

C_N^2 剖面的声雷达探测与直接测量

陈炎涓 李诗明 吕乃平

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文简要叙述了 C_N^2 的声雷达探测方法和直接测量的计算方法,给出在稳定和不稳定条件下用单点声雷达推得 $C_{N,s}^2$ 剖面。

在 80 和 140 米两个高度的 $C_{N,s}^2$ 与 $C_{N,d}^2$ 进行比较,结果指出, $C_{N,s}^2/C_{N,d}^2$ 的比值与声折射率谱的斜率差异有关。最后还对谱形及其对 $C_{N,s}^2/C_{N,d}^2$ 比值的影响作了初步讨论。

一、引 言

从声雷达回波强度来推算大气结构系数剖面,是声遥感探测大气应用中重要课题之一。为了定量探测,国内外在声回波探测与直接测量的对比研究和对声遥感定量探测的影响研究,都已做过一些有意义的工作^[1-5]但声遥感定量探测工作尚未很好解决,还需要进行深入研究。例如,非均匀各向同性大气湍流的谱形问题对定量探测影响这方面的工作就很少见。本文根据声回波和温湿脉动观测资料,就声折射率谱形与 $C_{N,s}^2/C_{N,d}^2$ 比值的和声雷达探测的 $C_{N,s}^2$ 垂直分布问题进行了初步分析。最后对在对流条件下的谱形及其对对比测量比值的影响作了初浅的叙述。

二、探测原理与仪器设备

单点声雷达探测方程可写成:

$$P_r = P_t \eta_r \eta_e e^{-2\alpha h} \left[\sigma(180^\circ) \frac{c\tau}{2} \frac{A}{h^2} G \right] \quad (1)$$

式中 P_r 是接收电功率, P_t 是发射电功率, η_r 和 η_e 分别是接收声-电转换系数和发射电-声转换系数, c 是声速, τ 是发射脉冲宽度, A 是天线接收面积, α 是声在大气中衰减系数, h 是探测高度, G 是天线指向性补偿因子。

局地均匀各向同性湿空气湍流对声波的后向散射截面公式可表示成^[6]:

$$\sigma(180^\circ) = 0.0082^{-1/3} \frac{C_N^2}{T^2} \quad (2)$$

式中 λ 是声波波长, $C_N^2 = 4T^2 C_s^2$, C_s^2 是包含温度、水汽脉动在内的声折射率结构系数,即

$$C_s^2 = \frac{C_T^2}{4T^2} \alpha_s^2, \text{ 其中 } \alpha_s^2 = \left[1 + r_{CT} \left(\frac{2DC_e}{C_T P} \right) + \left(\frac{DC_e T}{C_T P} \right)^2 \right],$$

1982年12月3日收到, 1983年3月19日收到修改稿。

C_T , C_θ 和 $r_{T\theta}$ 分别是温度、水汽脉动结构系数、和它们脉动之间的相关系数, $D = 0.318$, T 和 P 是散射体内平均温度和气压. 联立方程(1)与(2)可得:

$$C_N^2 = P_s h^2 T^2 \lambda^{1/3} / [0.004 \eta_i \eta_r P_i G C_T A e^{-2\alpha h}] \quad (3)$$

在一、二百米高度内, 式中 $e^{-2\alpha h}$ 的数值在 10% 以内, 在对(3)式作定量计算时, 此衰减量未作考虑, 声雷达仪器主要参数和资料处理方法见文献[4].

直接测量推算 C_N^2 的方法, 是由单点测量温度脉动和湿度脉动的时间序列求谱, 再从谱值计算出 C_N^2 值. 测量温度脉动和湿度脉动的仪器和资料处理方法见文献[7]. 我们首先将温度和湿度脉动资料用快速傅氏变换(FFT)方法计算出温度谱、水汽谱和温度脉动与水汽脉动横向关联谱. 另外, 根据 Wesely^[8] 考虑温度和湿度联合作用的声折射率脉动量可表示成:

$$n = -(\theta + qTD/P)/(2T)$$

将 $\overline{n^2}$ 的运算结果写成:

$$\overline{n^2} = \frac{1}{4T^2} \left[\overline{\theta^2} + \left(\frac{DT}{P} \right)^2 \overline{q^2} + \frac{2DT}{P} \overline{\theta q} \right] \quad (4)$$

