

用信号处理技术及传播理论还原雷声频谱*

欧阳玉花^{1)2)†} 袁萍²⁾ 贾向东³⁾ 王小云¹⁾ 薛思敏¹⁾²⁾

1) (兰州交通大学数理学院, 兰州 730070)

2) (西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070)

3) (西北师范大学计算机科学与工程学院, 兰州 730070)

(2012年7月8日收到; 2012年11月15日收到修改稿)

以往关于雷声的研究都限于观测点雷声频域范围的探讨, 由于噪音和衰减因素的影响, 观测点的雷声频谱有很大失真. 针对在兰州地区观测的一次雷暴过程中的雷声信号, 利用数字信号处理技术, 由观测点处的雷声音频信号得到频率谱, 并对雷声频谱进行噪音分析; 然后结合声音在大气中传播的衰减理论, 分析了不同大气环境对声吸收的影响, 并推算出了声源附近的雷声频率谱.

关键词: 雷声频谱, 信号处理, 传播理论, 峰值频率

PACS: 43.60.+d, 43.28.+h

DOI: 10.7498/aps.62.084303

1 引言

高温高压的闪电放电通道迅速膨胀产生爆炸式冲击波向外传播并转变为声波, 形成雷. 声波的强度、波形特征与闪电放电电流以及通道温度、压强等热力学特性都有密切的关系.

对雷声信号的研究可以追溯到大约 100 年前. 1914 年, 由 Schmidt^[1] 首次记载了空气中由雷声引起的声压变化. 20 世纪 60 年代, Bhartendu^[2] 提出了能谱分析的近似模式. 之后, McCrory 和 Holmes^[3] 对观测点雷声频谱特性做了研究. 近几十年, Uman^[4] 也做了许多自然闪电和人工引雷的观测试验.

以往关于雷声的研究都限于观测点雷声频域范围的探讨. 由于声音在大气中的快速衰减, 受观测距离的影响, 观测点的雷声频谱已经不能准确反映放电通道的物理特性. 目前为止, 雷声信号特性的研究资料仍非常少. 本文结合声音在大气中的衰减理论, 针对兰州地区观测到的雷声信号, 推算出了声源处 (即闪电通道附近) 的雷声频率谱, 分析了其时域特性和频谱特性.

通过雷声频谱特性的研究可以探讨闪电通道的热力学特性. 与光学、电学观测相比, 雷声信号的获取相对容易. 将信号处理技术、声音在大气中传播的衰减理论应用于雷声问题, 这方面的工作是准确研究雷声信号的频域特征、时域特征以及与放电特征、通道温度^[5]、压强等参量相关性的必经环节, 并为进一步研究雷电过程物理特性奠定基础.

2 理论

雷声辐射一般分为两类^[6]: 一是雷声由闪电放电热通道的急速膨胀引起的, 因此, 声音的频谱特征与闪电放电特性和通道内部的热力学特性密切相关; 二是静电辐射, 由遍及云电荷区的静电场产生的, 属于次声. 本文讨论的是前者——可闻频段的雷声.

2.1 雷声信号处理

在兰州地区进行了自然雷电的观测试验, 对于所得雷声信号, 文章采用了如图 1 所示的仿真分析

* 国家自然科学基金 (批准号: 61261015) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: ouyangyh1104@163.com

模型结构. 该仿真分析模型由以下几部分构成.

2.1.1 雷声信号预处理 [7]

1) 信号的采样、量化和编码: 在本文中, 使用采样频率 $F_s = 8000$ Hz.

2) 雷声信道特征估计: 在雷声信号频段内, 将信道环境的干扰噪声分量看作是一白噪声序列激励一个线性系统 $H(z)$ 的输出. 在一定的噪声水平条件下 (方差 σ^2), 可以估计出信道特征 $\hat{H}(z) = X_1(z)/W(z)$, 本文采用了自回归模型 (autoregression, AR 模型) 参数估计方法. 运用该信道估计 $\hat{H}(z)$, 对信号 $x_{d1}(n)$ 进行滤波可得信号 $x_{d2}(n)$.

