

高频率相控阵多普勒声雷达 及其应用

潘乃先 陈诗闻

(北京大学)

提 要

回顾了过去十余年间高频率声雷达发展的背景。简要讨论了相控阵天线原理和高频率声雷达的优缺点。对其特殊用途作了扼要讨论。认为此种设备的性能、价格均较优,有着良好的发展前景,是充实我国中小尺度天气研究观测网的较为经济的遥感设备。

声雷达采用阵列式天线并非近几年才有的新鲜事物,早在1968年McAllister研制出世界上第一台声雷达原型时,就采用了49个喇叭的方形阵列作为发射和接收天线。但是当时并未就阵列进行最佳设计,天线尺寸为 $2.1 \times 2.1 \text{ m}^2$ 。显然移动不便,再加上其它的缺点,后来的声雷达多采用单个喇叭加抛物型反射面作为天线。近10余年来,声雷达在边界层气象研究、污染天气监测、厂矿的选址和大气环境评价等方面的应用已比较广泛;在天文台选址和无线电传播的研究中也得到应用。广泛的应用对声雷达在探测高度、测量精度和提供更多信息方面,都提出了更高的要求。但是,一般的多普勒声雷达因采用单喇叭和抛物面天线,使得提高发射功率受到限制,从而限制了最大探测高度。天线的波瓣特性也不很理想。天线系统笨重,用于流动性的观测研究很不方便。又因工作的频率较低,造成表面层和低高度边界层内的资料出现空白。因此,在抛物面天线开始应用后不多几年,就有人利用较小功率的喇叭构成阵列式天线,以期获得较大的发射功率和较高的探测高度。这方面的研究和应用自70年代中期开始一直在进行。一种高

频率相控阵多普勒声雷达也就逐步发展了起来^{[1][2]}。经过在一些边界层课题中的应用,证明它是一种颇具优势的声雷达,值得推广。

一、发展高频率声雷达的依据

声雷达回波信号的多普勒频移 Δf 由下式表示:

$$\Delta f = \frac{2f_0 V}{C} \quad (1)$$

式中, f_0 为发射频率; V 为散射体的径向速度, C 为声速。显见,发射频率愈高则单位径向速度产生的频率愈大,对速度测量的分辨率也愈高。从而可能达到较高的测风精度。提高发射声波频率可使天线尺寸减小,波束方向性改善。发射频率提高后,可以将发射脉冲宽度 τ 减小,从而空间分辨距离 $\tau C/2$ 可以缩短,最低测高可大大降低。采用600Hz的频率,最低测高可降到10m以下,距离门可达5m。这是就声雷达工作原理本身而言提高工作频率带来的好处。但另一方面,声波在大气中的衰减也随频率增高而迅速增大。其中分子吸收衰减与频率平方成正比,逾量衰减(湍流衰减)也近似与频率平

方成正比。因此一般认为频率也不能选得太高,最后只能折衷。近年来商品声雷达的频率就取在1500—2000Hz范围内。

但事情并非到此为止。边界层气象的研究希望有新型的声雷达,能弥补普通声雷达的60m以下的资料空白区,而复杂地形条件下的中小尺度气象研究工作更希望有轻便的设备。实际应用中发现,影响声雷达探测高度的常常不是回波信号太弱而接收不到,却是由于环境噪声使接收到的信号的信噪比太低。自然的和人为的噪声频谱主要集中在音频范围的低端。提高发射频率可以避免噪声能量集中的谱区,从而大大提高信噪比。这就部分补偿了因提高频率而增加的传输衰减损失。这些因素加上前面提到的优点就成为发展高频率声雷达的依据和动力。

二、相控阵天线原理

相控阵天线,是一种将许多喇叭按一定间距排列成方阵(或其它几何形状),直接向外发射声波的天线装置。这些喇叭发出的声波在远场合成为一束功率较大、方向性较好的声波。对于波束的指向可以实现电控制和电扫描。当工作在高频率时,由于采用多个喇叭大大提高了发射功率,在相当程度上补偿了因提高频率而造成的传输衰减损失,从而仍保持了一定的探测高度。这种天线的便携性是不言而喻的。