式中 $\overline{n^2}$, $\overline{\theta^2}$, $\overline{q^2}$, $\overline{\theta q}$ 对局地均匀各向同性湍流, 在惯性区间内, 上面各量可表示成一维谱:

$$\overline{X^2} = \int_0^\infty \phi_X(K) dK, \quad \phi_X(K) = 0.25 C_X^2 K^{-5/3} \quad (5)$$

$$\overline{\theta q} = \int_0^\infty \phi_{T\theta}(K) dK, \quad \phi_{T\theta}(K) = 0.25 C_{T\theta}^2 K^{-5/3} \quad (6)$$

$X = \theta, q$, 分别是温度和湿度脉动量, 联系(4)–(6)式, 则可得下列关系:

$$C_N^2 = C_T^2 + \frac{2DT}{P} C_{T\theta} + \frac{T^2 D^2}{P^2} C_\theta^2, \quad (7)$$

$$\phi_N = \phi_T + \frac{2DT}{P} \phi_{T\theta} + \frac{T^2 D^2}{P^2} \phi_\theta. \quad (8)$$

$\phi_N = 4T^2 \phi_n(K)$, $\phi_n(K)$ 是声折射率功率谱, $\phi_T(K)$, $\phi_\theta(K)$ 分别是温度和湿度脉动功率谱. $\phi_{T\theta}(K)$ 是温度-湿度脉动横向关联谱.

在局地均匀各向同性的惯性区间内, $\phi_N(K)$ 还可表示成:

$$\phi_N(f) = (2\pi)^{-5/3} a u_0^{2/3} f^{-5/3} C_N^2, \quad (9)$$

式中 $a = \Gamma(5/3)(2\pi)^{-1} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)$, u_0 是平均风速, f 是频率, 我们根据测量计算的谱值和 u_0 的实测值, 取 $f = 1$ 赫, 可计算出 C_N^2 值.

双点温度脉动仪测量温度结构系数, 是按三分之二次定律公式,

$$C_T^2 = [T(x) - T(x+r)]^2 / r^{2/3} \quad (10)$$

来进行计算的.

三、声折射率谱形与 $C_{N,z}/C_{N,d}$ 比值关系

我们在文献[4]中, 采用双点温度脉动仪测量温度结构系数 ($C_{T,d}$) 与声雷达探测的

结构系数 ($C_{T,a}^2$) 进行比较, 结果表明 $C_{T,a}^2/C_{T,d}^2$ 比值与该层大气稳定度有关, 在 63 米高度上, 当层结不稳定时, $C_{T,a}^2/C_{T,d}^2$ 的比值小于 1; 当层结稳定时, $C_{T,a}^2/C_{T,d}^2$ 的比值大于 1, 并有随稳定度的增大而增大的趋势。此外, 在文献[2]中, 对比观测资料发现, 在稳定逆温条件时, 测量温度脉动谱的斜率为 -2, 并且也存在 $C_{T,a}^2/C_{T,d}^2$ 比值大于 1 的结果。现在先来看一下我们自己测量的声折射率一维水平谱的谱形与稳定度的关系。我们把测量到的温度和湿度脉动资料, 按照公式 (8) 计算出声折射率功率谱 $\phi_N(f)$, 现将不同层结下的谱形实例绘于图 1。图中符号: $\triangle$ 表示稳定逆温 (1980.8.24, 1:48—2:00; 80 米); $\circ$ 表示不稳定层结 (1980.8.24, 10:38—10:50; 140 米); $\bullet$ 表示近中性层结 (1980.8.25, 22:00—22:15; 140 米)。从图 1 明显可见, 由直接测量计算的 $\phi_N(f)$ 一维水平谱, 在不稳定层结时, 谱的斜率小于 5/3 次幂, 在近中性层结时, 谱的斜率等于 5/3 次幂, 在稳定层结条件时, 谱的斜率大于 5/3 次幂。这种谱形与稳定度的定性关系, 还有类似的观测资料 (如 1980 年 8 月 22 日)。关于声折射率谱形与 $C_{N,a}^2/C_{N,d}^2$ 比值的关系, 我们先将 80 米和 140 米两层高度上, 由直接测量的温度、湿度脉动资料计算出一维水平功率谱 $\phi_N(f)$, 然后再按方程 (9) 计算出 $C_{N,d}^2$ 和从声回波方程 (3) 计算出 $C_{N,a}^2$ 以及 $\phi_N(f)$ 的斜率和稳定度参数 Ri 数一起列于表 1。从表 1 可见, 谱形斜率接近 5/3 次幂的 $C_{N,d}^2$ 与声雷达测量推算的 $C_{N,a}^2$ 两者比较接近, 联系表 1 和文献 [4] 的结果, 可以发现, 层结不稳定时的一维水平声折射率谱 $\phi_N(f)$ 是与小于 5/3 次幂的谱形相关的, 而在对比测量中, $C_{N,a}^2/C_{N,d}^2$ 比值小于 1 又与不稳定条件有关; 稳定层结时 $\phi_N(f)$ 谱的斜率是与大于 5/3 次幂相联系的, 而 $C_{N,a}^2/C_{N,d}^2$ 比值大于 1 又与稳定逆温条件相联系。