3) 低通滤波: 雷声信号主要在低频部分, 即 $f \in [0, 2000]$. 因此, 在信号的预处理阶段, 设计了低通滤波器, 得信号 $x_{d3}(n)$.

4) 去工频信号: 在试验中, 录制的雷声信号会受到工频信号的干扰, 用陷波器滤出工频信号的影响, 得 $x_{d4}(n)$.

5) 去均值、归一化: 去除均值, 可避免在估计该信号的功率谱时, 零频位置的谱峰影响附近的频谱曲线, 再归一化, 得到长度范围、幅值范围统一的信号 $x_{d5}(n)$.

6) 分割信号: 信号的长度 N 与信号的频率分辨率 Δf 要求满足 $N \geq \frac{1}{\Delta f}$, 分割帧长.

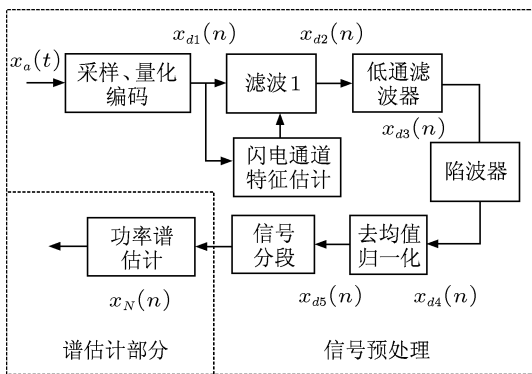


图1 雷声信号分析系统模型

2.1.2 功率谱估计

经过上述过程, 得到了目标信号序列 $x_N(n)$ ($n = 0, 1, 2, \dots, N-1$), 利用周期图谱等估计方法可以估计出序列的频率谱特性. 图2给出了基于周期图的 Welch 谱估计方法流程, 通过对信号的重叠分段、加窗处理和傅里叶变换 (FFT) 算法计算一个信号序列的频谱密度. 假设窗函数记为 $d_2(n)$, 则可分

别计算各段的频谱:

$$P_{\text{per}}^i(k) = \frac{1}{MU} \left| \sum_{m=0}^{M-1} x_M^i(m) d_2(m) e^{-j\frac{2\pi}{M} km} \right|^2 = \frac{1}{MU} |X_M^i(k)|^2, \quad (1)$$

式中 $U = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} d_2^2(m)$ 是归一化因子. 再对每一段功率谱相加, 取平均即得平均周期图.

2.2 传播效应

雷声的传播是在雷暴环境下的大气中, 这种情况下的大气是微粒分布不均匀、各向异性、且风速任意变化的介质. 有三个明显的传播效应 [8]: 有限幅度传播、大气吸收、热折射.

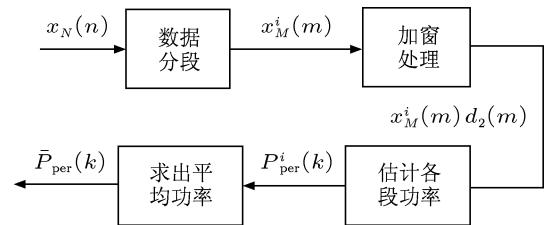


图2 Welch 谱估计流程图

2.2.1 有限幅度传播

雷声源自闪电通道急速膨胀引起的“N”形脉冲, 在空气中传播, 其波形会演化为波长更长的“N”形波, 基于有限幅度传播的波长 L_g 由下式给出 [6]:

$$\frac{2}{3} (L_g^{3/2} - L_0^{3/2}) = \frac{\gamma+1}{4\gamma} R_0 L_0^{1/2} \Pi_0 \left[\ln \left(\frac{H_0}{R_0 \cos \theta} \right) - \frac{H_0}{2H_g} \right], \quad (2)$$

式中 L_0 是脉冲的初始波长, γ 是大气的比热容比, H_0 是脉冲源距地面的高度, H_g 是观测时刻脉冲传播所到达的距离.

