

单点声雷达与边界层大气探测

大气物理研究所声雷达组

摘 要

本文叙述了声雷达的工作原理,介绍了他们研制的单点声雷达探测系统,并在野外进行了短期观测。探测高度达 600 米。对所获得的逆温层结构、辐射逆温形成与消失过程、重力波以及热对流等资料进行了初步分析。

引 言

声雷达是六十年代末期发展起来的遥测边界层大气气象要素的有效探测手段。国外已经开展了不少工作^{[1]-[8]}。声雷达的优点是能够连续地、快速地遥测大气中风速、风向、温度层结、湿度、三维温度脉动谱和三维动力乱流谱的时空分布。这对于研究大气结构、大气湍流、扩散和空气污染问题有重要意义,并在生产实践中得到了广泛的应用。

声雷达的工作原理是用声波遥测低层大气,这就涉及到波与大气的相互作用。波与大气相互作用的灵敏度决定于介质折射指数的脉动值。一般地说,大气中温度、风速、湿度的变化引起声波折射指数的变化要比无线电波大三个数量级。上述气象要素的变化引起声波或电磁波的散射正比于折射指数相对变化值的平方。因此大气对于声波的散射比电磁波大一百万倍。显然,用声波探测大气比光波或无线电波更灵敏。但由于声波在大气中传播时,能量衰减较大,故探测高度受到一定限制,一般为 1 公里左右。近来,有人采用了加大声功率减小噪声的方法,使探测高度进一步提高。

在无产阶级文化大革命和批林批孔运动的推动下,我们开展了声雷达的研制工作,用单点声雷达探测系统与系留气球的测温资料做了初步比较。并于 1975 年 12 月至 1976 年 1 月在北京市北郊和石景山工业区进行了短时间的连续观测,取得了北京地区冬季辐射逆温生成、消失过程的资料,并观测了低层大气中逆温层的波动、重力波的破碎、混合层及热对流等现象。探测高度为 600 米。

一、基本原理

在湍流大气中的声波散射问题,不少人进行了研究。Татарский^[9] 和 Монин^[10] 等提出了比较完善的风速和温度脉动引起的声散射理论。Каллистратова^[11] 对上述理论从实验上做了论证。

在干空气中,由于大气的不均匀性引起的声波散射公式为

$$d\sigma = 2\pi k^4 V \cos^2 \theta \left[\frac{1}{C^2} E(K) \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4T^2} \phi_T(K) \right] d\Omega \quad (1)$$

式中 $d\sigma$ 是散射截面, 即单位入射声功率通过角度 θ 在立体角 $d\Omega$ 体积内空气的不均匀性产生的声散射部分. $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是声波波数, 其中 λ 是入射声波波长, $K = 2k \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)$ 是通过角度 θ 穿过介质时声雷达散射的有效波数, C 和 T 分别是散射体积内的平均声速和平均温度, V 是散射体积. $E(K)$ 和 $\phi_T(K)$ 分别为波数 K 的三维风速脉动和三维温度脉动谱密度. (1)式说明, 对于散射角度为 θ 的散射截面只与尺度为 $l = \lambda / \left(2 \sin \frac{\theta}{2} \right)$ 的湍流脉动谱密度有关.

由局地各向同性的湍流理论, (1)式可化为

$$\sigma(\theta) = 0.03 k^{1/3} \cos^2 \theta \left[\frac{C_v^2}{C^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} + 0.13 \frac{C_T^2}{T^2} \right] \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^{-11/3} \quad (2)$$

式中 $\sigma(\theta)$ 是单位体积、单位入射通量与声波入射方向角度为 θ 的单位立体角的散射功率或称散射截面. C_v 是风速脉动结构常数, C_T 是温度脉动结构常数.

当散射角 $\theta = 180^\circ$ 时 (即后向散射), $\cos^2 \frac{\theta}{2} = 0$, 这说明风速脉动不直接引起后向散射, 后向散射功率仅与尺度为入射声波波长一半 $\left(l = \frac{\lambda}{2} \right)$ 的温度脉动谱密度有关, 这时, 公式(2)成为

$$\sigma = 0.008 \frac{C_T^2}{T^2} \lambda^{-11/3} \quad (3)$$

根据局地各向同性湍流理论, 并从相似理论, 得出温度脉动结构常数 C_T 为:

$$C_T^2 = \frac{a^2 (xz)^{4/3} \left(\frac{dT}{dz} \right)^2}{\varphi^{4/3} \left(\frac{z}{L} \right)} \quad (4)$$

其中 L 是动力乱流高度, x 是卡曼常数, 当层结接近于中性时, $\varphi \left(\frac{z}{L} \right) \rightarrow 1$, 即有

$$C_T^2 = a^2 (xz)^{4/3} \left(\frac{dT}{dz} \right)^2 \quad (5)$$

将(5)代入(3), 对于确定的波长 λ 值时,

$$\sigma \propto x^{4/3} \left(\frac{dT}{dz} \right)^2 \quad (6)$$

声雷达方程可以写成

$$P_r = P_t \eta_T \eta_r \sigma \frac{C\tau}{2} A_e R^{-2} e^{-\alpha R} \quad (7)$$

其中 P_t 是发射电功率, P_r 是接收电功率, η_T 是发射的电-声转换系数, η_r 是接收的声电转换系数, σ 是散射截面, τ 是发射声脉冲宽度, R 为探测高度, A_e 是天线有效面积, α 是衰减系数, 它与发射频率及大气中的温度、湿度有关.