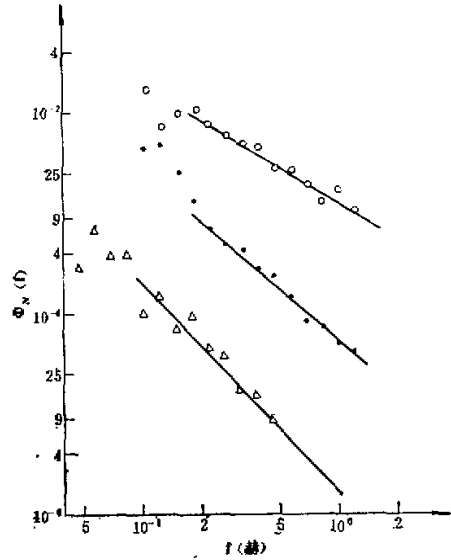


图 1 不同层结下, 声折射率功率谱

表 1 $C_{N,a}^2$ 、 $C_{N,d}^2$ 、Ri 和 $\phi_N(f)$ 谱形斜率

时 间	1980.8.24. 1:48—2:00		1980.8.24. 8:53—9:02		1980.8.24. 10:39—10:50		1980.8.25. 22:00—22:15
高度(米)	80	140	80	140	80	140	140
$C_{N,a}^2$ (米 ^{-2/3})	6.87×10^{-3}	7.65×10^{-3}	6.72×10^{-3}	9.2×10^{-3}	9.27×10^{-3}	5.5×10^{-3}	2.7×10^{-3}
$C_{N,d}^2$ (米 ^{-2/3})	1.7×10^{-3}	3.06×10^{-4}	3.88×10^{-3}	4.43×10^{-3}	3.21×10^{-3}	4.3×10^{-3}	2.85×10^{-3}
谱形斜率	$>5/3$	$>5/3$	$<5/3$	$>5/3$	$<5/3$	$<5/3$	$\approx 5/3$
Ri	1.89	1.63	<0	5.07	-8.87	-1.42	0.23

的。于是, 这似乎可以说, 只有层结为近中性时, 声折射率功率谱才较好地符合 5/3 次幂的规律, 只有在这种条件下, $C_{N,d}^2$ 与 $C_{N,a}^2$ 值才比较一致。一般而言, 在逆温和不稳定条件时,

声折射率—维水平谱 $\phi_N(f)$ 都不大符合 $5/3$ 次幂的规律, 在对流不稳定时, $\phi_N(f)$ 的斜率存在小于 $5/3$ 次幂的倾向, $C_{N,a}^2/C_{N,d}^2$ 比值存在小于 1 的倾向; 在稳定逆温条件时, $\phi_N(f)$ 的斜率存在着大于 $5/3$ 次幂的倾向, $C_{N,a}^2/C_{N,d}^2$ 比值存在着大于 1 的倾向。