这里,我们只讨论一维阵列的情形。如图1所示,设声源是点声源,处于 x 轴上的整数坐标位置,相邻两点声源间距离为 d ,同时假定每个点声源发出的声波的频率、振幅和位相均相同,无方向性。声源间无相互作用。用符号 $p(\theta, r)$ 表示平面极坐标中点 P 的位置,同时又表示该点处的声压。第 i 个点声源在平面上 P 点产生的声压可写为

$$p_i(\theta, r) = \frac{A \cos(\omega t - kr_i)}{r_i} \quad (2)$$

式中, A 为发射声波的振幅, r_i 是第 i 个点声

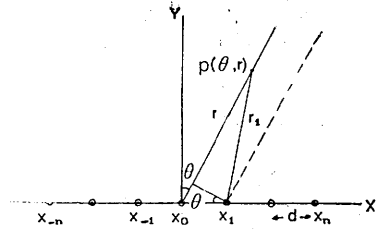


图1 一维阵列声波合成示意图

源到 P 点的距离。全部点声源在 P 点的合成声压为

$$p(\theta, r) = A \sum_{i=-n}^n \frac{\cos(\omega t - kr_i)}{r_i} \quad (3)$$

满足远场条件时,近似有 $r = x_i d \sin \theta + r_i$ 。于是(3)式可改写为

$$p(\theta, r) = \frac{A}{r} \sum_{i=-n}^n \cos(\omega t - kr + kx_i d \sin \theta) \quad (4)$$

当 $\theta = 0$ 时,声压的振幅最大,是单个点声源的 $(2n+1)$ 倍。若设 $d = \lambda/2$,则(4)式化简为

$$p(\theta, r) = \frac{A}{r} \left\{ \left[\sum_{i=-n}^n \cos(x_i \pi \sin \theta) \right] \cos(\omega t - kr) - \left[\sum_{i=-n}^n \sin(x_i \pi \sin \theta) \right] \sin(\omega t - kr) \right\} \quad (5)$$

由(5)式可见,点声源线性阵列的合成声波频率未变,除 $\theta = 0$ 处总振幅是诸点声源振幅的叠加外,其它方向上的振幅和位相都被“调制”了。图2就是依据(5)式计算得到

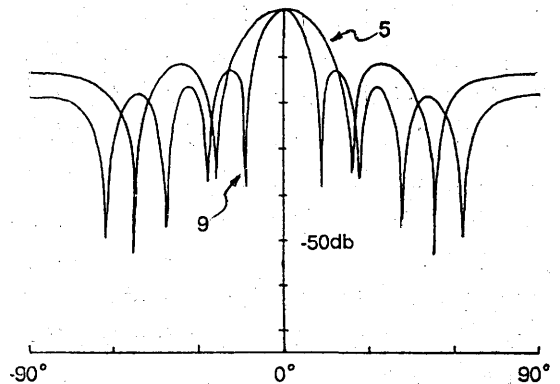


图2 一维阵列的声功率方向图
喇叭数分别为5和9

的一维阵列发射的声功率方向图。

将线阵列扩展为面阵列,就可以计算出发射功率的平面分布。据报道,实测的方向图与理论计算结果相当接近。实际阵列的方向图和每个喇叭的电-声,声-电转换效率,频率和相位响应特性,阵列的型式也有关系。设计制造时要注意喇叭电性能的一致性。

回到(4)式,如果对于每个第*i*个声源,使其发射的声波相对于中心点声源落后位相 $kx_i d \sin \theta$, 显然最后合成的声压为

$$p(\theta, r) = \frac{(2n+1)A}{r} \cos(\omega t - kr)$$

这就是说波束主轴倾斜到了 θ 方向。只要确定喇叭间一定的位相关系,就可以使波束倾斜到相应的方向。由此可以实现声束的电控制扫描。

三、用途

附表列出了几种在边界层气象研究中被用到的高频声雷达的性能。除一般用途外在

附表 高频率声雷达性能

单位	频率	功率	波束宽度	距离分辨	最低高度	最高高度	喇叭数
阿贡实验室(美)	4-12kHz	300W	3°—4°	5m	8m	300m	45
法国国立电信研究中心*	6000Hz	50W	13°	8.5m	13.6m	170m	1
雅典大学(希腊)	4700Hz	~50W	10°	5m	7m	300m	16

* 非相控阵声雷达

下列方面表现出它的特殊功能。

1. 复杂地形的大气研究

复杂地形分布着一些峡谷或河道及山脊。主峡谷的气流与各支流存在着相互作用。各支流又是主峡谷气流的质量来源。地面污染源排放的污染物,在这种复杂地形下的扩散,决定于复杂地形上空的流场和湍流特征以及温度结构。高频声雷达能提供这方面的资料。以阿贡国立实验室的工作为例[3],他们仅用两人就把声雷达安置到了峡谷中心线的沟里。声雷达波束仅3度宽,避免了近处起伏地形对声波的反射。该声雷达每10s就能得到一条风廓线。配合系留气球观测,他们发现,在稳定的下泄流条件下,地表有20—80m厚的逆温层,温度梯度达每100m增加6℃,再上面是近乎等温层直至谷脊(高出声雷达500m)。在他们观测期间,这种温度结构没有太大变化,但是风速、风向在最低的200m层内变化很大。一般说来,可以预计下泄流条件下风是顺坡往下吹的。但是声雷达观测结果是:在整个观测期间,在最低的100m层内下坡风所占比例小于50%,

