

雷暴次声探测记录的初步分析

叶子祥 朱丰毅*

(浙江乐清县气象站) (县计量所)

次声是频率低于20HZ、人耳不可闻的声波。由于次声频率低，传播过程中衰减慢、传得远，国内外已有人研究利用雷暴、台风、龙卷、对流暴等天气系统所发出的次声信号作为探测和预报手段。

关于雷暴的次声，早在60多年前国外就有人作过研究。其后，不少人对于雷暴的次声信号频谱作过探讨。Schmidt(1914年)，B.I.Арабаджч(1952年)都曾用谐振箱记录雷暴的次声信号。对于次声频率范围，前者认为在5HZ以下。后者得峰值在0.5HZ。Holmes等人(1971年)指出雷声动态频率谱的61HZ(闪电后13秒钟)和5HZ(闪电后21秒钟)附近分别存在两个峰值。而Few等(1967年)则认为在低于20HZ的雷声功率频谱中没有显著的次声成份。国内一般书籍都认为雷暴次声频率在0.2—2HZ之间，但还没有人在这方面做过认真的试验。

1979年以来，我们曾对五十多次雷暴过程的次声信号，进行探测记录并积累了大量的数据和资料。记录表明雷暴次声的中心频率在3HZ左右。我们把这一结果应用在雷声的判断和报警上，制作了雷声记录器和报警器。并于1980年和1981年对几十次雷暴过

程进行了试验。

一、雷暴次声的探测系统

雷暴次声信号的接收记录装置如图1。次声探头采用中国科学院声学所的动圈式次声探头。原设计的通频带为 10^{-1} 秒周期到 10^2 秒周期。去除其前腔声阻后，通频带的频率上限可达到20HZ左右。放大器是用线性集成运算放大器制作的，经测试，在次声频段有平坦的频率特性。波型由LZ-304函数记录仪进行记录。从石英钟接入时标脉冲，以校准走纸速度。此外，从我们自己研制的雷暴记录仪中引出闪电信号，以便引起注视和核算距离。在系统中加入DCJ-1型低频磁带录音机(五通道，其频率特性从直流到100HZ)记录保存信号。



图1 雷暴次声接收装置示意图

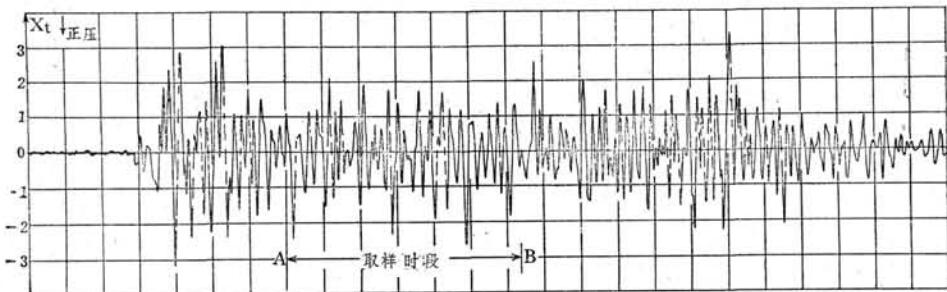


图2 1981年4月3日01时雷暴次声记录，静风，雷暴源离测站3.7公里(原走纸速度1厘米/秒，0.5伏/厘米，此图已缩至1/2)

二、雷暴次声频谱的初步分析

图2是一次雷暴次声信号的例子(1981年4月3日，锋面系统雷暴)。次声信号从正压开始，先出现弱信号，接着很快加强，到一定幅度之后则强弱相间，但强信号之间的时间间隔一般小于4秒钟。

为了分析雷暴次声信号的频谱，我们采用周期图的分析方法[1]，以便得到一个定性的结论。

在图2上所示AB段，每隔0.05秒读数**，共取

132个数值。然后分别计算比较试验周期 $T = 0.15, 0.2, 0.25 \dots 0.6$ 秒，即对应频率约为6.7, 5, 4, 3.3, 2.9, 2.5, 2.2, 2, 1.8, 1.7HZ等10个谐波的“强度”。

