷达测量了垂直风速谱随高度的分布, 如图 4 所示。能谱是由 $\Delta t = 20$ 秒 (5 次声脉冲的平均) 的垂直风速资料计算得到的。图中给出了 1980 年 10 月 28 日 12:16—13:07, 15:01—15:43 二次在对流条件下测量的垂直风速平均能谱的分布。在 80、160、240 米三个高度上, 能谱的峰值频率分别为 4.0×10^{-1} 赫、

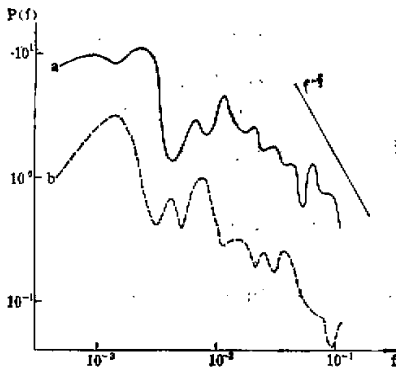


图3 声雷达和直接测量的垂直风速谱的比较
(1980年10月28日12:16—13:07, $z = 240$ 米
 $\Delta t = 4$ 秒, (a) 声雷达; (b) Gill 风速仪)

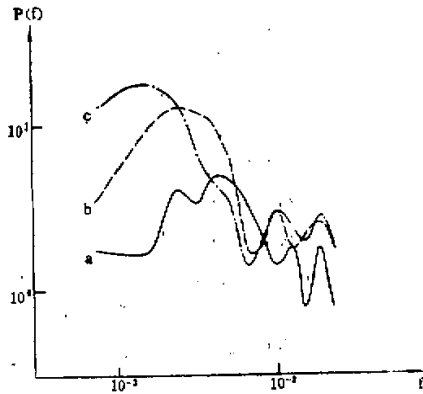


图4 垂直风速谱随高度的分布
(1980年10月28日二组平均)
(a) 80 米; (b) 160 米; (c) 240 米

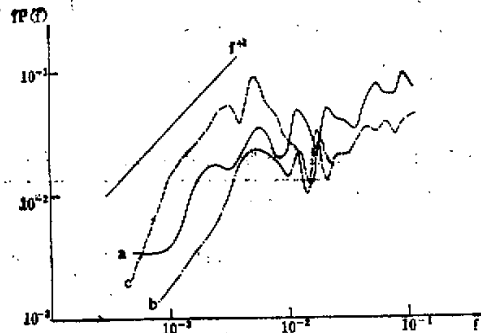


图5 声雷达测量的功率谱分布图 ($z = 81$ 米)

(a) 1980年10月28日, $\Delta t = 4$ 秒; (b) 1980年10月28日, $\Delta t = 20$ 秒;
(c) 1980年7月14日, $\Delta t = 4$ 秒.

2.4×10^{-3} 赫、 1.5×10^{-3} 赫, 相应的时间尺度为 4.2 分、6.9 分、11.1 分钟。在垂直速度谱的分布中, 通常存在着一个能谱的峰值频率, 它主要反映了边界层大气中的对流运动。从图 4 中还可以看出, 在对流边界层中, 垂直速度谱的峰值频率随着高度的增加向低频方向移动, 并且其能量随高度增加。这种变化规律与 Kaimal^[6] (1976) 以直接测量得出的结果基本上一致。此外, 我们在图 5 中给出了 80 米高度上声雷达测量的垂直速度功率谱 $P(f)$ 的分布图。从图中可以看出, 对于采样时间间隔为 4 秒和 20 秒 (5 次声脉冲平均) 的计算结果, 当频率小于 6×10^{-3} 赫时, 功率谱 $P(f)$ 近似与 $f^{-5/3}$ 成正比。Neff 和 Jr. Hall^[9], 也得到了这一分布规律。需要指出, 在对流边界层中, 功率谱 $P(f) \propto f^{-5/3}$ 适用的范围随高度有变化, 一般是出现在对能量贡献较大的峰值频率以下, 对于这一规律的普遍性需要更多的观测资料来加以验证。