从公(6)和(7)可以看出, 当声雷达探测系统的参数给定后, 声雷达收到的回波在接近中性时正比于 $\left(\frac{dT}{dz} \right)^2$. 当层结为很不稳定和很稳定时, 还要考虑层结订正函数的影响. 由于回波与温度梯度平方成正比, 我们不能直接从回波来区分温度梯度的正负, 但从分析

传真记录器回波图象的结构可以明显地区分开逆温层与热对流层。

二、单点声雷达探测系统

从上一节的叙述中可以知道,用单点声雷达垂直向上发射一个固定频率、一定宽度的声脉冲,可以收到来自不同高度反映温度层结的声回波。从这些回波资料可以知道大气层结的空间分布及其随时间的演变。

单点声雷达的主要参数列于表 1。

单点声雷达探测系统由天线、发射机和接收机三部分组成。

表 1 声雷达主要参考数表

发 射 功 率	100 瓦(电功率)
脉冲宽度	100 毫秒
脉冲重复频率	3 秒、4 秒、6 秒
最大距离	600 米
发射频率	1588 赫
天线直径	1.5 米
天线射束指向性	8° (半功率点)
接收机带宽	40 赫
接收灵敏度	6.1 毫伏/微巴

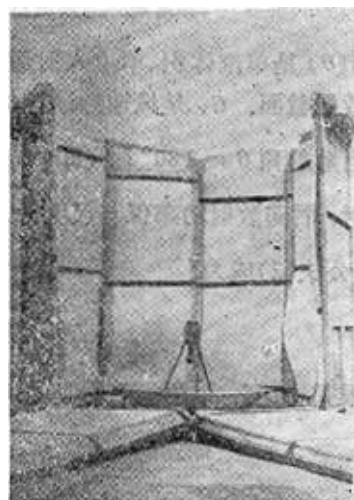


图 1 声雷达天线

1. 天线部分

声雷达天线包括电-声转换器、抛物面型反射体及隔音围墙。图 1 是声雷达天线的照片。

我们采用国产 YH100-1 型扬声器头加上长 10 厘米的铝制指数喇叭筒作为电-声转换器。脉冲的发射和回波的接收用同一个扬声器。在 1000—4000 赫频率内扬声器的频响曲线的起伏量为 ± 5 分贝。我们选用的声雷达工作频率为 1588 赫。扬声器在发射 1588 赫频率时的余振时间为 150 毫秒。(余振时间是在消声室内测定的。)

抛物型反射体的焦距为 50 厘米,直径为 1.5 米。反射体由铝板制成,为了防止余振和提高反射能力,在反射体背面涂一层厚为 1 厘米的水泥。扬声器的发射电功率为 100 瓦。它作为接收器(包括反射体)的灵敏度为 6.1 毫伏/微巴。

对反射体的指向性进行了测量,现将 1000、2000、3000、4000 赫的主瓣宽度列于表 2。

表 2 声雷达天线的指向性

频 率 (赫)	1000	2000	3000	4000
主瓣宽度(半功率点)	10°	7°	4°	3°

隔音围墙是由八块木板组成的八面体,每块板高为 2.7 米,为宽 0.9 米,在木板内侧附有 8 厘米厚的泡沫塑料。

八面体围墙具有较好的隔音和吸音性能,我们对它的隔声性能进行了测量。用传声

器在围墙内外进行环境噪音对比测量,结果见表 3。从表中可以看出,频率越低,围墙对噪音的衰减作用越大。

表 3 隔音围墙内外的环境噪音衰减值

频 率 (赫)	800	1000	1023	1258	1588	1750	2000	23.1	3000	3500	3750	4000
噪音衰减值(分贝)	20.8	20.0	17.6	15.8	10.1	13.9	9.2	7.6	8.0	3.8	1.3	1.6

2. 发射机部分

图 2 是单点声雷达系统线路方框图。发射机由音频讯号源;发射门 1—2;功率放大器;低电平抑制器和收发变压器等六部分组成。

发射机的功能在于产生一定功率(100 瓦),一定参数(频率为 1588 赫,宽度为 100 毫秒)的声脉冲。因为二个发射门的开放与闭锁是由接收机内的声控脉冲所控制,所以由音频讯号源发出的 1588 赫的连续波经过二道发射门后就被切割成不连续的脉冲。其脉冲宽度与声脉冲的宽度和周期相同,而幅度则与讯号源的强度和发射门的增益有关。此声脉冲经功率放大器放大到足够的强度。脉冲有效值是 240 伏,经变压器匹配后馈送至换能器(扬声器)。

由于发射机和接收机都是经过收发变压器直接耦合在一起的,所以当发射机发射强大的声脉冲时,接收机要闭锁得很好,不致因强大的声脉冲过载而损坏,当发射脉冲完毕时,发射机输出要小于接收机临界灵敏度。前一问题是通过接收机的保护装置来解决。后者是采取提高门的闭锁能力和低电平抑制器来解决。

为了提高发射门的闭锁能力,采用场效应管组成二级发射门,对讯号的抑制比(导通时通过讯号的幅度与闭锁时泄漏电压幅度之比)大于 10^3 。这样可以保证漏到功率放大器输出端的电压不超过 24 毫伏。通过发射门漏出的电压以及整个发射系统电路噪声可以用低电平抑制器消除。