*雷暴次声的探测工作得到中国科学院声学研究所的支持和指导。

**读数时，零线(电平零线)以上取正值，以下取负值。取样时，将录音记录重放，用1厘米/0.25秒速度快速走纸，以便准确读数。

设取样序列 x_i 可用 n 个谐波项之和表示：

$$x_i = \sum_{i=1}^n A_i \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_i\right) \quad (1)$$

令 $a = A \sin \varphi$, $b = A \cos \varphi$, (1) 式可展开为：

$$\begin{aligned} x_i &= a_1 \cos \frac{2\pi}{T_1} t + b_1 \sin \frac{2\pi}{T_1} t + a_2 \cos \frac{2\pi}{T_2} t + \\ &\quad + b_2 \sin \frac{2\pi}{T_2} t + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

“强度” $S_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$ 表示了相应周期的振幅的大小，因而可以反映该周期的显著性。其中

$$a_i = \frac{2}{1} \sum_{t=0}^{i-1} \bar{x}_t \cos \frac{2\pi}{T} t$$

$$b_i = \frac{2}{1} \sum_{t=0}^{i-1} \bar{x}_t \sin \frac{2\pi}{T} t$$

(Δ 为取样步长)

$$\text{设 } K = \frac{4\sigma^2 \ln \frac{m}{\alpha}}{n}$$

当试验周期的 $S_i^2 > K$ 时，则可认为周期 T 达到显著性水平 α 。（3）式中 m 是试验周期个数， σ^2 是序列方差， n 为序列项数。

当我们计算某一试验周期 T_i 时，取样步长应取

$$\Delta = \frac{T_i}{0.05}$$

例如当 $T = 0.3$ 秒，即 $f \approx 3.3$ Hz 时，取 $\Delta = 6$ ，计算结果得 $a_6 \approx 0.353$, $b_6 \approx 0.653$, $S_6^2 = 0.55$ 。取 $\alpha = 0.05$ 时， $K = 0.12$ （若 $\alpha = 0.01$, $K = 0.16$ ），可以认为 3.3 Hz 的信号是显著的。我们将计算所得各试验周期的 S_i^2 值点成图（图 3），从图中可以看出， $T = 0.3$ 的强度明显地大于其它周期，是个主要周期。此外，还有 $T = 0.6$, $T = 0.25$ ，其余均不明显。

用同样的方法，我们做了不同距离，不同季节，不同天气系统共 6 个雷暴次声信号的周期图分析。每一个雷暴次声信号都有一个类似图 3 那样的主要周期，其数值在 0.25—0.45 ($f = 2.2$ —4 Hz) 之间。

为了考查我们的探测手段及环境是否对所接收的次声频率有影响，我们做

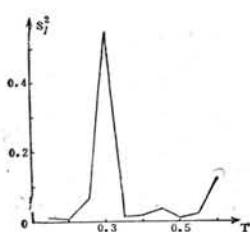


图 3 1981 年 4 月 3 日
雷暴次声周期图

了滤波试验。我们分别用线性集成运算放大器制作了特征频率为 3 Hz, 0.8 Hz, 0.5 Hz, 0.2 Hz 四个有源滤波器（Q 值均等于 2）。据测试，这些滤波器对相应频率的次声信号均有最好的频响。图 4 和图 5 分别是 3 Hz 与 0.8 Hz, 3 Hz 与 0.5 Hz, 0.2 Hz 信号的比较。由图可见，3 Hz 信号明显地比其它信号强，0.2 Hz 基本上无信号。而 0.8 Hz, 0.5 Hz 里较明显