3. 水平风速、风向的测量

如前所述, 水平风速、风向的测量是每隔 4 秒, 由天线开

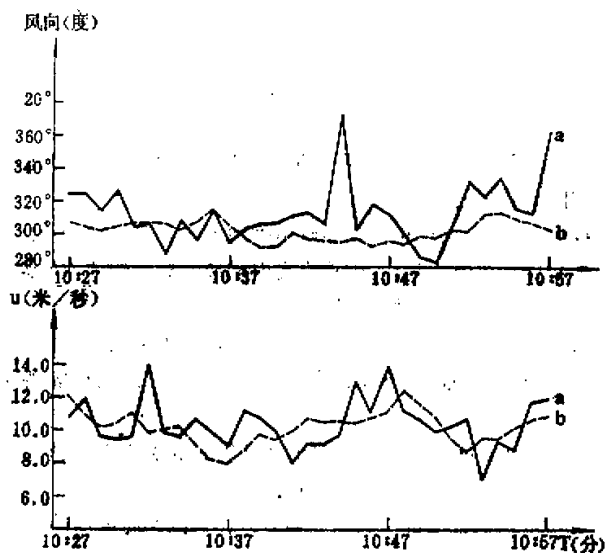


图 6 水平风速、风向的时间变化曲线
(a) 声雷达 (125 米); (b) 铁塔 (120 米)

关控制,按 A, B, C 三个点依次轮流发射,由于时间不一致,在 A 点接收到 B, C 两点的多普勒频偏不是二个声束相交的散射体的回波,而是相隔 4 秒的散射体的回波。我们假定,在短时间内,移过声雷达天线的气块是均匀的,其湍流统计特性是相同的。

图 6 是 1980 年 11 月 24 日 10:27—10:57 声雷达测量的风速、风向和塔上转杯风速风向仪测量的风速、风向的时间变化曲线。从图中看出,两种方法测量的风速、风向随时间变化的曲线比较接近,其风速平均值 $\bar{u}_s = 10.1$ 米/秒, $\bar{u}_t = 10.3$ 米/秒,塔上和声雷达测量的平均风向分别为 306 度和 319 度。直接测量的风速、风向随时间的变化较为平缓,其方差分别为 1.02 米/秒、5.7 度,而声雷达测量的风速、风向随时间的变化起伏较大,方差分别为 1.47 米/秒、18.8 度。图 7 给出了 225 米高度上用两种方法测量的 30 分钟平均风速的比较。其回归方程为

$$\hat{u}_s = -0.19 + 0.98 u_t,$$

相关系数为 $r = 0.80$, 实测值 u_s 与回归方程计算值 $\hat{u}_s$ 的均方差为 0.73 米/秒。由此可见,用声雷达测量的水平风速和转杯风速仪测量的水平风速的平均值比较接近,但方差比

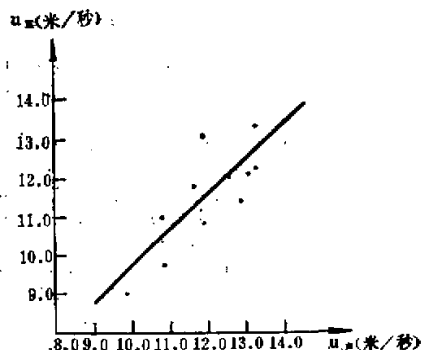


图 7 声雷达和直接测量的水平风速比较
($z = 225$ 米, 1980 年 11 月 24 日 10:27—16:30)

直接测量的大。

六、结 束 语

我们目前设计的多普勒声雷达测风系统是遥感探测边界层大气的有效手段。综上所述,可以得到如下几点初步结论:

1. 在声雷达探测系统中,用锁相技术能够精确地测量多普勒频偏值。在该系统中,用侧向发射天线发射相同频率的声脉冲,由垂直发射和接收的天线依次轮流接收的方法,也能够较好地测量水平风速、风向和垂直风速。