而另有30%时间有着上坡方向的风分量。导致这一结果的原因主要是峡谷头上各支气流相互作用的结果,有两条溪沟近乎成直角地汇合,造成了风向的大起伏。风速廓线的变化从100m处有一极大值,可变为整个200m以下都很静稳。而200m以上则是峡谷的下泄流风向或大型天气的风向。声雷达资料发现峡谷中存在一个弱而浅的贴地表的下坡风,但不时地因它的上层气流的起伏而遭到周期性的破坏。象上述的细微结构普通声雷达是难以揭示的。

2. 表面层和低高度边界层结构

对于一些高度在60m以下的浅层锋面结构、内边界层和重力波等现象,普通声雷达是无法观测的。高频声雷达已经观测到一些过去未曾见到的边界层现象以及这一层的风廓线和垂直速度分布。混合层发展的初期阶段,盖帽逆温(capping inversion)以上的空气因卷夹作用和其下的空气相混合,这种运动的尺度在时间和空间上都较小,只有高频声雷达才能观测到。掌握卷夹作用的规律,有助于了解在逆温层顶附近积累的污染

物在日出后如何向地面扩散。

3. 热通量测量

对于充分混合层有下列近似关系^[4]：

$$\frac{\sigma_w^3}{z} \approx \alpha^{3/2} \frac{g}{\theta} \overline{w'\theta'} \quad (6)$$

式中 σ_w 为垂直速度标准差， z 为高度， $\alpha \approx 1.4$ ， θ' 为虚位温起伏量， w' 为垂直速度起伏量， θ 为位温。由此可以由声雷达测得的垂直速度标准差廓线求出热通量廓线，将热通量廓线的线性段向下外延至 $z=0$ 处可得到地面热通量。

边界层气象模式研究需要通量的实测数据。直接测量的通量值只代表一个点，而模式的验证和改进需要面上的通量数据，显然，靠增设地面测量点是不现实的。用卫星遥感资料可以推得热通量，但这一方法尚需证实。同样需要较大尺度范围的通量实测值才能与遥感值相比较。声雷达测的通量约可代表 1km^2 以上面积，若声雷达相隔 $15-20\text{km}$ （视地表特征合理分布）则是一个验证卫星通量估计或数字气象模式的较好手段。已经做过的声雷达通量和卫星估计的通量对比表明在统计上是相当一致的。

4. 降水物理

降水粒子会对声波产生散射。Little^[5]曾探讨过声雷达探测降水凝聚物的可能性，并给出瑞利条件下单个球形粒子的声散射截面 $\sigma(\theta)$ 和声雷达反射率 η 的表达式：

$$\sigma(\theta) = \frac{\pi^5 D^6}{9\lambda^4} \left(1 - \frac{3}{2} \cos\theta\right)^2 \quad (7)$$

$$\eta = 0.69\pi^5 \lambda^{-4} v^{-1} \Sigma D^6 \quad (8)$$

式中， D 为雨滴直径， θ 为散射角， λ 为声波波长。对于声雷达的工作频率范围，瑞利条件是满足的。降雨时，声雷达回波由大气散射波和雨滴散射波构成。其多普勒频移可写成

$$\overline{f} - f_0 = 2(\overline{v_a} + \overline{v_R})/\lambda$$

式中， $\overline{v_a}$ 为平均垂直速度， $\overline{v_R}$ 为平均雨滴落速。普通声雷达因发射频率不够高，难以避

开噪声影响并清楚地把两部分频谱区分开来，而对于工作频率为 6000Hz 的声雷达，则对应降水粒子的落速范围 $1-5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 可以得到 $35-176\text{Hz}$ 范围的频谱。由频谱和速度谱的关系

$$s(f) = \frac{\lambda}{2} s(v) \left| v - \frac{\lambda}{2} (f - f_0) \right|$$

可以推断雨滴落速分布。按照水滴落速公式

$$v(D) = 1767 D^{0.67} (\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$$

可以确立速度谱与雨滴谱的关系

$$s(v)dv = \beta N(D) D^6 dD \quad (9)$$

式中 β 为检定系数， $N(D)$ 为雨滴直径在 D 和 $D+dD$ 范围内的数密度。由此可计算雨强和含水量等重要的降水参数。

为了实现用声雷达测量降水，除了提高工作频率外还要避免雨滴直接打在天线上，而雨滴直接撞击喇叭会产生很大噪声。解决办法将是天线转向水平方向发射，再用一倾斜 45° 角的平板将声波反射到垂直方向。这样得到的雨滴谱其数密度大体呈指数分布^[6]，与以前的许多测量结果一致，求得的降水量和同时进行的雨量计测量结果相比也较相符。