低电平抑制器是由二个二极管组成。它对于大讯号是导通的,但对小于 0.4—0.6 伏的噪声具有很大的内阻,可以阻止小于此门限的噪声通过。

3. 接收机部分

接收机包括讯号通道,程序控制以及记录设备等三部分。(见图 2)

收发变压器对发射机而言是匹配变压器,对接收机而言则是升压变压器。当大气声回波由声-电转换器转换成电讯号后,在接收变压器升压约 10 倍以提高讯噪比,然后进入前置放大器放大 100 倍。由于发射绕组和接收绕组是共一个铁心耦合的,所以发射脉冲可直接耦合到接收端,其峰值电压约 360 伏。为此,在前置放大器输入端装有限幅器,使到达前置放大器的电压不超过 0.6—0.7 伏。

讯号通过前置放大器后,就到第一接收门。如果门是打开的,讯号就进去,通过衰减器调整到一定电平再进入 100 倍放大器,然后通过高通滤波器滤除 400 赫以下的低频噪声。接收门的作用是防止发射脉冲进入接收通道中高增益放大部分,以免放大器过载。由于一级接收门其抑制能力只有 10^2 ,所以在选频放大器以前又加第二接收门,二个门是同步的。

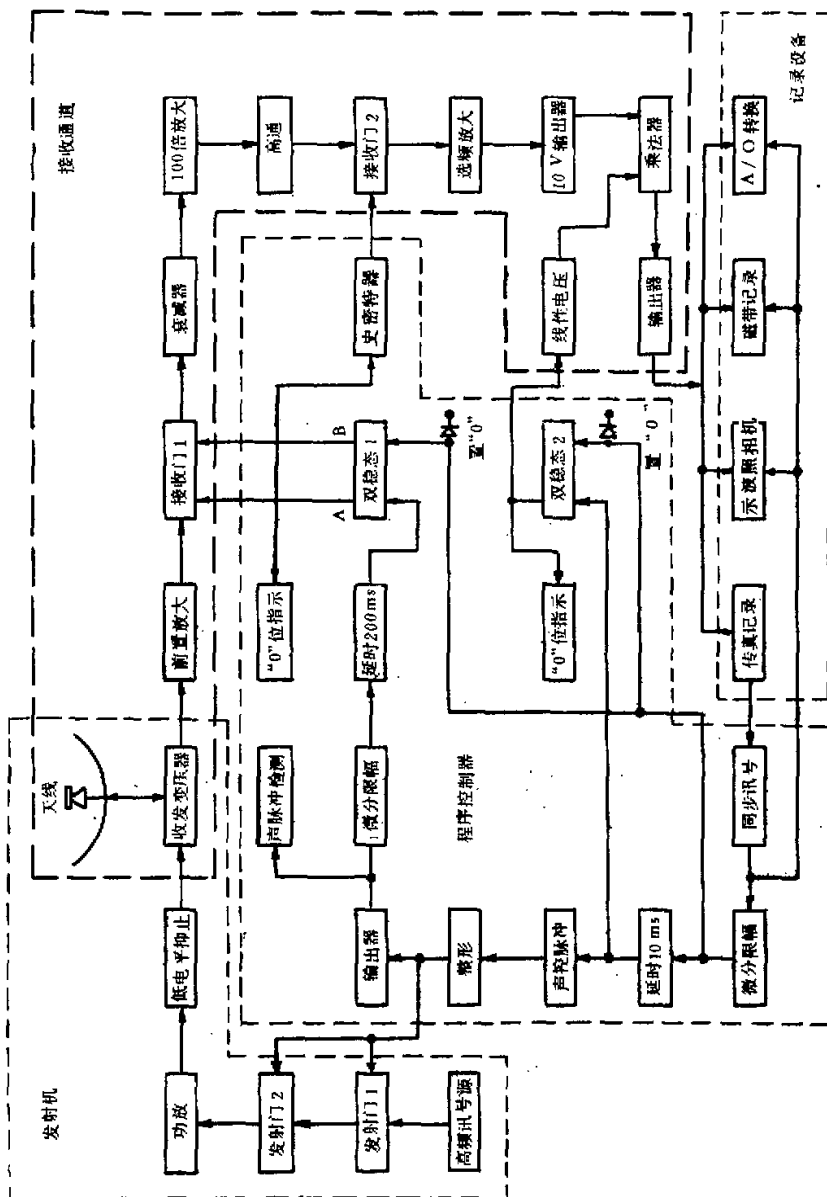


图2 单点声雷达线路方框图

选频放大器是一个多重反馈高Q单调谐放大器,频带宽度为40赫,增益可调,其中心频率与发射频率相同。

由于回波讯号强度与高度成反比,为了补偿回波讯号随高度的衰减,插入了高度补偿器。其主要部件是一个模拟乘法器。它的输入,一路是回波讯号,另一路是随时间线性增长的电压,两者的乘积不变,从而起到补偿作用。10伏输出器是为了使乘法器达到一定精度而附加的。

