

多普勒声雷达回波频谱的数字特征及其提取

潘 乃 先

(北京大学地球物理系)

提高多普勒声雷达的测量精度,从信号中提取更多信息可使其潜力得以发挥。提取频谱二阶矩可获得有关湍流的信息,对于研究混合层的发展、重力波的演变等是有意义的。但横风对后向散射声信号的谱宽有较大影响^[1]。噪声是另一个麻烦。本文给出一种改善的参数估计法和试验结果,效果较好。

一、后向散射多普勒谱的物理意义

我们知道,后向散射是由半波长的温度起伏所产生^[2]。这种尺度的温度湍块是散射体积内的散射体,它可当作散射实体来讨论^[1]。按文献[3]有

$$\Delta f = \frac{2}{\lambda} \bar{v}, \quad (1)$$

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{2}{\lambda}\right)^2 \int_0^\infty (v - \bar{v})^2 W(v) dv, \quad (2)$$

式中 $W(v)$ 是散射体的速度分布密度。可见,一阶矩 Δf 代表平均速度,二阶矩 σ_f^2 代表湍流能量。

二、单个声脉冲回波谱的参数估计

我们讨论离散谱。如湍块速度是正态分布、强度和速度相互独立,按点估计法可写出

$$M_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^N U_i} \sum_{i=1}^N i U_i, \quad (3)$$

$$\sigma_c^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N U_i} \sum_{i=1}^N U_i (i - M_c)^2, \quad (4)$$

式中 M_c 和 σ_c^2 分别是一、二阶矩的估计值, U_i 是第 i 频道的信号电压, N 是总频道数。相邻两频道的频差已归一。

在参数估计之前信号需要预选。我们发现大多数回波谱型是接近正态的,因此用连续正态分布函数求拟合离散谱:

本文 1984 年 9 月 25 日收到。

$$U'_i = \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i-M_c)^2}{2\sigma_c^2}} \cdot \sum_{i=1}^N U_i, \quad (5)$$

式中 M_c 和 σ_c^2 由 (3)、(4) 式求得。噪声的频率对估计影响很大。我们把偏离正态分布的那一部分信号当作等效噪声，取拟合谱和原始谱之间的加权均方根误差 SD_w 作为拟合好坏的度量。

$$SD_w = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[(U_i - U'_i) (i - M_c)^2 / \sum_{i=1}^N U_i \right]^2}, \quad (6)$$

SD_w 愈小，参数估计愈好。用经验参数

$$Q_s = SD_w \cdot \sigma_c, \quad (7)$$

度量原始信号的质量。 Q_s 与信噪比是反相关的。选定 Q_s 的临界值(本文 $Q_s = 5$)作为取舍标准。

筛选后的信号仍须通过迭代过程逐步减少噪声才能得到较好的参数估计值。简要步骤如下：

1. 找出频谱峰值。用峰值两侧各 10—15 个频道的数据，按 (3)、(4) 式求得参数估计值。
2. 将 M_c 和 σ_c 代入 (5) 式求拟合谱。
3. 按 (6) 式求出 SD_w 。若 SD_w 大于所选判据则随后的步骤进行下去，否则本次之参数估计值就被接受。
4. 若 $U_i > U'_i$ 则对于距平均值所在频道 $\pm(7-K)$ 的频道之外的 U_i 用 U'_i 代替。 K 表示已迭代次数。
5. 回到步骤 1。

经此迭代过程，参数估计大为改善。为进一步减少估计的偶然误差并增强代表性需再作时间平均。

三、人造资料的试验结果

用 (5) 式可得一系列离散正态谱，每个频道上再叠加上随机数作为噪声构成人造谱。我们取总共 31 个频道的噪声电压总和与信号电压总和之比为噪信比。用上节方法作参数估计，结果不错。图 1 给出谱标准差的相对误差与噪信比的关系，所显示的离散性比迭代前大大改善，且取正和负误差的概率接近。预期取平均后误差会更小。表 1 给出这样的比较。

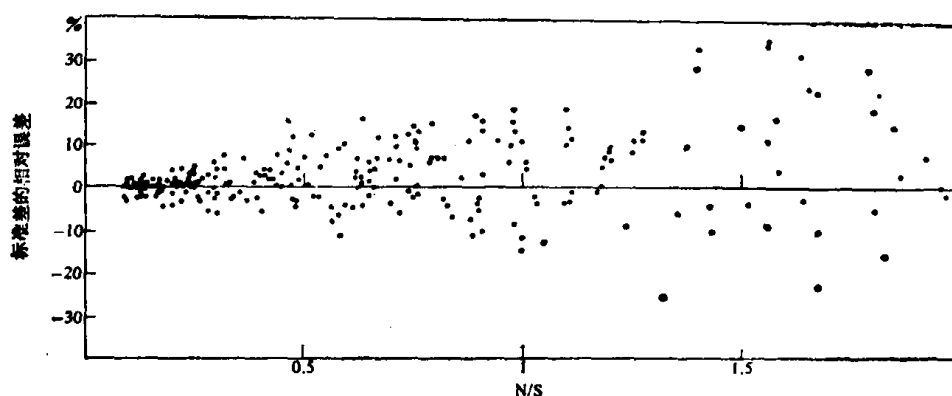


图 1 对人造谱用参数迭代估计法所得标准差的相对误差

表1 参数迭代估计法用于人造谱的效果比较

频谱数	预设风速 (米/秒)	预设标准差	N/S 的范围	N/S 平均值	平均标准差的相对误差		平均风速误差 (厘米/秒)
					迭代前%	迭代后%	
20	1.3	2.4	0.2—1.2	0.5	14.9	0.9	6
20	1.3	2.0	1.1—2.2	1.5	51	5	4