在 1 km 内可以使波长增至 2 倍, 但超过这个范围, 波长几乎不再变化. 之后的传播效应主要是大气吸收.

2.2.2 大气吸收

大气介质对雷声传播的影响很大, 主要包括在固体表面上及气层之间的界面上的折射和反射、雨和水汽对声的反射和吸收等. 其中, 吸收是声波衰减的主要因素. 大气对声波的吸收主要包含两方面: 一是大气的黏性和导热性导致的“经典吸收”;

另外,由大气分子的双原子结构引起的能量转移也会导致声波能量的衰减.

吸收效应使得声压振幅与距离的关系为

$$\delta P = \delta P_0 e^{-\alpha x}, \quad (3)$$

式中 δP_0 是初始声压振幅, δP 是传播了距离 x 后的声压振幅; α 是吸收系数,由三部分叠加组成: $\alpha = \alpha_{cl} + \alpha_{rot} + \alpha_{vib}$, 这里 α_{cl} , α_{rot} 和 α_{vib} 分别表示经典、转动和振动吸收系数.

对于频率为可闻范围的雷声,吸收系数由下式计算:

$$\begin{aligned} \alpha = & \alpha_{cl} + \alpha_{rot} + \alpha_{vib,O} + \alpha_{vib,N} \\ = & f^2 \left\{ 1.83 \times 10^{-11} \left(\frac{p_0}{p} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/2} + \left(\frac{T_0}{T} \right)^{5/2} \right. \\ & \times \left(\frac{1.278 \times 10^{-2} e^{-2239.1/T}}{f_{r,O} + (f^2/f_{r,O})} \right) \\ & \left. + \left(\frac{1.069 \times 10^{-1} e^{-3352/T}}{f_{r,N} + (f^2/f_{r,N})} \right) \right\}, \quad (4) \end{aligned}$$

其中 $f_{r,O}$ 和 $f_{r,N}$ 分别是氧和氮振动弛豫的最大吸

收频率,具体表达式如下:

$$f_{r,O} = (p/p_0) \{ 24 + 4.41 \times 10^4 h [(0.05 + h)/(0.391 + h)] \}, \quad (5)$$

$$f_{r,N} = (p/p_0) (T/T_0)^{-1/2} [9 + 350h \times \exp\{-6.142[(T/T_0)^{-1/3} - 1]\}]. \quad (6)$$

于是,如果已知大气参数就可利用上述计算式计算出大气吸收系数.

3 计算结果和实验数据分析

3.1 计算结果

3.1.1 有限振幅传播效应引起的波长增加

雷声一旦产生,必然在大气中传播很远距离,若要还原失真必须要考虑传播效应.由方程(2)可得有限振幅传播效应的波长增加,计算结果如表1所示,给出了不同弛豫半径 R_c , 不同角度 θ , 不同高度 H_0 情况下的波长增加数据.

表1 基于有限振幅传播效应的波长增加 (L_g/m)