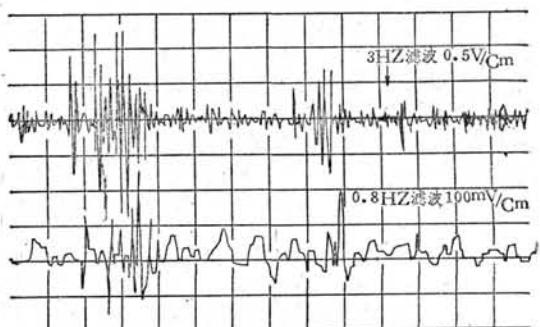


图 4 1980 年 8 月 15 日雷暴次声滤波记录，风速 < 2 米/秒

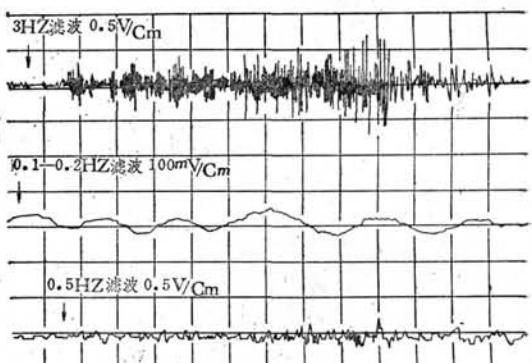


图 5 1980 年 9 月 21 日雷暴次声滤波记录，风速 < 1 米/秒

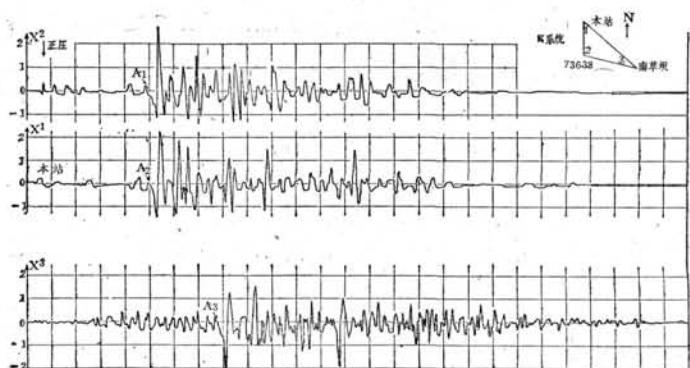


图 6 1981 年 4 月 13 日雷暴次声三点阵记录，静风，走纸速度 1 厘米/秒（此图已缩至 1/3）

的那部分信号，基本上还是经滤波、衰减后的2—4HZ分量。

此外，我们还进行了三点阵接收雷暴次声的尝试。这三个点分别相距1公里以上，图6就是这个三点阵记录。

我们在图6上取特征点A₁、A₂、A₃为始点，每隔0.1秒读数，各取36个样值。然后计算X₁(本站)和其它两个测点X₂、X₃的相关系数，得

$$r_{1,2} = 0.540, \quad r_{1,3} = 0.607$$

假设X₁同X₂、X₃无关，即H₀: $\rho = 0$ ，则r的统计量服从自由度为n-2的t分布[2]，将n=36及r_{1,2}、r_{1,3}值代入得t_{1,2}=3.74，t_{1,3}=4.45，查t(34)=2.75($\alpha=0.01$)。所以三点阵的信号相关性是显著的。因而可以排除测点环境对次声频率的影响。

据以上分析，可以认为雷暴次声频率在2—4HZ的结果是可信的。

三、雷声的判据

雷暴是飞行的主要危险天气之一，许多强烈发展的天气系统均伴有雷暴。但雷暴的观测历来靠目测，常漏记或误记，既辛苦又不准确。目前国内还没有自动记录雷声的仪器，因而解决雷声的自动记录和报警是一项重要的课题。

由于雷暴次声信号强，干扰少，我们采用雷暴次声作为雷声的信号源初步解决了雷声的报警和记录问题。根据雷暴次声信号频谱分析结果，我们对一次雷声的逻辑判断作了如下设置：

(1) 一秒钟内有三个信号强度超过一定门限的正脉冲；

(2) 两次信号之间的间隔不超过5秒；

(3) 一分钟内有过闪电。

这里一个主要问题是如何排除风的次声干扰。我们在分析比较雷声和不同风速的次声频谱时，发现风次声讯号中以0.2—1HZ的信号为主。一般当平均风速小于4米/秒时，2—4HZ分量很弱；随着风速的增大，2—4HZ的分量强度也增加；当平均风速达7—8米/秒时，其中2—4HZ的分量可以达到或超过雷暴次声的强度。为了防止大风引起误判，我们采用探头接收到的次声信号中的0.5HZ分量来控制脉冲触发门限，当风速增大时，门限亦自动提高。