记录部分有传真记录器和示波照相机两种。回波讯号可用示波器显示出来,进行照相记录并监视系统的工作情况。

传真记录器可获得回波讯号随时间和高度的连续变化情况。记录器滚筒上装有感光纸(见图3)。回波讯号强度控制录影灯强度,感光纸上的黑度显示回波讯号强度。扫描从压条开始,扫描的逐次位置代表不同的高度,回到压条一次扫描就算结束,然后移动一小距离再次记录。这样就可以记录出回波讯号随时间和高度的连续变化。

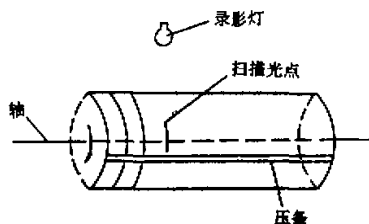


图3 传真记录器录影滚筒示意图

为了使整个系统严格同步,以传真记录器滚筒的旋转作为原始的同步信号源。每当录影灯的光点扫描经过压条时,记录器发出一个讯号,此讯号到同步讯号发生器整形后成为整个系统的同步信号。该同步信号除了使其它记录器同步外,主要送至程序控制电路去执行如下的逻辑程序(见图4):

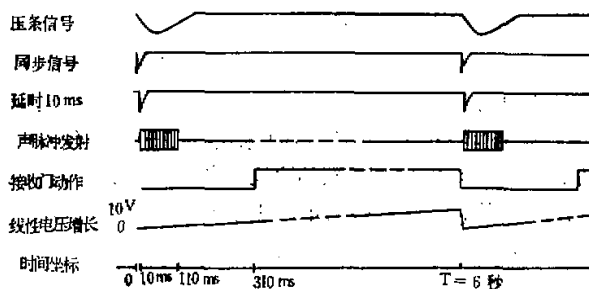


图4 声雷达主要程序逻辑示意图

同步脉冲到达,接收门闭锁→延时10毫秒→发射门打开,宽100毫秒的声脉冲发射→发射门关闭,延时200毫秒→接收门打开。直到下一个同步信号到达时,再重复上述过程。整个程序控制是采用互相关联延时动作的,所以各部件动作不会有差错。

三、观测场地及观测方法

我们于1974年10月和11月在北京市北郊917大楼顶将单点声雷达回波讯号与系留气球测温资料做了比较。并在1975年12月和1976年1月在北京市北郊本所楼顶和石景山工业区进行了短期连续观测。

917大楼高约30米,周围无其它建筑物。本所楼顶离地面约20米,周围有其它建筑

物。由于建筑物的反射而产生的交混回响,是需要在声雷达观测中排除的因子。

在石景山工业区是与80米气象塔配合观测的,图5为声雷达观测现场。二地都是用传真记录器连续记录声回波强度,图片中黑度大的部分表示回波讯号强,即温度梯度大,黑度小的部分表示回波讯号弱,即温度梯度小。

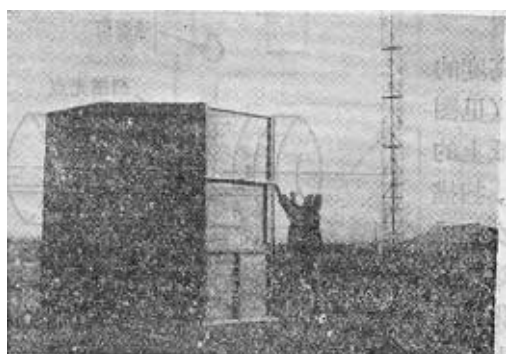


图5 声雷达观测现场

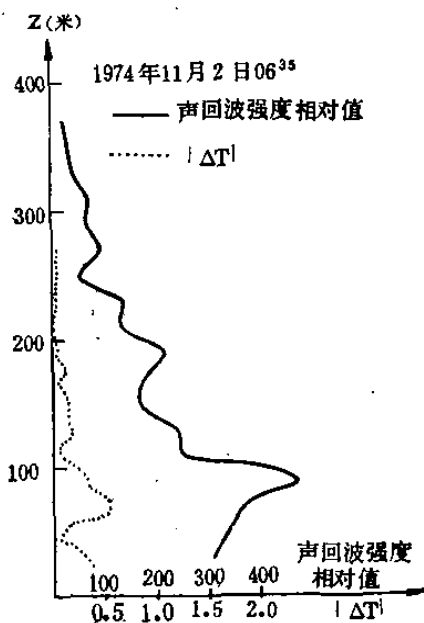


图6 声雷达回波与系留气球测温资料比较

四、观测资料的初步分析

1. 声雷达回波强度与系留气球测温资料的比较

我们用12组系留气球测温资料与声雷达的回波强度做了比较。图6为1974年11月2日06时35分的一次观测结果。图中实线为声回波强度的相对值,虚线为相邻两层高度上温差的绝对值。从图中看出,在70米到100米左右有一个强回波,相应地在60米至100米附近温差亦大。从图6及12组资料的比较看来,声回波强度的相对值与系留气球的温差廓线基本上是一致的。产生一些差异的主要原因是,系留气球的观测不能得到各高度上同时的温度记录,完成一次观测的时间需要20—30分钟,在这段时间,逆温层本身就会产生一些变化。此外,系留气球测量的高度也定得不够准确。