四、回波资料的处理结果

所用原始资料系墨尔本大学物理系提供。结果表明单个谱的标准差的平均值和平均谱的标准差都能反映大气的湍流状态。因为后者含尺度更大的湍能故数值较大。图2给出两层大气的谱平均的和垂直风速的标准差曲线及水平风速曲线。120—300米有7个取样高度，300—600米有10个。每一点是相应层内各高度上数值在15分钟内的平均值。低层曲线反映出垂直湍流从8:30起40分钟内增强很快，9:10至10:50增长速率明显减慢。此期间风速无大变化。之后， σ_z 变化趋势和水平风速相近。18时后垂直湍流一般要减弱，但因水平风速增大谱宽反而加宽。垂直风速的标准差和谱标准差的变化趋势大体一致，显示前者也在某种程度上受横向风速的影响。高层曲线在12:52前也反映湍流加强，相对低层有位相落后。两层 σ_z 的变化在热力因子减弱和消失后与水平风速变化趋势较吻合。

为求频谱展宽系数，假定频谱展宽和横向风速成线性关系。以夜间静风时的谱宽为发射脉冲谱宽。依据夜间不同风速时测到的谱宽扣除发射脉冲谱宽之后和相应的水平风速值求得

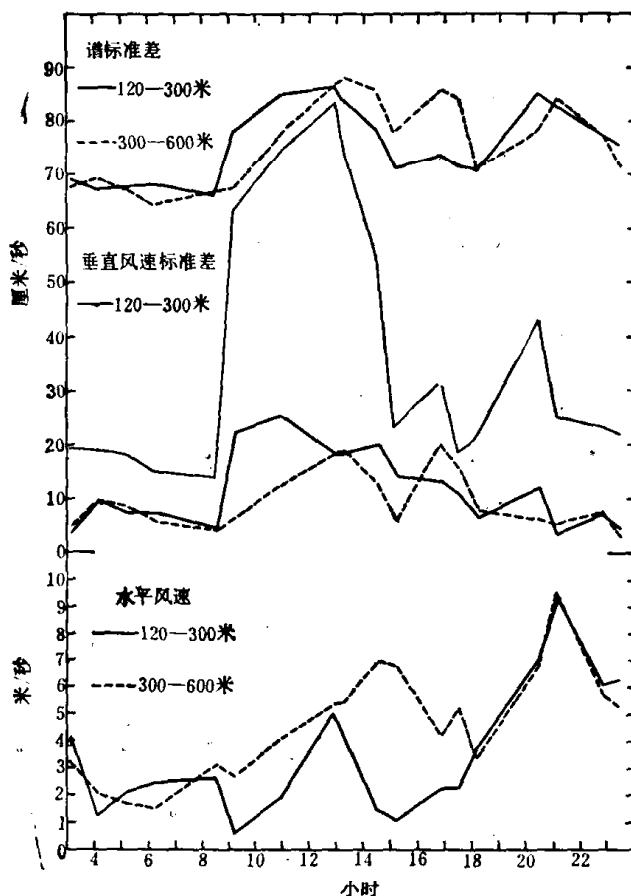


图2 谱、垂直风速标准差和水平风速的日变化

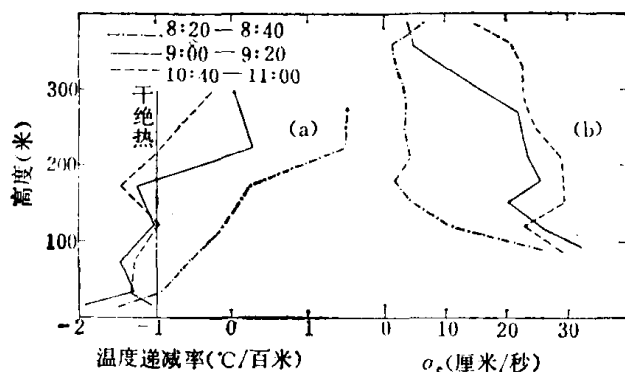


图 3

(a) BAO 铁塔资料 (1979. 8.27, Boulder);

(b) 订正后谱标准差廓线

经验系数 $\Delta\sigma_e/u = 0.027$ 。依此作风速效应订正后的曲线画在图 2 中部。现在热力因子对湍流的影响更清楚了, 由横向风速造成夜间湍流极强的错误印象消除了。短时间内或同一时间垂直分布上因不大的风速变化所造成的 σ_e 误差也正好消除了。图 3 画出上午的三条温度递减率廓线和订正后的 σ_e 廓线。递减率廓线的特征, 特别是 9:10 以后的 40 分钟, 反映了热力因子形成的很不稳定层结促使湍流发展, 强烈的湍流混合作用又反过来削弱原来的不稳定性。这些机制在 σ_e 廓线上也有反映。

五、小 结

横向风、噪声和径向湍流都使后向散射谱变宽, 故用实测谱研究湍流有很大的不确定性。用(7)式判据筛选原始信号, 再用本文之迭代估计法可获得较可靠的平均值和标准差。这对研究大气垂直运动和湍流是有价值的。若增加脉冲重复频率会使廓线更平滑和有代表性。垂直风速的标准差在一定的程度上也反映湍流, 但显得也受横向风影响。注意这点也许是有意义的。

致谢: 作者感谢在墨尔本大学期间 Dr I. Bourne 的有益讨论和 Dr O. Mace、Mr G. Holloway 和 Mr G. Robinson 的帮助。

参 考 文 献

- [1] Brown, E. H., *J. Acoust. Soc. Am.*, **56** (1974), 1398.
- [2] Monin, A. S., *Sov. Phys. Acoust. Eng. Trans.*, **7** (1962), 370.
- [3] 李其琛, 潘乃先, *大气科学*, **3**(1979), 1: 58.