四、声遥测 $C_{N,a}^2$ 剖面与温、湿脉动仪测量 $C_{N,d}^2$ 的结果

在北京地区我们对不同情况下, 六次声雷达剖面观测资料进行分析, 这六次观测时间相近的整点观测的风、温剖面资料列于表 2。(除 1977. 10. 19, 13:50—14:00 是地面上高度 1、2、4 米的风、温资料外), 表 2 均是气象塔上测量的风、温剖面资料(从 32 米高度算起), 下面对稳定条件和不稳定条件下的 $C_{N,a}^2$ 剖面分别进行介绍。

表 2 气象塔上 5 次风、温剖面资料

高度间隔		32—47	47—63	63—80	80—100	100—120	120—140	140—160	160—180	180—200	200—240	240—280	280—320
日期时间							140	160	180	200	240	280	320
1980.7.9	温差	-0.286	-0.214	-0.20	-0.30	-0.271							
14:00	风速	5.68	6.28	6.7	7.04	7.17							
1980.8.24.	温差	-0.20	-0.354	-0.246	-0.215		-0.238						
10:38—10:50	风速	3.146	3.147	3.138	3.269	3.192	3.331						
1980.7.12.	温差	-0.18	-0.13	-0.1	-0.1	-0.1	-0.07	0.22	0.73	0.58	0.81	0.21	-0.03
23:00	风速	6.08	6.53	6.69	7.41	7.74	7.76	8.86	9.09	8.68	6.85	7.06	7.41
1980.8.24.	温差	0.1	0.1	0.1	0.6	0.067	0.05	0.217	0.375	0.317	0.367	-0.275	0.117
1:47—2:05	风速	3.47	2.67	3.55	3.35	4.00	3.68	3.37	3.18	2.53	1.83	0.97	1.33
1980.8.25.	温差	-0.05	-0.10	-0.10	-0.03	-0.11	-0.09	0.01					
22:00—22:15	风速	3.70	3.61	4.67	4.46	5.5	6.09	6.55					

1. 对流不稳定情况下结构系数剖面

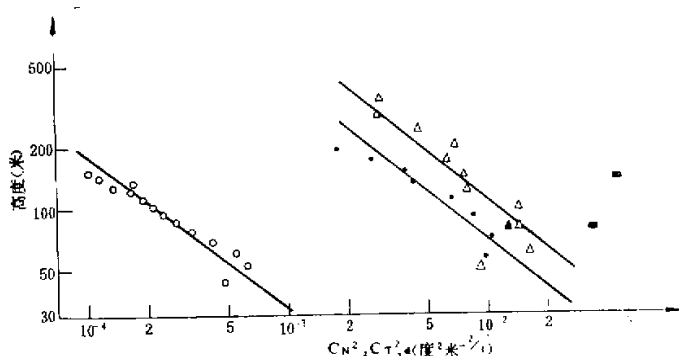
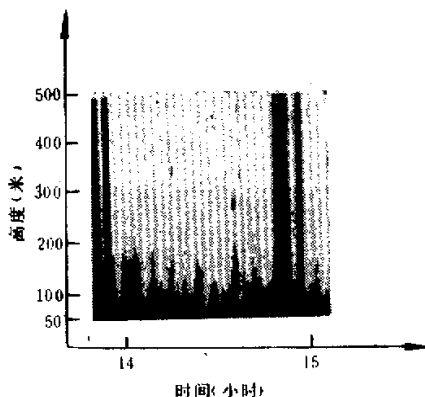
我们在三种不同环境下, 用单点声雷达进行了结构系数剖面探测, 现将它们的环境条件和探测结果叙述如下。

1977.10.19, 14:00—14:37, 在北京西郊机场观测, 地形平坦, 处于凉爽干燥季节, 在这次探测中, 只有 1、2、4 米高度上的风速和温度观测, $\Delta T_{1-1} = -0.9^\circ\text{C}$, $u_{2*} = 1.3$ 米/秒, 没有温、湿脉动仪器作直接测量。