2. 辐射逆温的生成和破坏

图7a是1976年1月11日16时到12日14时在石景山工业区观测的一次辐射逆温生成和消失过程的典型例子¹⁾。在声雷达回波图片中比较稀疏状回波反映的是热对流,逆温层在图片中表现为水平分层结构,下层为黑度较大的层次,上层常呈波动状。从图7a看出,11日17时对流活动消失,逆温逐渐形成。逆温形成是从地面开始,慢慢向上发展。21时30分在100米高度上出现逆温层副层,以后逐渐抬高、并形成多层逆温,到1月12日10时,近地面层的逆温消失,开始产生热对流,但在200米高度还有一层逆温,随着对流活动加强,这层逆温强度逐渐减弱,直至12时30分逆温层才逐渐破坏。图7b是在相

1) 16点到20点的记录是有距离补偿的声雷达回波,以后的记录未加距离补偿。

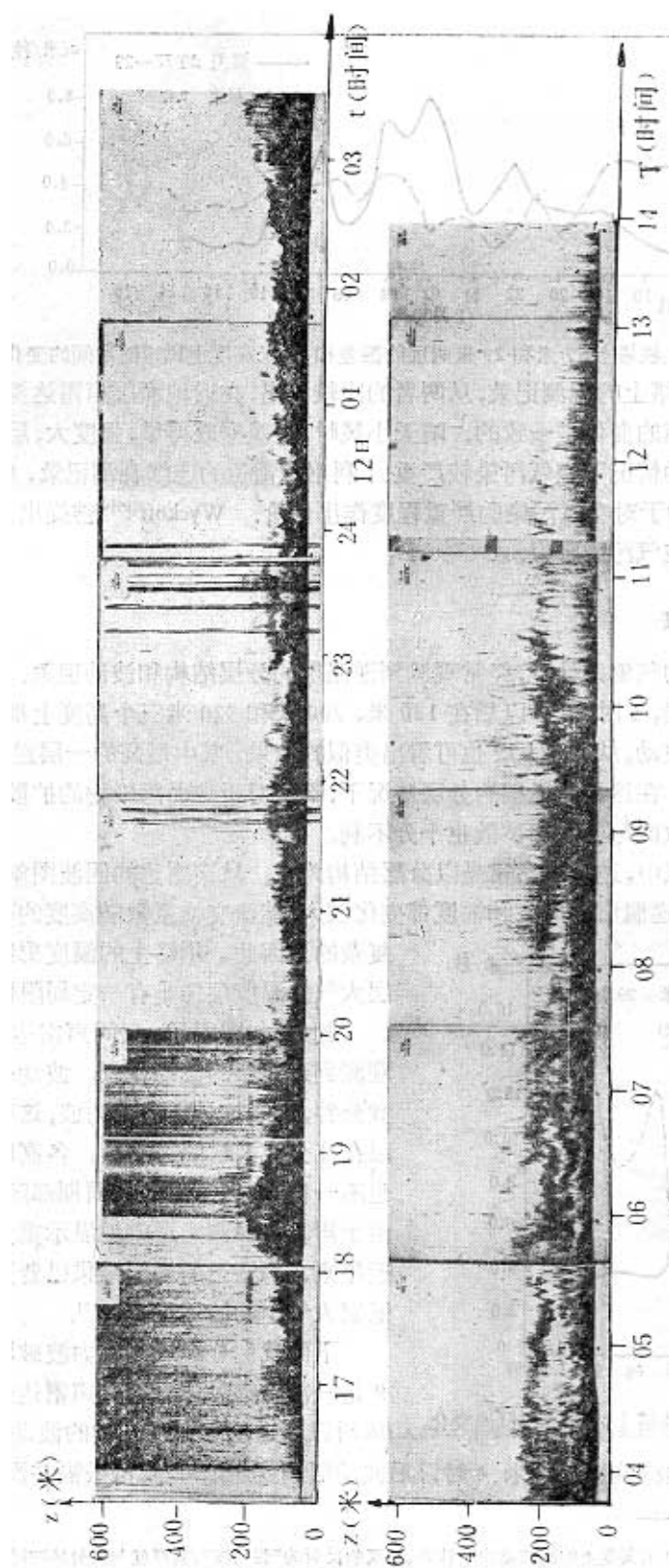


图 7a 1976 年 1 月 11—12 日辐射逆温生消过程的声雷达回波记录

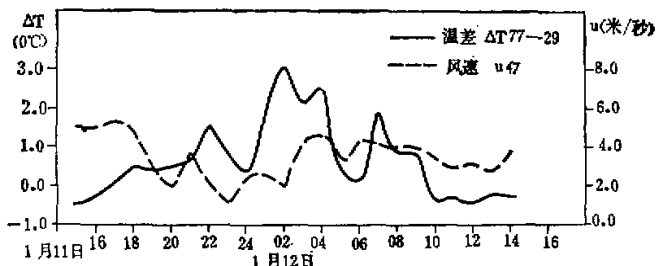


图 7b 铁塔上 77 米和 29 米两层的温差和 47 米高度上风速随时间的变化

应的时间里 80 米塔上的观测记录,从两者的比较看出,在近地面层声雷达探测和 80 米塔上观测的温度层结的变化是一致的。晴天小时,逆温形成得早,强度大,层次多,逆温破坏得较晚。在这种情况下空气污染较严重。利用声雷达的连续观测记录,配合其他必要的观测资料,有助于对空气污染的严重程度作出估价。Wyckoff^[13]曾提出用声雷达回波的连续记录发布空气污染警报。