H_0/km	$R_c/m, L_0/m$										$\theta/(^\circ)$
	(0.20, 0.11)	(0.60, 0.32)	(1.00, 0.53)	(1.50, 0.80)	(2.00, 1.06)	(2.50, 1.33)	(3.00, 1.59)	(3.50, 1.86)	(4.00, 2.12)	(4.50, 2.39)	
1	0.257	0.673	1.047	1.481	1.891	2.281	2.657	3.021	3.374	3.717	0
2	0.275	0.729	1.140	1.620	2.076	2.513	2.935	3.345	3.744	4.135	0
4	0.292	0.779	1.223	1.746	2.243	2.722	3.186	3.637	4.078	4.510	0
8	0.305	0.818	1.289	1.843	2.373	2.885	3.381	3.865	4.339	4.803	0
1	0.261	0.686	1.068	1.513	1.933	2.334	2.720	3.095	3.458	3.812	30
2	0.280	0.742	1.161	1.652	2.118	2.566	2.999	3.419	3.829	4.230	30
4	0.296	0.792	1.245	1.777	2.285	2.775	3.249	3.711	4.163	4.605	30
8	0.309	0.831	1.310	1.875	2.416	2.937	3.445	3.940	4.424	4.899	30
1	0.267	0.704	1.098	1.558	1.992	2.409	2.810	3.199	3.577	3.947	45
2	0.286	0.760	1.191	1.697	2.178	2.640	3.088	3.523	3.948	4.364	45
4	0.302	0.810	1.274	1.822	2.345	2.849	3.339	3.816	4.282	4.740	45
8	0.315	0.849	1.340	1.920	2.475	3.012	3.534	4.044	4.543	5.033	45

表1中,作为代表,角度 θ 取 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 三个值,声源高度 H_0 取 1, 2, 4, 8 km 四个值,分别计算出相应加长的波长 L_g ,由于有限振幅传播效应,波长在 1 km 之内增加到初始波长 L_0 的两倍,之后波长几乎保持恒定;相同角度、相同高度情况下,随着弛豫半径的增大,波长的增量也呈明显的正相关增大趋势.

3.1.2 大气对声波的吸收系数

由(4)式,得到图3所示的吸收系数曲线.在 20—300 Hz,总吸收随频率快速增大,之后的变化比较平缓.在相同气象条件下,一般来说高频声波的衰减远较低频声波的大,所以低频声波在空气中可传播很远距离^[9,10].

Few^[6] 计算了典型大气条件下的声吸收系数,发现对于低于 100 Hz 的声信号,传播 10 km 其大

气吸收很小,几乎可以忽略不计. Bass 和 Losely^[11] 计算了相对湿度 H_r 为 50%, 温度为 293 K 情况下 400 Hz 声信号传播 5 km 的声吸收, 计算结果是吸收因子为 3 dB, 而频率为 50—100 Hz 时, 吸收因子几乎为 0. 显然, 本文所得结论与上述文献符合得很好.

O_2 和 N_2 的分子振动损耗被空气的水汽含量所“催化”, 因此这部分损耗对空气中水汽含量(湿度)是非常敏感的^[12]. 各种能量转移速率与作为水汽含量函数的最大吸收频率之间并无简单的单调变化关系, 频率可对不同的湿度算出^[13]. 由图 3(a) 可以看出, 对于常温和标准气压下, 空气湿度越大越不利于声信号传播.

内自由度的弛豫过程也会导致声能损失. 当局部温度升高时, 内自由度模式的能量也增加, 如温度变化得很慢, 内能的变化量就等于 $c\Delta T$, 这里 c 为内能模式比热容, 而 ΔT 为环境温度与存在声波时温度之局部差. 对于低频, 局部温度取极大值时进入内模式的任何能量在局部温度一旦开始下降时便立即减小, 然而气体平动能与内能模式之间这种能量的来回转移仅当气体分子相互碰撞时才能够发生^[14]. 对于一个特定的能量模式, 在非常低的频率下不会造成吸收. 随着频率上升到被称为该模式的弛豫频率的某个值 f_r 时吸收就增加了. 分子能量转移速率为常数, 从而弛豫频率以几种方式依赖于温度^[15]: 首先, 对于给定的压力, 温度增加造成密度减小; 其次, 温度增加使平均分子速率增加, 这两种效应导致与黏性系数的变化成反比的碰撞频率的净降低, 然而碰撞频率的降低通常为能量转移概率与温度增加相伴随的增加所抵消. 由于声速和黏性系数随温度变化, 因此吸收系数也随温度变化, 如图 3(b). 在大气温度范围 (265—315 K) 内, 对于频率较高的信号, 温度越高吸收越明显.