1980.7.9, 13:48—14:16, 北京气象塔地区, 下垫面不大平坦, Z_0 约 40—50 厘米, 雨季前的炎热天气, 在气象塔 80 米高度上安装有双点温度脉动仪, 可直接测量 $C_{T,d}^2$, 两个温度脉动感应器的水平距离为 1 米, $C_{T,a}^2$ 按(10)式计算。

1980.8.24, 10:35—10:55, 北京气象塔地区, 处于雨季暖湿的天气, 在气象塔的 80 米和 140 米高度上均有单点温度脉动和湿度脉动测量, 温、湿两者感应器的水平距离约 70 厘米, $C_{N,d}^2$ 的计算方法如第二节所述。

把上面三种环境下的声雷达探测和直接测量结构系数的结果, 绘在图 2a 中。图中

图 2a 三次对流不稳定 $C_{N,a}^2(Z)$ 剖面图图 2b 对流不稳定时, 声回波图片
(1977.10.19, 13:48—15:08)

符号 Δ , $\bullet$, $\circ$ 分别表示 1980.7.9, 13:48—14:16, 1980.8.24, 10:35—10:55 和 1977.10.19, 14:00—14:37 三次声雷达探测 $C_{N,a}^2$ 值; 符号 $\blacktriangle$ 和 $\blacksquare$ 分别表示 1980.7.9, 13:48—14:16 用双点温度脉动测量的 $C_{N,a}^2$ 值和 1980.8.24, 10:35—10:55 用单点温、湿脉动测量计算的 $C_{N,a}^2$ 值. 图 2b 是 1977.10.19, 13:48—15:08 时段的声雷达回波图片. 从图 2a 中三次不同时间用声雷达探测的 $C_{N,a}^2$ 剖面图可以看出, 它们的 $C_{N,a}^2$ 垂直分布都近似地呈 $-4/3$ 次幂的规律递减, 而地形的平坦程度和温、湿状况的差别, 对于对流条件下的 $C_{N,a}^2$ 剖面规律的影响并不明显, 从图 2b 声回波传真图片可以看出, 声回波的对流热羽的特征还是比较明显的.

2. 稳定层结条件下的结构系数剖面

1980 年 7—8 月份. 我们在北京气象塔地区, 对层结为稳定的三种不同气象背景的结构系数剖面进行探测, 现将探测条件和结果分别叙述如下.

1980.7.12, 22:45—23:06, 观测点处于系统暖区里, 西南风的一次下沉逆温过程中, 逆温强度较大, 20 米可逆增 0.7 度以上, 逆温中心附近风速约达 9 米/秒, 在 140 米以下并无明显逆温. 这次探测的 $C_{N,a}^2$ 和双点温度脉动测量的 $C_{T,a}^2$ 的结果绘于图 3a 中, 分别用符号 $\bullet$ 和 $\blacksquare$ 表示. 从图 3a 可见, 这时的 $C_{N,a}^2$ 剖面明显地呈抛物线型, $C_{N,a}^2$ 先随高度增加而增大, 到下沉逆温中心附近 $C_{N,a}^2$ 达最大值, 随后高度增加, $C_{N,a}^2$ 值反而减小.