对云的测量尚未见进行。云滴直径很小，其反射率比雨的要小得多。半径为 20μ 的云滴的散射截面只有 2mm 雨滴的 10^{-10} 。笔者的观测表明，对于低云声雷达只能收到云底处约 $10-30\text{m}$ 厚的回波。目前，声雷达只能对高度较低含水量较大的云层底部区域进行探测研究。

四、结束语

高频率相控阵声雷达适应了边界层气象研究的需要，尤其在复杂地形条件下更显出它的优越性。它的新特点引伸出某些新用途，如热通量测量，降水物理研究等。这些工作还有待进一步深入。如果把发射功率提高到上千瓦，在云物理方面也有部分工作可做。不过在进行云和降水探测时必须考虑云

滴和雨滴对声波的额外衰减,以提高定量测量的精度。近10年来,在一些国家里,对高频相控阵声雷达的研究和应用表明它是一种颇有前途的遥感设备。1990年初,在印度召开的第五届大气和海洋声遥感国际会议上,鉴于过去的研究和应用成果,在会议纪要中呼吁“商界将来在全球范围生产这种中等价格的系统”,表明了对其应用价值的肯定。

相控阵天线原理赋予了设计者以相当的灵活性。可以根据使用目的设计出便携的高分辨天线,满足对300m以下边界层结构探测的要求;另一方面,也可以设计出庞大的天线阵,面积在100m²以上,功率在3000W以上,探测高度达到几千米以上的声雷达。高频相控阵声雷达既然避开了环境噪声的主要频谱区,同时声束的指向又易于通过计算机控制,理应在监测机场低空风切变上有好的效果,它在机场风切变预警系统中的应用是可以预期的。作者认为,利用相控阵天线组合上的灵活性和易于改变其波瓣特性等特点,利用现代计算机技术,通过精心设计是可能设计出一种频率、功率、分辨距离、声束方向和探测高度都由计算机控制的声雷达。它既适应边界层气象研究中常遇到的不同地形,噪声环境和天气状况等复杂工作条件,又能达到相当探测高度,以满足中小尺度天气研究的某些需要。

我国是个幅员辽阔的国家,各种灾害性天气每年都有发生。在揭示其规律而进行的中尺度天气研究中,边界层的作用是重要的方面之一;工业的发展使得大气污染变得严重,大气监测和污染气象学的研究任务也加重了;人工降雨工作仍将持续下去。用在这些方面的研究和业务工作中的遥感手段如多普勒天气雷达、UHF风廓线仪、无线电一声波遥测系统(RASS)和微波辐射计等在品种和数量上目前尚嫌不足。高频相控阵声雷达的性能价格比较优,即使布网观测其费用也是可以承受的。可以预期,在世界

范围内它的进一步发展和应用有着良好的前景。在我国也应不失时机地开展研制和推广应用。

参 考 文 献

- (1) Coulter, R.L., Martin, T.J. and Depaul, F.D., The Argonne minisodar, Argonne National Laboratory Environmental Research Division Annual Report ANL-83-100, 5-9, 1983.
- (2) Asimakopoulos, D.N., Mousley, T.J., Helmis, C. G., Lalas, D.P. and Gaynor, J., Quantitative low-level acoustic sounding and comparison with direct measurements, *Boundary Layer Meteorology*, 27, 1-26, 1983.
- (3) Coulter, R.L. and Martin, T.J., Results from a high frequency sodar, *Proceedings of The Third International Symposium on Acoustic Remote Sensing of The Atmosphere and Oceans*, 5-24, 1985.
- (4) Weill, A., Klapisz, C., Strauss, B., Baudin, F., Jaupart, C., Van Grunberbeeck, P. and Goutorbe, J.P., Measuring heat flux and structure functions of temperature fluctuation with an acoustic Doppler sodar, *J. C.A. M.*, 19, 199-205, 1980.
- (5) Little, C.G., On the detectability of fog, cloud, rain and snow by acoustic echosounding methods, *J. Atmos. Sci.*, 29, 748-755, 1982.
- (6) Coulter, R.L., Martin, T.J. and Weckwerth, T.M., Minisodar measurements of rain, *Proceedings of The 4th International Symposium on Acoustic Remote Sensing of The Atmosphere and Oceans*, vol.1, 19(1-8), 1988.

A high frequency sodar with phased array and its application

Pan Naixian Chen Shiwen

(Peking University)

Abstract

The background to the evolution of the high frequency sodar is reviewed. The principle of phased array is presented and so is the advantage of high frequency sodar. Such kind of sodar is used for some special purposes. Being a remote sensing instrument, it is obviously with a promising future in an experimental mesoscale observing network considering its lower cost as well as its satisfactory operations.