

雷声在大气中传播的吸收衰减特性研究*

张景川¹⁾²⁾ 袁 萍^{1)†} 欧阳玉花¹⁾³⁾

1)(西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070)

2)(塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300)

3)(兰州交通大学数理与软件工程学院, 兰州 730070)

(2009 年 3 月 31 日收到; 2010 年 2 月 18 日收到修改稿)

选取青海大通地区一次地闪过程的雷声信号, 利用信号处理理论, 得到了观测点雷声的频谱; 依据声波在大气中传播的理论, 计算了大气对雷声传播的吸声系数, 分析了吸声系数随环境因素的变化, 结果表明: 闪电发生距离、大气湿度和温度是影响雷声传播的主要因素. 在一定闪电距离和大气环境下, 吸声系数随频率的增加而增大; 频率小于 100 Hz 的雷声衰减很慢, 空气相对湿度和温度对其吸声系数的影响也比较小, 在一定距离内的衰减可以忽略; 频率大于 500 Hz 的高频信号吸声系数较大, 并且随相对湿度的增加而快速递增; 吸声系数随温度呈非单调变化, 频率越大吸声系数峰值对应的温度越高. 传播过程中, 高频段信号优先衰减. 由此推断: 考虑了传播过程中的衰减因素后, 雷声源的频谱中应该有比较强的频率高于 500 Hz 的成分.

关键词: 雷声传播, 大气吸收, 衰减

PACC: 9265D, 9260P, 9260

1. 引 言

闪电回击电流高达几十甚至上百千安, 通道温度通常在 30000 K 左右, 压强达几十个大气压, 并且高度电离, 是典型的等离子体通道^[1]. 强大的闪电电流使高温、高压的等离子体通道向外膨胀产生冲击波, 并迅速衰减为声波, 形成雷^[2]. 声波的强度、频谱特征与闪电放电特性和通道温度、压强等热力学参量密切相关, 这方面的工作对探讨闪电放电以及通道膨胀过程的物理特性都有重要意义.

关于雷的研究, 早在 1738 年, DeL' Isle 就观测到距离大于 25 km 处的闪电发出的雷声. 1968 年, Bhartendu 使用雷功率谱分析雷声^[3]. Few^[4] 对记录到的地闪雷声的功率谱分析得出: 雷声不满足标准功率谱分析方法的条件, 功率谱随记录地点不同而呈现很大变化. Holmes 等^[5] 报道, 不存在雷的特征频谱或优势频率, 雷功率谱的峰值在小于 4—125 Hz 的频率范围内, 一些云对地闪电放电的雷声功率谱峰值处于可闻声波段, 云中或某些云对地闪电放电的雷功率谱峰值处于次声波段.

大气介质的性质对雷声传播的影响, 包括在固体表面上及气层之间的界面上的折射和反射, 雨和水气对声的反射和吸收, 大气中的声传播通道等. 有关这些影响最先由 Remillard^[6] 提出. Harris^[7] 基于大气介质对声波能量的吸收, 通过计算建立了吸声系数表, 说明了雷声信号的幅度随传播距离而减小, 吸声系数是雷声信号频率、大气温度和湿度的函数. Bass 等^[8] 计算了在大气相对湿度 50%, 温度 293.15 K 环境中, 距离闪电 5 km 处雷声, 信号的衰减因子为 3, 得出: 改变相对湿度从 20%—100%, 衰减因子逐渐增加; 并且, 50—100 Hz 的信号衰减可忽略. Few^[9,10] 计算了标准大气环境的吸声系数, 得出衰减是由于声波从云粒子中散射所致, 这种形式的散射也优先衰减了雷声的高频成分, 近距离处能听到的雷声高频成分, 在超出几千米的距离就听不到, 而且, 对相同的闪电和观测距离, 在不同的大气环境下吸声系数也不同. 近年来, 关于雷声的研究很少, 目前为止, 国内没有这方面的研究工作.

雷声在大气中传播的吸收衰减是探讨雷以及闪电放电通道相关物理特性必需的参数. 本文根据大气声学^[11] 理论, 利用一次地闪过程的雷声信号,

* 国家自然科学基金(批准号:40475007), 西北师范大学科技创新工程项目(批准号: NWNNU -KJXGCG-03-21)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yuanp@nwnu.edu.cn

结合大气压强、温度、相对湿度和闪电发生距离等观测数据,计算了可闻雷声中三分之一倍频程带滤波器的常用频率^[12]的吸声系数,讨论了吸声系数与雷声频率、大气温度、相对湿度和气压之间的关系,为进一步研究雷声频谱特性、揭示闪电通道的膨胀过程的物理机理提供了参考数据.