图 3(c) 是不同压强下的吸收系数 - 声频率曲线. 经分析发现, 对于 500 Hz 以上的信号, 吸收与大气压强是呈正相关的; 低于 500 Hz 时, 压强对吸收几乎无影响, 但略微呈反相关变化关系. 弛豫过程造成了分子内外自由度能量交换和声波压扩之间不是同相变化, 在每一次声波压扩循环中, 就有一部分声能暂时滞留在分子的内自由度上, 最终使气体变热造成声波能量损耗. 弛豫吸收的大小一方面取决于分子内自由度获得能量的能力, 即内自由度热容的大小; 另一方面还取决于分子内外自由度相互交换能量的多少, 当弛豫时间与声波周期相比

过高或过低时, 内外自由度之间几乎没有能量交换, 而只有当两者接近时才会有明显的弛豫吸收发生. 分子内自由度又可分为转动和振动两种, 而对于中

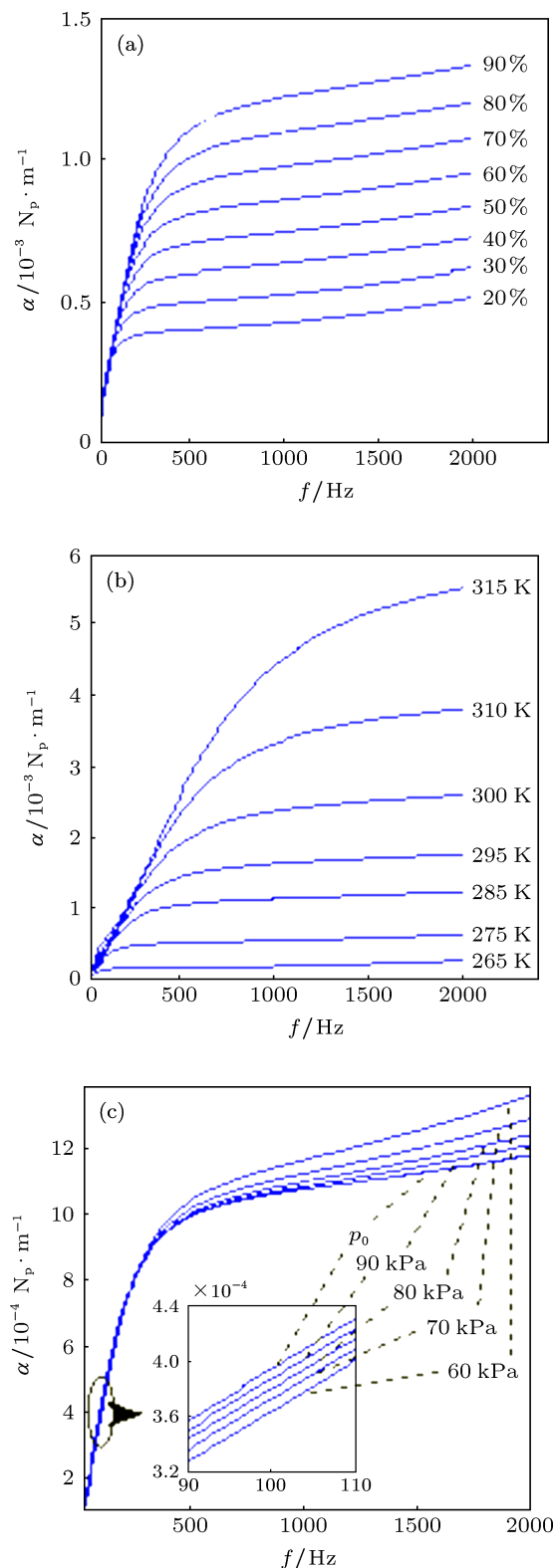


图 3 不同大气条件的声吸收系数 (a) $T = 293$ K, $p = 101325$ Pa; (b) $H_r = 70\%$, $p = 101325$ Pa; (c) $H_r = 70\%$, $T = 293$ K

