

声雷达的相关方法测风

周明煜 曲绍厚

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文提出了声雷达相关原理的测风方法。对声雷达相关原理测风进行了试验并和实际测风进行了比较,事实表明,这两种测风方法得到的结果很接近。

一、引 言

声雷达问世于六十年代末,近几年来,澳大利亚、美国、日本、加拿大、英国、法国、西德、瑞典和苏联等二十多个国家先后开展声雷达的研制工作,并广泛地把声雷达用于大气边界层探测、海洋和极地的考察、空气污染的预报、大气传输以及危险天气预测等等。

使用声雷达研究低层大气的温度结构已有很多工作。在声雷达测风方面, Beran^{[1][2][3]}等人利用多普勒原理给出大气不同高度的风速。最近 Davey^[4]利用相干多普勒声雷达给出实时风速廓线,此外也有人^[5]利用到达角技术探测低层大气的风速。利用相关原理的声雷达测风方法至今尚未见到正式报导。Fisher 和 Krause^[6]曾在实验室内利用光学相关技术测量风向已知的风速,得到较好的结果。但这种方法应用到实际大气探测还处于试验阶段,而且要求探测设备也比较复杂。本文是从单点声雷达回波强度的相关函数出发,计算出实际大气的风速分布。

二、探 测 原 理

Taylor^[7]曾指出,在空间某一点的湍流特征随时间的变化,可以近似地认为沿平均风方向上游的湍流按平均风速通过该点造成的。这些湍流的特征在按平均风速输送过程中是不变的,即所谓是“凝固的”。在大气中的一般情况下,“凝固湍流”的假定基本上是能得到满足的,并得到观测证明^[8]。根据这一假定,某一流体力学特征量在与平均风向平行的直线上、间距为 $r = |\mathbf{r}|$ 两点的空间相关函数 $B(r, Z)$ 与其中一点的时间相关函数 $b(\tau, Z)$ 之间满足下列关系式,

当 $r = \bar{u}\tau$ 时,有

$$b(\tau, Z) = B(r, Z) = B(\bar{u}\tau, Z) \quad (1)$$

式(1)中 $\bar{u}$ 是平均风速, Z 是高度。

1978年4月11日收到修改稿。

* 参加本工作还有吕乃平、陈炎洞、苏立荣、严邦良等同志。

对于局地各向同性的干洁大气,声波的散射公式可以写成^[9]

$$\sigma(\theta) = 2\pi k^4 \cos^2\theta \left[\frac{E(K)}{C^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{\Phi(K)}{4T^2} \right] \quad (2)$$

对于发射天线和接收天线在一起的单点声雷达, $\theta = 180^\circ$, (2)式简化为

$$\sigma(180^\circ) = \frac{\pi k^4}{2T^2} \Phi(K) \quad (2')$$

式(2)中 $\sigma(\theta)$ 是单位体积、单位立体角、单位入射功率、在散射角 θ 方向上的散射截面, $K = 2k \sin \frac{\theta}{2}$, k 是发射声波波数, $k = 2\pi/\lambda$ (λ 为发射声波波长), $E(K)$ 是风速脉动谱函数, $\Phi(K)$ 是温度脉动谱函数, C 是声速, T 是散射体内平均绝对温度。

声雷达接收到的高度为 Z 的回波讯号强度 $I(Z, t)$ 可表示为

$$I(Z, t) = \frac{I_0}{Z^2} \sigma \cdot e^{-2\alpha Z} \cdot \beta \quad (3)$$

式中 I_0 是声雷达发射的声脉冲强度; α 是大气对声波的平均吸收系数, 在声雷达探测平均风的几分钟内, 大气状态可以认为变化不大, 视其为常数; β 是声雷达系统常数, 随仪器特性而异。

高度 Z_1 和 Z_2 上回波讯号强度间的空间相关系数 $B(r')$ ($r' = Z_2 - Z_1, Z_2 > Z_1$) 为

$$B(r') = \frac{\overline{I'(Z_1, t)I'(Z_2, t)}}{\sqrt{\overline{I'^2(Z_1, t)}}\sqrt{\overline{I'^2(Z_2, t)}}} \quad (4)$$