3. 逆温层和重力波

在晴天小风的气象条件下,经常观测到逆温层的分层结构和波动现象。如图 8(a) 逆温明显地分为五层,5 时 20 分以后在 120 米,200 米和 320 米三个高度上都有波长与位相基本上一致的波动,从图 8(b)¹⁾也可看出类似的结果,其中最高的一层逆温出现在 350 到 550 米高度上。在这种逆温层的分层情况下,不仅对于地面污染物的扩散不利,而且对于高架源烟囱排放的污染物的扩散也十分不利。

在边界层大气中,逆温层常常是以分层结构为主。从声雷达的回波图象中看出,在逆温分层的情况下,逆温层的厚度和幅度都变化较大,湍流交换系数随高度的变化也是比较复杂的。因此,用塔上的温度廓线来分析边界层大气的温度层结是有一定局限性的。

此外,如图所示,夜间声雷达探测中,经常观测到逆温层的波动现象,波动的周期一般为数分钟,看来这是一种重力波,这种波动往往可以在几个逆温层同时发生,各高度波动的振幅也不一样,它们的振幅和周期都随时间有变化。由于声雷达探测能形象地显示重力波的特征,近年来,声雷达的探测结果已普遍地用来研究低层大气中的波动现象^[14,15]。

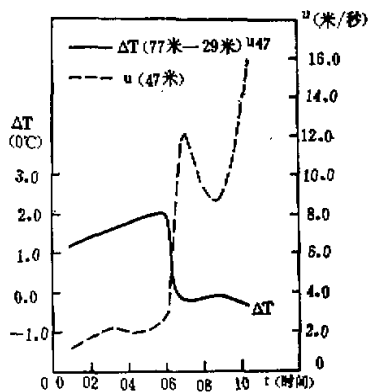
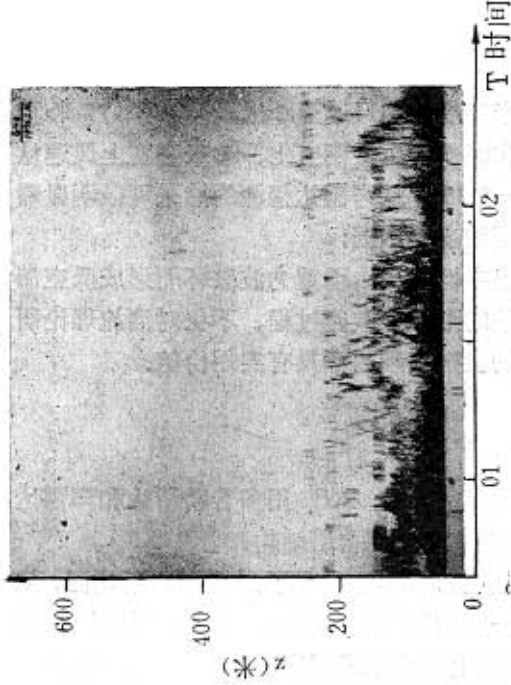