低频声波, 振动弛豫吸收远大于转动弛豫吸收. 振动弛豫时间依赖于气体压强, 压强越小弛豫时间越长^[16]. 对于 500—2000 Hz 的雷声, 从整个声波频率范围来说是属于低频段, 即声波周期大, 所以气压越小, 弛豫时间与声波周期越趋接近, 弛豫吸收系数就越大; 而对于 20—500 Hz 的声波, 主要是氮分子的振动吸收的贡献, 由 (6) 式可知, 氮振动弛豫的最大吸收频率 $f_{r,N}$ 随压强的增大而增大, 根据 (4) 式计算, 该低频范围, 压强越大吸收系数越大, 但差别不明显, 只有在图 3(c) 下方的放大图中才能看出.

在大气中主要吸收机制是分子弛豫吸收. 考虑大气吸收时, 相对湿度、温度和压强都是重要的参量. 本工作通过分析湿度、温度以及压强对声吸收的影响, 发现在通常的大气条件范围内, 温度对声吸收影响最大, 其次是湿度, 大气压强对声吸收的影响相对较小. 图 3(c) 表明, 对于 1000 Hz 以上的较高频段的雷声来说, 其他环境参数一样的情况下, 传播路径的气压越小雷声信号的衰减越明显. 可以推测在地面观测记录到的云闪的雷声信号, 其高频成分要比地闪的雷声信号的高频成分弱. 因为云间闪电的雷声, 首先较多地经过云粒子的散射和吸收, 然后穿过高空的稀薄空气, 所以高频成分的信号损失更多.

3.2 观测资料和数据分析

选取了 2012 年 5 月 20 日 23 时在甘肃兰州地区观测到的一次雷暴过程中的雷声信号. 此次降雨为兰州 5 月少见的强降雨, 排在 1951 年以来 5 月单日降雨量的第三位. 降水量为 40.5 mm, 达到大雨量级. 当日白天, 晴朗闷热; 下午 5 时许大风陡起, 气温也急转直下; 当晚 11 时许, 大风愈加猛烈, 雷鸣闪电. 雷暴过程中气压为 75—77 kPa, 湿度为 80%—92%, 温度为 13 °C—20 °C.

3.2.1 雷声信号的声强时域信号

声敏传感器采集音频信号后, 经前端调制器将模拟音频信号转换成数字信号, 经过中间的音频传输控制线传送到计算机, 形成音频文件. 再进行采样、量化、编码处理, 将音频信号可视化, 作为雷声信号的原始特征. 对信号进行噪音处理, 把各种频率组成的混合信号按不同的分辨尺度分解成一系列不同频率的块信号, 分别对跟雷声混在一起的风声雨声等噪音进行滤波处理, 就可得到雷声声压振幅 - 时间关系图, 见图 4. 雨声的频率范围很广,

近似按 Gauss 白噪声处理; 风声频率范围为 80—300 Hz, 与雷声频谱有重叠, 采用了基于希尔伯特变换和自适应处理的滤波技术进行频谱重叠混合信号的分离^[17-19].

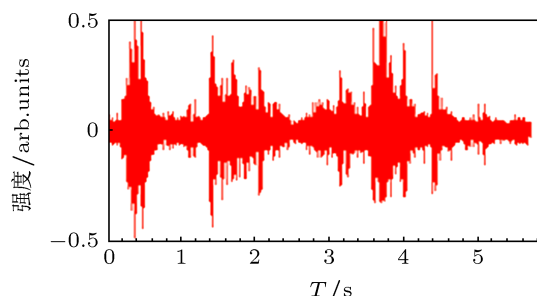


图 4 雷声时域信号

从听觉上判断, 霹雳声是突然的、比较大的响声, 从图 4 来看, 振幅突然变大的地方对应的就是霹雳声起始. 分析试验数据发现, 第一个霹雳声之前就已经有较弱的声音, 其起源有两种^[20]: 1) 对于地闪, 是由地面向上的多个连接先导过程^[21,22]; 2) 对于云闪, 当放电通道与观测视线近似垂直, 且通道长度与距观测者的距离相仿的情况.