2. 理论与方法

介质对声波的吸收效应可以用声压吸声系数 α 来衡量,以 dB/m 计. 依据声音传播吸收的理论,计算雷声在大气中的吸收衰减,主要需要考虑由于大气介质的黏滞性和热传导性引起的“经典吸收”和大气分子的双原子结构引起的“分子吸收”^[13,14].

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

式中大气的总吸声系数 α 由经典吸声系数 α_{cl} 、转

动吸声系数 α_{rot} 和振动吸声系数 α_{vib} 三部分叠加组成,其中振动系数 α_{vib} 由占主要成分的 O_2 和 N_2 的振动吸声系数 $\alpha_{vib,O}$ 和 $\alpha_{vib,N}$ 叠加而成. f 表示频带中心频率; p 为环境大气压; T 表示环境温度; p_0 表示基准大气压 ($p_0 = 101.325$ kPa); T_0 表示基准大气温度 ($T_0 = 293.15$ K); $f_{r,O}, f_{r,N}$ 分别表示氧和氮的振动弛豫频率^[15,16]

$$f_{r,O} = (p/p_0) \{ 24 + 4.41 \times 10^4 h [(0.05 + h) / (0.391 + h)] \}, \quad (2)$$

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

(2), (3) 式中 h 表示水气分子浓度,

$$h = \frac{h_r (p_{sat}/p_0)}{p/p_0}, \quad (4)$$

其中, h_r 表示空气相对湿度; p_{sat} 表示水的饱和蒸汽压.

$$\begin{aligned} \lg(p_{sat}/p_0) &= 8.422 - 10.06(T_0/T) - 5.023 \lg(T_0/T) \\ &\quad + 23 \times 10^{-4.44}(T_0/T). \quad (5) \end{aligned}$$

由(1)–(5)式表示的大气吸声系数与声波频率、大气温度、湿度和环境气压密切相关,因此,需要讨论一定频率的声波在相应的大气温度、湿度和气压下的吸声系数.

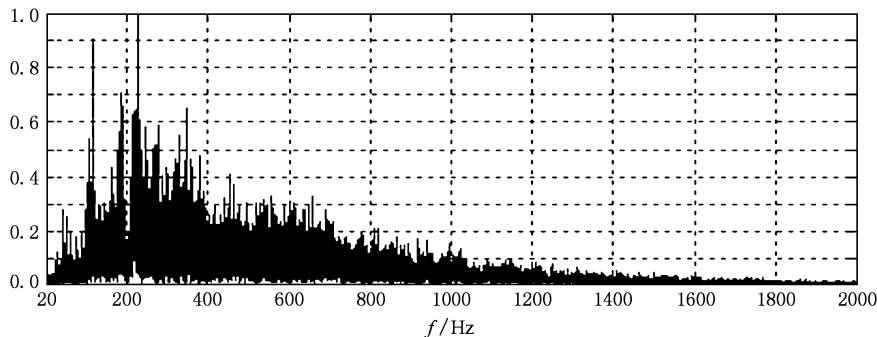


图1 在青海的一次地闪雷声频谱,闪电距离4 km

3. 结果与讨论

试验采用录音设备记录雷声信号,通过雷声和光到达观测点的时间差得到声源距离. 这里,选取了2002年8月15日,北京时间19:21:22,在青海大通地区记录的4 km处的一次地闪的雷声信号^[17],观测点的环境气压为75.73 kPa,温度为293.15 K,相对湿度为60%. 通过声敏传感器记录的音频信号经数字化后送到计算机,利用信号处理理论,对声波信号进行

分析. 图1是将到达记录点的雷声信号前沿经过信号处理得到的频谱图,横坐标表示雷声频率,纵坐标表示相对强度,该信号没进行滤波和消除噪声处理. 由于试验采用的是录音设备记录雷声,所以频谱中只有可闻部分. 可以看出,4 km处记录的这次雷声信号的峰值频率在200 Hz左右. Depass在70 m处记录到的一次人工触发闪电的雷声的峰值频率在700 Hz附近^[18]. 由于传播过程中高频信号衰减较快,其相对强度随频率的增加迅速降低,所以,图1中1500 Hz以上的高频成分相对强度几乎为零.