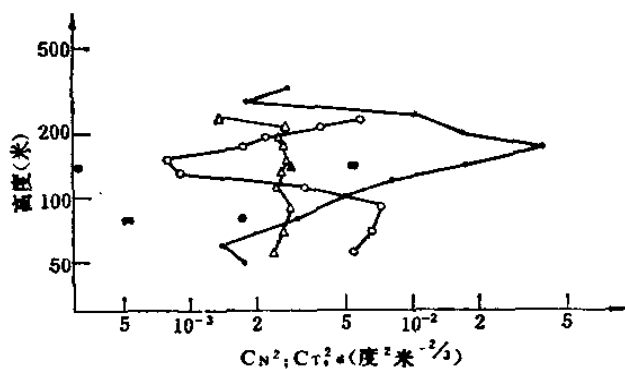


图 3a 三次稳定层结下, $C_{N,a}^2(Z)$ 剖面图

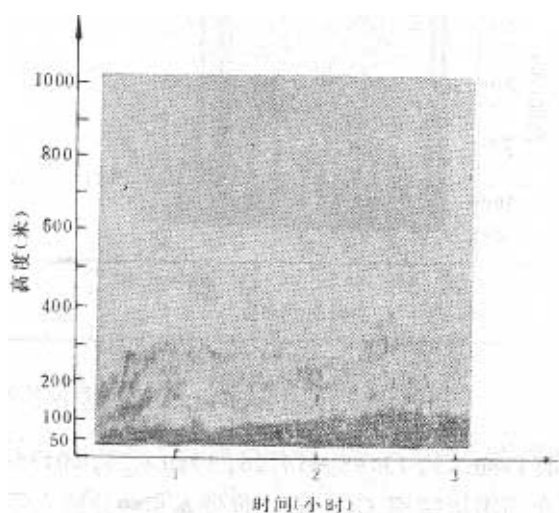


图 3b 稳定层结时声回波图片
(1980.8.24, 0:29—3:07)

1980 年 8.24, 1:47—2:05, 这时观测点处于冷空气里, 吹偏北小风, 不仅存在由地面辐射冷却形成近地面的逆温层, 而且上面还有逆温层次, 这时探测的 $C_{N,a}^2$ 剖面 and 单点温、湿脉动计算的 $C_{T,a}^2$ 结果绘于图 3a 中, 分别以符号 $\circ$, $\bullet$ 表示之, 与这时 $C_{N,a}^2$ 剖面相对应的声回波传真图片如图 3b, 由图可见, 这时 $C_{N,a}^2$ 剖面与声回波结构层次是完全一致的, $C_{N,a}^2$ 的垂直分布与温度层结的垂直分布关系密切, $C_{N,a}^2$ 的最大值位于最大逆温强度层附近, 这次 $C_{N,a}^2$ 剖面呈多极值结构型.

1980.8.25, 22:00—22:20, 观测点吹东南风, 风速廓线呈近对数规律, 近地层为稳定

层结(但无逆温层), $C_{N,a}^2$ 剖面 and 140 米的 $C_{N,d}^2$ 绘于图 3a 分别以 $\triangle$ 和 $\blacktriangle$ 表示. 由图可见, $C_{N,d}^2$ 在 50—200 米高度间近似成等值剖面.

综上所述,在稳定条件下,不同气象背景的 $C_{N,a}^2$ 剖面形式是不同的,它们不但没有共同规律,而且它们之间的差别还很大,如上三个实例所示,即有抛物线型、多极值结构型和等值型,很难用统一的规律来描写. 这说明在稳定情况下, $C_{N,a}^2$ 剖面的多样性和复杂性.

此外,从图 2a 和 3a 中 80 米和 140 米两个高度上的 $C_{N,a}^2$ 和 $C_{N,d}^2$ 数值大小可以看出,在稳定和不稳定层结时 $C_{N,a}^2/C_{N,d}^2$ 比值倾向是不同的,这种比值倾向结果与文献 [4] 的结果是一致的.

五、小结与讨论

通过上面两节的资料分析,可以得出下面三点初步看法:

1. 在对流不稳定条件下, $C_{N,a}^2$ 随高度分布是按 $-4/3$ 次幂规律递减,它与地形的平坦程度和温、湿状况的差异关系并不明显.
2. 在逆温稳定条件下,对不同天气背景下的 $C_{N,a}^2$ 高度分布差别很大,没有共同分布规律.
3. 在逆温稳定条件下,声折射率一维水平功率谱的斜率大于 $5/3$ 次幂, $C_{N,a}^2/C_{N,d}^2$ 比值大于 1; 在对流不稳定条件下,声折射率功率谱的斜率小于 $5/3$ 次幂, $C_{N,a}^2/C_{N,d}^2$ 比值小于 1.