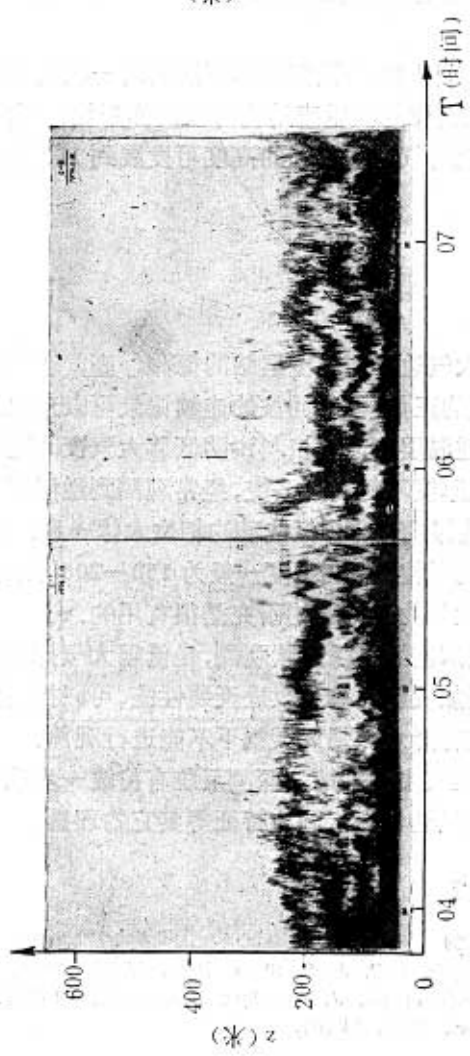
图 10 1976.1.16 铁塔上的温差和风速变化

06 时以前逆温层存在持续的波动现象,波动层的高度达 400 米,振幅超过 200 米。4 时以后波动层高度逐渐降低,但振幅并没有减小,图 10

1) 图中 140 米、240 米高度上的回波是由于铁塔、建筑物反射的“假回波”,其厚度与发射脉冲时间一致。

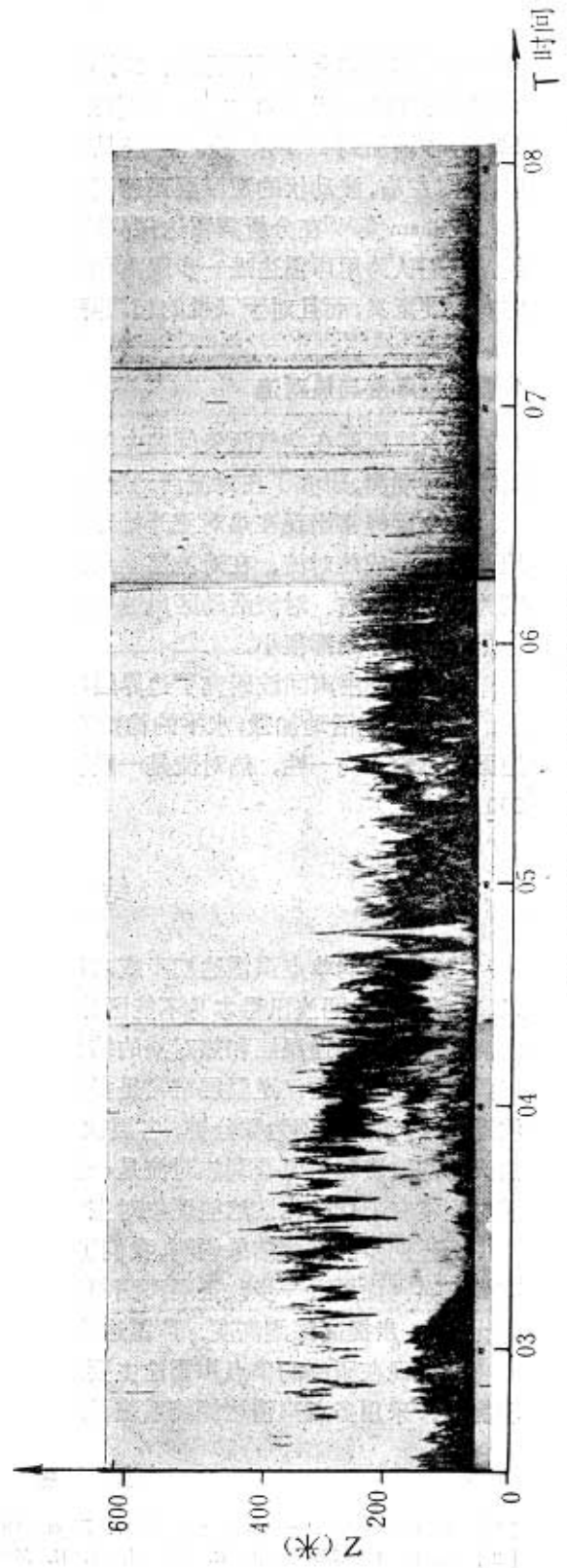


(a)



(b)

图 3 逆温层的分层结构



为相应时间铁塔上的观测记录。2时至6时47米高度上的风速为2米/秒左右,77米和29米两层的温差为 2°C 左右。6时以后,风速和温差发生急剧变化,47米高度上风速从2.7米/秒增加到12.1米/秒,温差从 2°C 变为 -0.2°C 。从声雷达探测的结果可以明显看出,6时左右,波动状的逆温层迅速消失,以后,回波变得微弱。

William等^[2]在分析声雷达探测结果时,提出在低空,由于重力波破坏而形成低空湍流。我们认为用声雷达进一步观测和分析重力波的形成和破碎过程,不仅对湍流理论研究有重要意义,而且对于飞机的起飞降落、导弹的发射等问题都具有实用价值。

4. 混合层厚度与热对流

混合层厚度在空气污染问题中是一个重要的参数。Frisch^[3]用多普勒雷达和声雷达同时进行观测,研究了在对流活动层上覆盖着一层逆温的混合层结构。

混合层经常出现在热对流开始形成和逆温层逐渐破坏的情况下。由于辐射增温,从地面开始形成热对流,在对流层上继续维持着一层明显的逆温层,如图11。逆温层底高度为200米左右。对流活动区风速切变小,对流层上部到逆温层底的100米范围内,动力作用和浮力作用都很小。

Hall等^[4]用声回波研究了边界层中的热对流,图12是我们在本所楼顶的一次观测结果。由于对流活动加强,水平的稳定的温度层结转化为以垂直结构为主的热对流。由于地面加热的不均一性,热对流是一股股垂直向上的气柱,热羽的高度可发展到150米到200米左右。

结 束 语

我们研制的单点声雷达初步成功地进行了大气边界层温度层结的探测,高度达600米。单点声雷达回波讯号本身不能区分温度梯度的正负,但从回波的连续记录可以形象地观测到并区分开逆温层和热对流的结构。分析逆温层的回波资料说明低层大气夜间逆温层具有复杂的结构。逆温层常常是多次的,但厚度不等并且多变,经常观测到逆温层的波动现象,波动周期为数分钟,各层次波动的振幅并不相同,但波动的相位大体一致。从白天的回波资料可以看到热对流是一股股向上的气柱,热羽高度一般为150—200米,但随时间常有起伏变化。这些现象对空气污染等大气物理问题的研究是很有用的。

上述初步的观测结果说明,我们研制的单点声雷达可以连续观测,是低层大气探测的有效工具。如果进一步改进隔声围墙的性能,增加发射功率及改进天线性能,可以提高讯噪比,进一步提高探测高度。声雷达的缺点是在有降水和强风天气下不能进行观测。

我们现在研制的单点声雷达主要用于探测大气温度层结,探测系统有待进一步改进和完善。采用多点声雷达探测系统,还可以探测风速、风向、湍流特征等其它物理量。

参 考 资 料

- [1] L. G. McAllister, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1968, 30
- [2] L. G. McAllister, J. R. Polard, A. B. Mohoney and P. J. R. Shaw, *Proc. IEEE*, 1969, 57.
- [3] H. Ottersten, M. Hurtig, G. Stille, B. Brümmer et al., *J. Geophys. Res.*, 1974, 79 (36).
- [4] P. A. Mandics and E. J. Owens, *J. Appl. Meteor.*, 1975, 14 (6).