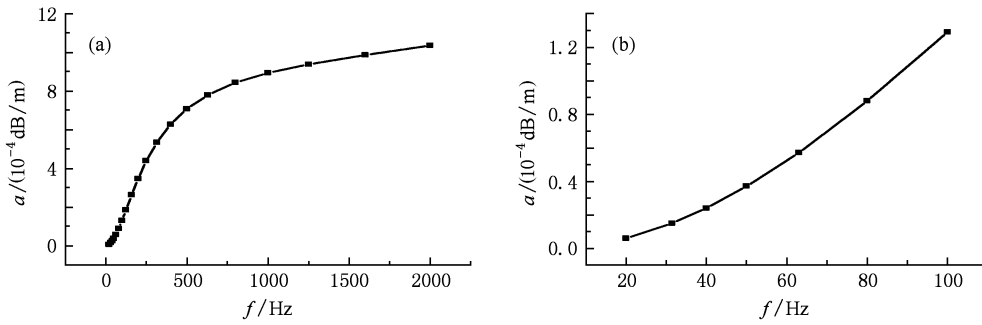


图2 环境气压为 75.73 kPa, 温度 293.5 K, 相对湿度为 60% 时, 吸声系数随雷声频率的变化关系(闪电距离为 4 km) (a) 雷声频率范围为 20—2000 Hz; (b) 雷声频率范围为 20—100 Hz

用三分之一倍频程带通滤波器分析雷声, 使用频率为频带中心频率, 由(1)—(5)式计算了大气对雷声的吸声系数. 图 2(a)(b) 给出了吸声系数与雷声频率的关系. 由(a)图可以看出, 吸声系数随频率的增加单调增大. 对于频率小于 100 Hz 的雷声, 吸声系数非常小、并且随频率的变化不太明显, 图 2(b) 进一步表明了这一规律. 从而得出: 在闪电距离 4 km 的范围内, 20—100 Hz 的雷声信号衰减可以忽略; 对于 100—630 Hz 的中频段雷声信号, 吸声系数随频率的增大迅速递增, 其中, 在温度为 293.15 K, 相对湿度 60% 的环境下, 400 Hz 的雷声吸声系数为 6, 对于频率大于 1000 Hz 的雷声高频信号, 吸声系数在 9 以上, 上述规律与文献[9]报道的结论一致.

结合吸声系数的计算结果和观测点雷声的频谱图 1 推断, 在自然闪电雷声声源中应该有比较强的频率高于 500 Hz 的信号.

考虑到降雨对空气湿度的影响较大, 所以, 进一步讨论了温度和湿度对雷声衰减的影响. 一定闪电距离、气压和温度下, 雷声信号 1/3 倍频程带通滤波器的常用中心频率的吸声系数随相对湿度的关系结果在表 1 中给出. 闪电距离 4 km, 环境气压 75.73 kPa, 环境温度 293.15 K, 1/3 倍频程带通滤波器的常用中心频率范围取 20—2000 Hz, 相对湿度由 10%—100%. 由表 1 看出, 在一定观测环境下, 大气对雷声的吸声系数随大气相对湿度的增加而变化.

表 1 一定闪电距离、气压和温度等环境因素下, 吸声系数 α (10^{-4} dB/m) 随相对湿度的变化(闪电距离 4 km, 环境温度 293.15 K, 环境气压 75.73 kPa)