式中 $I'(Z, t) = I(Z, t) - \overline{I(Z, t)}$, 字母上横线表示求统计平均, 把 (2')、(3) 式稍加变换代入(4)式后得

$$B(r') = \frac{\overline{\Phi'_{Z_1,t}(K)\Phi'_{Z_2,t}(K)}}{\sqrt{\overline{\Phi'^2_{Z_1,t}(K)}}\sqrt{\overline{\Phi'^2_{Z_2,t}(K)}}} \quad (5)$$

其中

$$\Phi'_{Z,t}(K) = \Phi_{Z,t}(K) - \overline{\Phi_{Z,t}(K)}$$

同理高度 Z_1 的回波讯号强度的时间相关函数为

$$\begin{aligned} b(\tau, Z_1) &= \frac{\overline{I'(Z_1, t)I'(Z_1, t+\tau)}}{\sqrt{\overline{I'^2(Z_1, t)}}\sqrt{\overline{I'^2(Z_1, t+\tau)}}} \\ &= \frac{\overline{\Phi'_{Z_1,t}(K)\Phi'_{Z_1,t+\tau}(K)}}{\sqrt{\overline{\Phi'^2_{Z_1,t}(K)}}\sqrt{\overline{\Phi'^2_{Z_1,t+\tau}(K)}}} \end{aligned} \quad (6)$$

从(2')、(3)、(4)、(5)和(6)式, 可以看出单点声雷达的回波讯号强度反映了大气温度的脉动的能谱特性; 而其空间相关函数 $B(r, Z)$ 和时间相关函数 $b(\tau, Z)$ 则反映了温度脉动能谱起伏的空间相关和时间相关。

在惯性区域内, 大气湍流场满足各向同性的假定, 因而湍流场的统计特征量与方向无关。所以只要 Z_1 和 Z_2 之间的距离 r' 不超过惯性区域的尺度范围, 就可以认为 Z_1 和 Z_2 之间的空间相关系数 $B(r')$ 和高度 Z_1 上与平均风向相平行的方向上相距为 r' 的空间相关系数数值相等。

空间相关函数 $B(r, Z)$ 和时间相关函数 $b(\tau, Z)$ 都可以从单点声雷达回波讯号强度资料算出。对于某一确定的 r_0 值, 其空间相关系数是一确定的值, 因而从时间相关函数 $b(\tau, Z)$ 中总可以找到 $b(\tau_0, Z)$ 使得

$$b(\tau_0, Z) = B(r_0, Z) \quad (7)$$

于是高度 Z 上的, 在观测时间内平均风速 $\bar{u}$ 就可以从下式计算出

$$\bar{u} = r_0 / \tau_0 \quad (8)$$

三、实验结果

为了验证上述相关测量风速方法的可靠性, 我们使用垂直向上发射的单点声雷达作了初步实验。声雷达的抛物面反射体的直径为 1.5 米, 发射与接收采用同一个电功率为 100 瓦的扬声器, 并置于反射体的焦点处。为防止环境噪声的干扰, 在反射体的周围装有隔声装置, 组成了声雷达的天线系统。声雷达的工作频率为 1588 周/秒, 发射声脉冲宽度为 100 毫秒, 相应的高度分辨率为 17 米, 盲区约为 34 米, 脉冲的重复周期为 4 秒。声雷达回波讯号经过测量放大器和选频放大器后, 用示波器显示, 再用示波照相机每隔 4 秒钟拍摄一次回波显示讯号。图 1 是回波讯号强度—高度照片, 从照片上可以得出不同高度上的回波讯号强度。

做测风试验时, 根据需要, 每一组我们拍摄一百余张回波强度照片。为了进行对比, 在声雷达的观测期间, 施放单点小球测风, 得出风速廓线, 小球升速为 200 米/分, 每隔 10 秒得出一个风速值。此外, 在声雷达天线附近, 用热球风速仪测量风速, 每隔 20 秒左右读一次风速值。