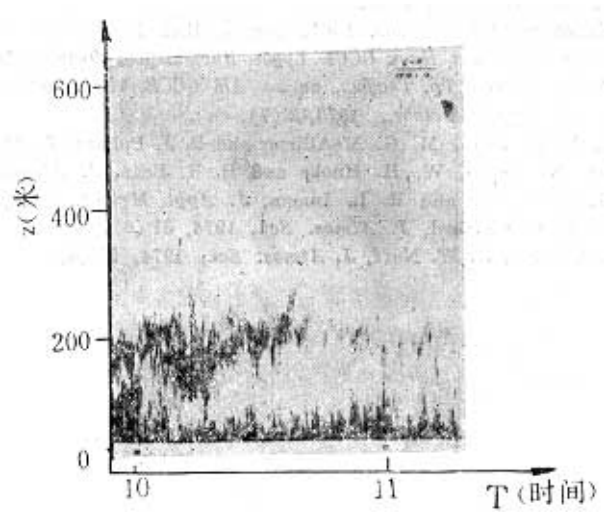


图 11 混合层结构

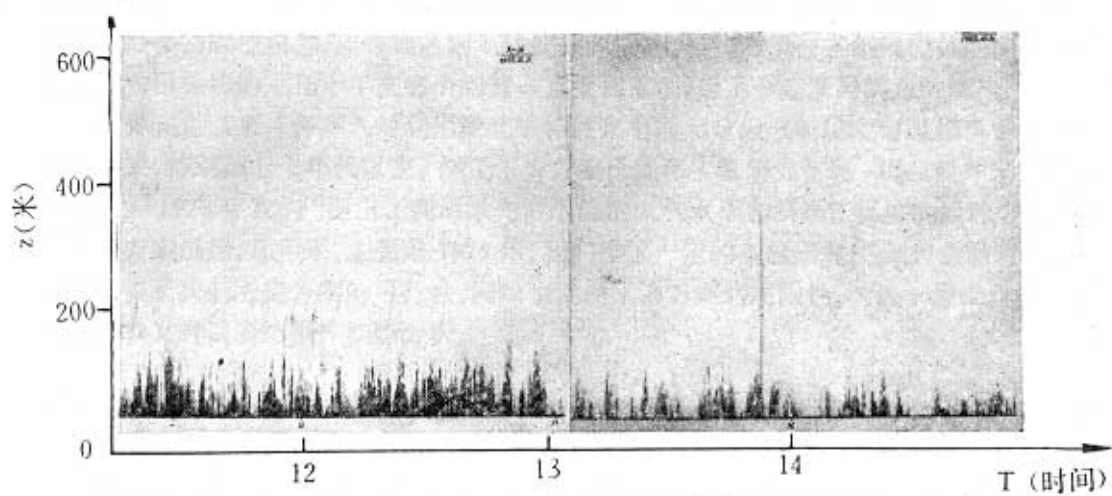


图 12 混合层和热对流

- [5] D. W. Beran, C. G. Little and B. C. Willmarth, *Nature*, 1971, 230.
- [6] P. W. Beran and S. F. Clifford, Acoustic doppler measurements of the total wind vector, Second Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 1972.
- [7] D. W. Beran, AD. 779085, 1974.
- [8] A. Spizzichino, *J. Geophys. Res.*, 1974, 79 (36).
- [9] В. И. Татарский, Изд. АН СССР, 1959.
- [10] А. С. Мониц, *Акустический Журнал*, 1961, Том 7, Вып 4.
- [11] М. А. Каллистратова, Академия Наук СССР Труды Института Физики Атмосферы, 1962, № 4.
- [12] А. С. Мониц и А. М. Обухов, *Тр. Геофиз. ин-та АН СССР*, 1954, № 24, p. 151.
- [13] B. J. Wyckoff, *J. Appl. Meteor.*, 1973, 12 (7).
- [14] C. B. Emmanuel, B. R. Bean, M. G. McAllister and R. J. Pollard, *J. Atmos. Sci.*, 1972, 29(5).
- [15] A. G. Kjelaos, D. W. Beran, W. H. Hooke and B. R. Bean, *J. Atmos. Sci.*, 1974, 31 (8).
- [16] T. C. Willian, G. B. Walker and R. L. Inman, *J. Appl. Meteor.*, 1972, 11 (8).
- [17] A. S. Frisch and S. F. Clifford, *J. Atmos. Sci.*, 1974, 31 (6).
- [18] F. F. Hall, J. G. Edinger, D. W. Neff, *J. Atmos. Sci.*, 1974, 31 (6).