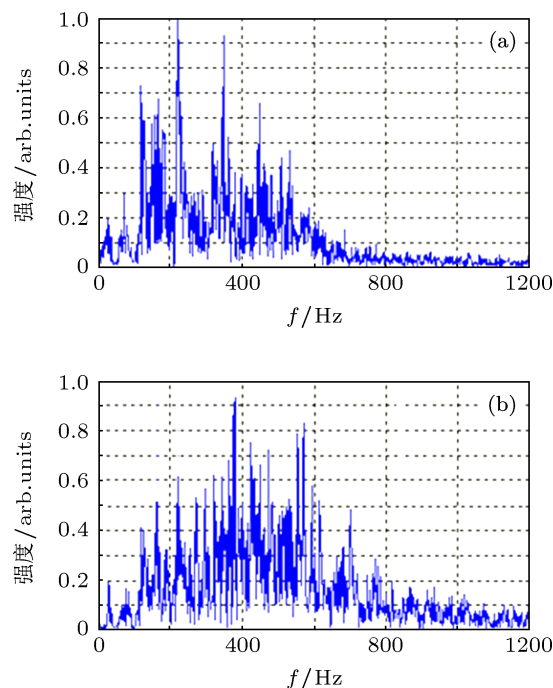


图 5 某次放电过程对应的雷声频谱 (a) 观测点处获得的雷声频谱; (b) 推算到通道附近的雷声频谱

3.2.2 雷声频谱

将采集到的声压强度信号, 使用传统方法通过计算频域峰值作为特征进行分析, 但是经典的 FFT

只能针对平稳信号进行分析, 对非平稳的雷声信号进行非平稳信号的短时 FFT, 使用加窗的方法来处理, 即可由雷声时域信号获得频谱, 见图 5(a), 这就是观测点的雷声频谱. 采集范围为 0—2000 Hz, 在 1200 Hz 以上几乎没有信号, 所以横坐标取为 0—1200 Hz. 横坐标是频率, 纵坐标为相对强度. 再通过计算传播效应, 将观测点处的雷声频谱信号反演到闪电发生点附近^[23], 就得到很大程度上还原了失真的雷声频谱, 图 5(b) 所示即闪电通道附近的雷声频谱.

对比分析图 5(a) 和 (b), 观测点雷声频谱的峰值频率较低, 大约在 200 Hz 附近, 而推算到通道附近, 其峰值频率明显向高频方向移动, 在 400 Hz 附近. 雷声传播过程中, 越往高频衰减越厉害, 反

推到声源附近的频谱, 其高频信号较观测点处的明显增强.

4 结论

将信号处理技术应用于雷声问题, 阐述了雷声信号的噪音处理方法. 对兰州地区采集到的雷声进行了分析. 将采集到的雷声信号用傅里叶变换得到雷声频谱, 再通过谱分析以及滤波处理消除噪音, 获得观测点处的频谱, 利用声音在大气中的传播理论, 推算出闪电通道附近的雷声频谱. 结果发现: 推算到通道附近的雷声频谱, 其峰值频率明显向高频方向移动; 雷声信号随着频率的增大衰减越明显.