声雷达的高度分辨率为 17 米, 盲区约为 34 米, 因此我们从回波照片中读取高度 34 米、51 米和 68 米上回波讯号强度, 据此得到回波强度的时间序列 $I(34\text{米}, t)$, $I(51\text{米}, t)$ 和 $I(68\text{米}, t) \dots \dots$ 。在我们试验的资料中, 更高的高度上, 有时讯号强度太弱, 不易读出数据, 因而不能得到连续的时间序列, 所以我们没有选用。当然只要提高系统的信噪比(这一点是可以做到的), 探测高度还会提高。根据公式(4)和(6), 利用 DJS-121 计算机, 计算了 $I(34\text{米}, t)$ 和 $I(15\text{米}, t)$ 的时间相关函数 $b(\tau, 34\text{米})$ 和 $b(\tau, 51\text{米})$; 也计算了 $I(34\text{米}, t)$ 和 $I(51\text{米}, t)$ 、 $I(51\text{米}, t)$ 和 $I(68\text{米}, t)$ 之间的空间相关系数 $B_{51-34}(r_0)$ 和

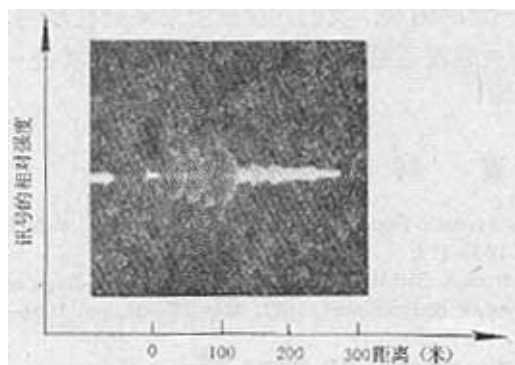


图 1 声雷达回波讯号强度的示波照片

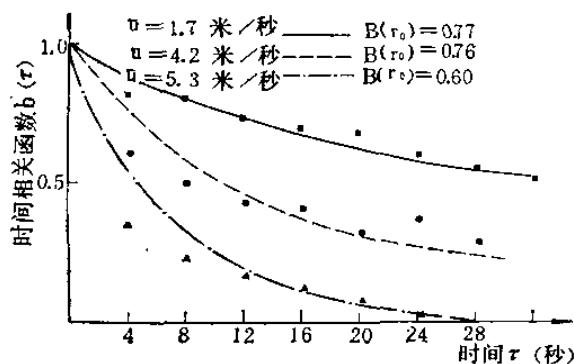


图 2 不同风速下回波讯号强度的时间相关函数。

$B_{ss-n}(r_0)$, 其中 $r_0 = 68 - 51 = 51 - 34 = 17$ (米)。图2是声雷达回波讯号强度的时间相关函数的实例, 从图上可以清楚看出 $b(\tau)$ 开始随 τ 增大下降较快, 以后逐渐减慢, 风速大时, $b(\tau)$ 随 τ 增大的下降速度比风速小时来得快些。

从上述计算中得到空间相关系数数值以后, 再从时间相关函数 $b(Z, \tau) - \tau$ 图上选取 $b(Z, \tau_0)$ 使其满足 $b(Z, \tau_0) = B(r_0)$ 。由此定出 τ_0 值, 那么 34 米到 51 米间或 51 米到 68 米间的平均风速为 $\bar{u} = r_0/\tau_0$ 。在不同风速条件下, 我们共做了八组试验, 并同直接测风的结果进行了比较。

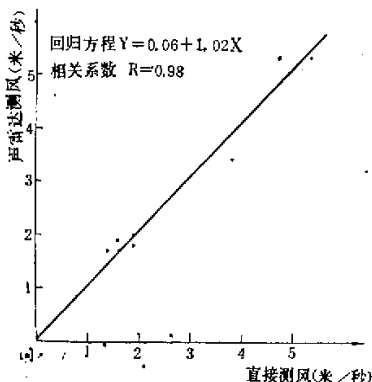


图3 同高度下声雷达测风和直接测风回归比较图。

由于小球测风读数高度与声雷达相关测风高度不一致, 我们用内插法获得与声雷达相关测风同高度的实际风资料。图3是直接测风与声雷达测风结果的回归比较图, 从图中可以看出, 两种方法得到的结果比较接近, 相关系数高达 0.98。