以上逻辑判断的原理框图见图7。这一套装置据三十多次雷暴过程试验，对于雷声多判率大约小于5%，漏判率小于10%（主要发生在大风时）。对雷声

的感应灵敏度比人耳好，基本上达到了观测要求。

四、讨 论

通过雷暴次声信号的观测和频谱分析，我们认为以下两个问题是值得讨论的：

1. 关于雷暴次声产生的物理机制

关于雷暴次声产生的物理机制，目前国内外有人认为是由雷雨云的静电机制产生的[3]。当带电的云产生闪电之后，大气压力降低，形成一个负压的声稀疏脉冲。然后大气压力趋于平衡。这样，大气产生一个以负压为起点到正压的声脉冲。但下列现象不能用这种理论解释：(1) 次声信号不是以负压起始而是以正压为起始；(2) 对于一些云中闪电（当Cb云体很近时），如果人耳不闻雷，则没有观测到明显的次声讯号；(3) 次声讯号较强时，雷暴系统往往离测站一定距离（约2—10公里），天顶雷（测站处于Cb云体正下方）次声讯号反而不强。

事实上我们曾偶然观测到人工降雨时高射炮弹在云中爆炸时发出的次声。这种次声信号频谱同雷暴次声有相似之处（中心频率不同）。因而，我们认为雷暴次声的产生可能同闪电产生的热通道有关。当闪电通道中的空气柱在剧烈增温而迅速膨胀时即产生和爆炸相似的冲击波。在向外传播中，冲击波的宽度逐渐增加。据有关资料[4]，闪电后大约经过0.1—0.3秒钟，冲击波就衰变成声波。开始时这种声波能主要在较高频率，经一定距离之后，次声波能才占主要成分。这种机制产生的次声是以正压为起始的。因此，可以认为雷暴的可闻和次声讯号同来自这一声源。

2. 关于雷暴次声在其它方面应用的可能性

雷暴是大气中的一种重要天气现象，许多灾害性天气同它有关，例如冰雹、龙卷、暴雨等。根据我们的观测记录初步分析，不同天气系统的雷声在持续时间、强度、频谱（2—4HZ）等方面各有不同的特点。因而，雷暴次声的研究有可能为这些目前难以预报的中小尺度天气系统的探测和预报提供信息。雷暴次声的频谱分析能否应用于人工消雹、防雹也是一个很有意义的研究课题。

此外，利用次声阵来进行雷暴声学定位是一种可行的方法。国外在利用三维次声阵进行雷暴定位报警方面已有了成功的研究。我们去年也曾采用三点阵进行近距离雷暴定向的试验。当然，要进行这种试验必须对雷暴次声频谱进行动态频谱分析，用微处理机经过严格的数学处理后，才能得出有关雷暴次声频谱的准确数据。

参考资料

- [1] 谭冠日编《气象站数理统计预报方法》，科学出版社，P250，1978。
- [2] 北大地理物理系编《气象站天气预报基础》，农业出版社，P155，1979。
- [3] 成都气象学院主编，《气象学》，农业出版社，P266，1979。
- [4] R.D.Hill, Thunder,《Lightning》, P385—408, 1977.

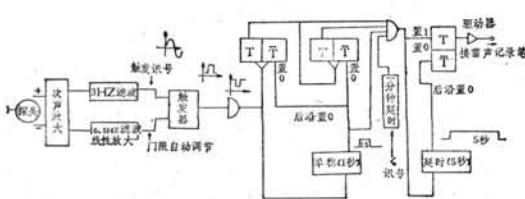


图7 雷声判据设置图