2. 声雷达测量的水平风速、风向和塔上转杯风速仪的测量结果比较接近,在 225 米高度上,两种方法测量的相关系数为 0.80,声雷达测量的垂直风速比直接测量的垂直风速略为偏大。

3. 由多普勒测风声雷达和塔上直接测量的风速得到的能谱变化趋势基本上一致,并能较好地反映出边界层大气中能谱分布的特征。

4. 多普勒测风声雷达可以测量风向脉动的方差,可以为研究污染物的扩散问题提供有效的参数。

我们的工作还是初步的,取得的资料也有限,今后,将进一步完善多普勒声雷达测风系统,提高信噪比,并与数据处理系统配套使用,以便得到实时的风速、风向资料。

致谢: 本文得到周明煜同志的指导和帮助,在计算能谱的工作中,得到王立治同志的热情帮助,特此感谢。

参 考 文 献

- [1] Beran, D. W., and Cliford, S. F., Acoustic Doppler Measurements of the Total Wind Vector. In Preprints of the 2nd Symposium on Meteorological Observations, pp. 100—110. American Meteorological Society, Boston, Mass., 1972.
- [2] Beran, D. W., Remote Sensing Wind and Wind Shear System, Rep. FAA-RD-74-3, 115 pp. Dep. of Transp., Washington, D. C., 1974.
- [3] Balser, M., McNary, C. A., Nagy, A. E., Loveland, R. and Dickson, D., Remote Wind Sensing by Acoustic Radar, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 15, p. 50—58, 1976.
- [4] Kaimal, J. C., and Weselott, J. W., An Acoustic Doppler Sounder for Measuring Wind Profiles in the lower Boundary Layer, In Preprints of the 17th Radar Meteorology Conference, pp. 290—296, American Meteorological Society, Boston, Mass., 1976.
- [5] Spizzichino, A., Discussion of the Operating Conditions of a Doppler Sodar, *J. G. R.*, Vol. 79, No. 36, 1974.
- [6] 大气物理研究所声雷达组,“单点声雷达与边界层大气探测”,大气科学,1976年第1期。
- [7] Beran, D. W., Little, C. G. and Willmarth, B. C., Acoustic Doppler Measurements of Vertical Velocities in the Atmosphere, *Nature*, 230, p. 160—162, 1971.
- [8] Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Haugen, D. A., Coté, O. B. and Isami, Turbulence Structure in the Convective Boundary Layer. *J. of the Atmospheric Sciences*, Vol. 33, No. 11, p. 2152—2169, 1976.
- [9] Neff, D. W., and Hall Jr., F. F., Acoustic Remote Sensing of the Planetary Boundary Layer at the South Pole, Fourth symposium on meteorological observation and instrumentation, p. 357—361, American Meteorological Society, 1978.

ACOUSTIC DOPPLER RADAR FOR MEASURING WIND

Lü Nai-ping Chen Jin-nan Zhen Yue-ming
Chen Yen-juan Li Shi-ming Wang Yuan-chao et al.

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

In this article the fundamental principle and detecting method of acoustic Doppler radar for measuring wind are briefly discussed. The phase-locking technique can measure the Doppler frequency shift precisely. Using the observation data of acoustic Doppler radar, the horizontal velocity, wind direction and vertical velocity are calculated and compared with those obtained by direct measurement on the tower. The results show that the mean value of horizontal velocity and wind direction are close, but the vertical velocity detected by acoustic Doppler radar is slightly greater than that measured by direct measurements.

Based on the continuous observation data measured by acoustic radar, the spectrum of vertical velocity are calculated. At the height of 240 meter, the spectra of vertical velocity obtained by these two methods are compared. In a convective boundary layer, the distribution of energy spectrum of vertical velocity with height is obtained. In lower frequency range the power spectrum distribution fits the law of $fp(f) \propto f^{-1}$.