关于谱的斜率. 在稳定层结下, AsimakopouLos^[2] 和 Mouldsley^[3] 测量的一维温度谱的斜率大于 $5/3$ 次幂,他们认为这种谱形可能是由于湍流的间歇性和破碎波所造成的. 我们所测量计算的声折射率一维功率谱的斜率也是大于 $5/3$ 次幂. 上述事实表明,在稳定大气中,这种大于 $5/3$ 次幂的谱形是在一定条件下客观存在的,由于这种谱形的存在将对 $C_{N,a}^2/C_{N,d}^2$ 比值产生一定影响.

在对流不稳定条件下,根据 Mouldsley^[3] 的对比测量结果,垂直方向测量的两点温差 ΔT_z , 计算 $C_{T,z}^2$ 与测量的温度脉动谱计算出 $C_{T,x}^2$, 由它们的数值可以看出在大于米尺度时, $C_{T,z}^2$ 大于 $C_{T,x}^2$; 根据他们的测量资料,我们又比较了 $C_{T,z}^2$ 与声雷达测量的 $C_{N,a}^2$ 数值(这时尺度约 20 厘米左右的声波半波长),在 $C_{T,z}^2$ 明显大于 $C_{T,x}^2$ 的层次上,三次测量的 $C_{N,a}^2/C_{T,x}^2$ 比值分别为, 2.1/3.3, 1.2/1.6, 2/2.7, 即有 $C_{N,a}^2$ 大于 $C_{T,x}^2$, 这也表明在小尺度范围内,可能存在湍流各向异性的特征,但对这两种尺度而言,各向异性的方向是不同的. 从上述分析看来,在对流不稳定条件下,存在着各向异性湍流,并且各向异性的方向性与尺度有关,由于湍流量的这种特性,它可能对温度谱的结构和 $C_{N,a}^2/C_{N,d}^2$ 比值产生一定的影响.

本工作得到周明煜同志支持,王立治同志在谱形计算时给予热情帮助,特此致谢.

参 考 文 献

- [1] Neff, W. D., Quantitative evaluation of acoustic echoes from the planetary boundary Layer, 34. NOAA Technical Report, ERL 322-WPL 38, Boulder, Colorado, 1975.
- [2] Asimakopoulos, D. N., et al., A Quantitative Comparison Between acoustic Sounder Returns and the direct Measurement of atmospheric temperature fluctuations, *Boundary Layer Meteor.*, Vol. 10, No. 2, p. 137—147, 1976.
- [3] Mousley, D. N., Asimakopoulos, D. N., Cole, R. S., Crease, B. A. and Caughey, S. J., Measurement of boundary Layer structure parameter profiles by acoustic Sounding and Comparison with direct measurements, *Q. J. R. M. S.*, Vol. 107, No. 451, p. 203—230, 1981.
- [4] 周明煜等, 声雷达探测与直接测量温度结构系数的对比研究, 地球物理学报, 第25卷, 第6期, 第492—499页, 1982.
- [5] Brown, E. H. and Clifford, S. F., On the attenuation of sound by turbulence, *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 60, p. 788—794, 1976.
- [6] Mcallister, L. G., Pollard, J. R., Makoney, A. R. and Shaw, P. J. R. Proceeding IEEE, Vol. 57, No. 4, p. 579—587, 1969.
- [7] 陈炎洞等, 潮湿陆面湿潮谱的某些特征(尚未发表).
- [8] Wesely, M. L., The Combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 15, p. 43—49, 1976.

THE C_N^2 BY SODAR AND IN-SITU MEASUREMENTS

Chen Yenjuan Li Shiming Lü Naiping

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, methods calculating the sound refractive index structure parameter from sodar and direct measurements are briefly described. The $C_{N,a}^2$ profiles under both stable and unstable conditions calculated by use of mono-static sodar measurements are given. Comparisons between sodar and in-situ measurements of $C_{N,a}^2$ at two levels (80 m and 140 m) indicate that the ratio $C_{N,a}^2/C_{N,d}^2$ is associated with the slopes of sound refractive index spectra. Finally, the spectral structure and its effect on the ratio $C_{N,a}^2/C_{N,d}^2$ are preliminarily discussed.