- [1] Few A A 1969 *J. Geophys. Res.* **74** 6926
- [2] Bhartendu H 1968 *Can. J. Phys.* **46** 269
- [3] McCrory R A, Holmes C R 1968 *Can. J. Phys.* **46** 2333
- [4] Uman M A 2001 *The Lightning Discharge* (Mineola, New York: Dover) p377
- [5] Ouyang Y H, Yuan P, Qie X S 2006 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **26** 1988 (in Chinese) [欧阳玉花, 袁萍, 郗秀书 2006 光谱学与光谱分析 **26** 1988]
- [6] Few A A 1995 *Acoustic Radiations from Lightning* (Boca Raton, Florida: CRC Press) p1
- [7] Ingle V K, Proakis J G 2003 *Digital Signal Processing Using MATLAB* (Beijing: Science Press) p183
- [8] Yang X R 2007 *Atmospheric Acoustics* (Beijing: Science Press) p122 (in Chinese) [杨训仁 2007 大气声学 (北京: 科学出版社) 第 122 页]
- [9] Ouyang Y H, Yuan P 2012 *J. Earth Syst. Sci.* **121** 211
- [10] Zhang J C, Yuan P, Ouyang Y H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8287 (in Chinese) [张景川, 袁萍, 欧阳玉花 2010 物理学报 **59** 8287]
- [11] Bass H E, Losely R E 1975 *J. Acoust. Soc. Am.* **57** 822
- [12] Wei R J, Tian Y R 1987 *J. Acoust. Soc. Am.* **81** 1350
- [13] Sutherland L C, Bass H E 2006 *J. Acoust. Soc. Am.* **120** 2985
- [14] Cole J E, Dobbins R A 1971 *J. Atmos. Sci.* **28** 202
- [15] Bass H E 1980 *J. Acoust. Soc. Am.* **67** 1959
- [16] Zhang K S, Wang S, Zhu M, Hu Y, Jia Y Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 174301 (in Chinese) [张克声, 王殊, 朱明, 胡轶, 贾雅琼 2012 物理学报 **61** 174301]
- [17] Liu Y, Guo J, Ye Z H 2005 *J. Southeast Univ.* **35** 333 (in Chinese) [刘云, 郭洁, 叶芝慧 2005 东南大学学报 **35** 333]
- [18] Wang W R, Yu J L, Luo J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104220 (in Chinese) [王文睿, 于晋龙, 罗俊 2011 物理学报 **60** 104220]
- [19] Guo Y C, Hu L L, Ding R 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 054304 (in Chinese) [郭业才, 胡苓苓, 丁锐 2012 物理学报 **61** 054304]
- [20] Wang D H, Qie X S, Guo C M 2000 *Lightning and Artificially Triggered Lightning* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University) p81 (in Chinese) [王道洪, 郗秀书, 郭昌明 2000 雷电与人工引雷 (上海: 上海交通大学出版社) 第 81 页]
- [21] Hill R D 1977 *Thunder in Lightning* (New York: Academic Press) p385
- [22] Malan D J 1963 *Physics of Lightning* (London: The English Universities Press) p156
- [23] Shi J, Yang D S, Shi S G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 124302 (in Chinese) [时洁, 杨德森, 时胜国 2012 物理学报 **61** 124302]

Thunder acoustic spectrum obtained by using digital signal processing and propagation effects*

Ouyang Yu-Hua^{1)2)†} Yuan Ping²⁾ Jia Xiang-Dong³⁾
Wang Xiao-Yun¹⁾ Xue Si-Min¹⁾²⁾

1) (School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

2) (College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

3) (College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

(Received 8 July 2012; revised manuscript received 15 November 2012)

Abstract

There are a few references on thunder at present, moreover they are all about thunder frequency spectrum at observation location. However, thunder frequency spectrum in observation location is a distorted signal because of noises and sound attenuation effects. In this paper, thunder signal from lightning discharge channels is obtained in Lanzhou of China. By using digital filter and Fourier transform, thunder frequency spectrum at the observation location is gained. Then, thunder frequency spectrum near lightning discharge channel is computed with the theory of sound propagation effects.

Keywords: thunder frequency spectrum, signal processing, propagation effects, peak frequency

PACS: 43.60.+d, 43.28.+h

DOI: 10.7498/aps.62.084303

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61261015).

† Corresponding author. E-mail: ouyangyh1104@163.com