上述试验结果说明声雷达相关测风方法是可行的。这种方法的优点是设备简单, 只用一部声雷达就可以进行测风。然而用相关方法得到的是平均风速, 它不像多普勒原理测风可以得出瞬时风速值。由于单点声雷达相关测风是利用回波强度的时间序列资料计算的, 所以原则上只要能收到回波, 就可以计算风速, 声雷达收到回波高度能

达到多高, 相关法测风的高度就可以达到多高。但是, 单点声雷达接收后向散射强度决定于大气温度脉动谱值, 当大气层结接近于中性时, 后向散射强度很小, 甚至收不到回波讯号, 对于这种层结, 就不能用相关法进行测风了。有时, 在某些高度上大气温度层结在中性附近变化, 所得到的回波讯号随时间的变化有中断现象, 这时用相关方法计算风速会发生困难。当然如果利用接收侧向散射的双点声雷达系统, 就可以避免上述单点声雷达相关测风的缺点。因为侧向散射决定于大气风速脉动谱和温度脉动谱值, 所以一般说来侧向散射比后向散射强得多, 而且在中性层结时也可以接收到讯号。如果用双点声雷达测风, 可应用的气象背景条件范围比单点声雷达宽很多。由于双点声雷达收到回波的高度比单点声雷达要高, 所以双点声雷达相关测风高度相应地也可以提高。当然若出现降水等恶劣天气条件时, 目前应用声雷达探测还有一定的困难。我们这次试验结果是初步的, 主要是验证相关方法测风的可靠性。原则上相关原理还可以测定风向, 今后我们将进一步研究, 以使声雷达相关测风方法不断完善。

参 考 资 料

- [1] D. W. Beran, C. G. Little and B. C. Willmarth, Acoustic Doppler Measurement of Vertical Velocities in the Atmosphere, *Nature*, 1971, 230, pp. 160—162.
- [2] D. W. Beran, B. C. Willmarth, Doppler Wind from a Bistatic Acoustic Sounder, *Proceedings of Seventh International Symposium on Remote Sensing Environment*, 1971, May 17—21, pp. 1694—1714.
- [3] D. W. Beran, Remote Sensing Wind and Wind Shear System AD 779085.
- [4] R. F. Davey, A Coherent Acoustic Doppler Radar from Real-Time Wind Measurement., 17th

- Conference on Radar Meteorology, October 26—29, 1976, p. 270.
- [5] A. R. Mahoney, L. G. McAllister, The Remote Sensing of Wind Velocity in the Lower Troposphere Using an Acoustic Sounder, *Boundary—Layer Meteorology*, 1973, Vol. 4, p. 155.
- [6] M. J. Fisher, F. B. Krause, The Crossed-Beam Correlation Technique, *Journal of Fluid Mechanics*, 1967, Vol. 28, No. 4, pp. 705—717.
- [7] G. I. Taylor, The Spectrum of Turbulence, *Proc. Roy. Soc.*, A164, 1938.
- [8] Л. Р. Цванг, Некоторые Характеристики Спектров Температурных Пульсации в Пограничном Слое Атмосферы, *Изв. Академии Наук СССР. Сер. геоф.*, 1963, № 10.
- [9] М. А. Каллистратова, Экспериментальное Исследование Рассеяния Звуковых Волн в Атмосфере, Труды Института Физики Атмосферы Академия Наук СССР. Атмосферная Турбулентность, 1962, № 4, pp. 203—256.

CORRELATION METHOD FOR MEASURING WIND BY ACOUSTIC RADAR

Zhou Ming-yu Qu Shao-hou

(*Institute of Atmospheric Physics Academia Sinica*)

ABSTRACT

A correlation method for measuring wind by acoustic radar was proposed here. We carried out experiments of measuring wind by acoustic radar and made comparisons between the winds measured by the method mentioned above and those by pilot balloon. The reasonable agreement between results obtained by these two methods was shown in above comparisons.