频率/Hz \ 相对湿度/%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
20	0.220	0.150	0.120	0.090	0.070	0.060	0.052	0.045	0.039	0.035
31.5	0.470	0.360	0.270	0.220	0.180	0.150	0.130	0.110	0.100	0.090
40	0.660	0.530	0.420	0.340	0.280	0.240	0.210	0.180	0.160	0.140
50	0.880	0.760	0.620	0.520	0.430	0.370	0.320	0.280	0.240	0.220
63	1.130	1.050	0.910	0.780	0.660	0.570	0.490	0.430	0.380	0.340
80	1.390	1.400	1.290	1.150	1.000	0.880	0.770	0.680	0.600	0.540
100	1.610	1.760	1.720	1.590	1.440	1.290	1.150	1.020	0.920	0.830
125	1.180	2.120	2.200	2.130	2.000	1.840	1.680	1.520	1.380	1.250
160	1.970	2.480	2.730	2.800	2.750	2.620	2.460	2.280	2.100	1.930
200	2.080	2.770	3.190	3.420	3.500	3.460	3.350	3.180	2.990	2.800
250	2.160	3.020	3.620	4.030	4.270	4.380	4.370	4.277	4.120	3.930
315	2.230	3.220	4.000	4.600	5.040	5.330	5.490	5.540	5.490	5.370
400	2.280	3.380	4.330	5.120	5.760	6.280	6.650	6.900	7.030	7.060
500	2.330	3.500	4.570	5.530	6.360	7.080	7.670	8.140	8.490	8.720
630	2.380	3.608	4.788	5.888	6.890	7.800	8.610	9.320	9.920	10.400
800	2.450	3.710	4.960	6.180	7.340	8.440	9.460	10.40	11.250	12.000
1000	2.540	3.830	5.130	6.430	7.700	8.940	10.130	11.270	12.340	13.330
1250	2.680	3.980	5.320	6.680	8.040	9.390	10.72	12.020	13.28	14.480
1600	2.930	4.240	5.600	7.000	8.420	9.870	11.310	12.760	14.19	15.590
2000	3.280	4.600	5.970	7.400	8.860	10.360	11.880	13.420	14.97	16.510

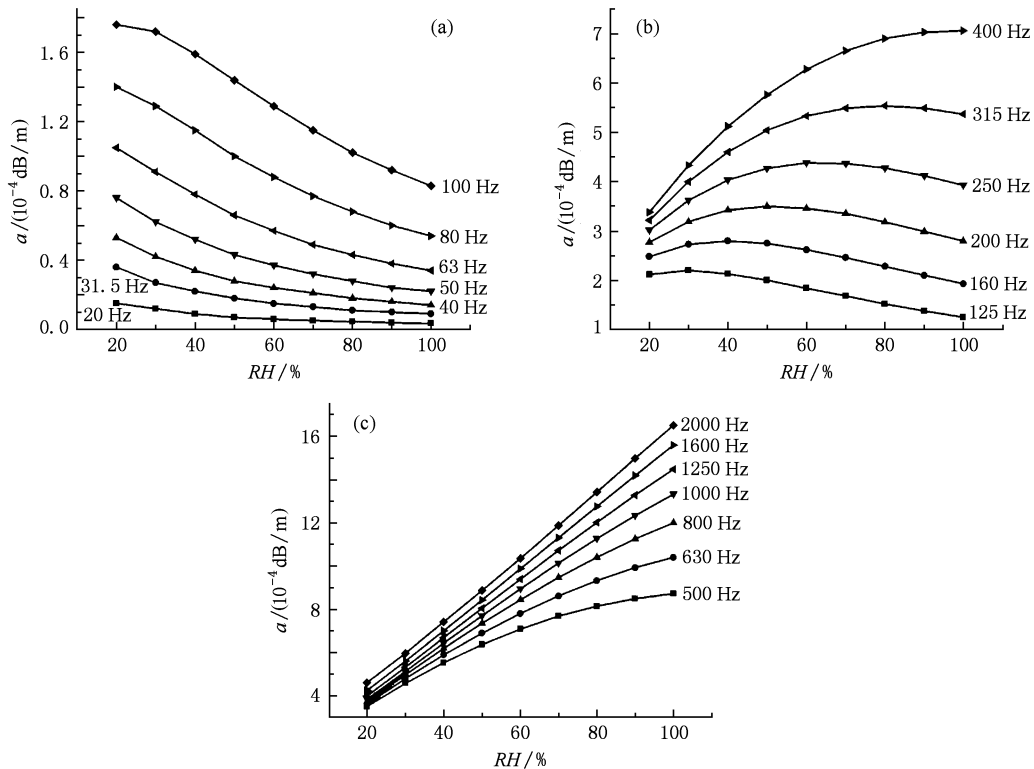


图3 环境压强为 75.73 kPa, 温度 293.5 K 时, 不同频率的雷声吸声系数随相对湿度的变化曲线(闪电距离为 4 km) (a) 雷声频率范围为 20—63 Hz, 相对湿度范围为 20%—100%; (b) 雷声频率范围为 125—400 Hz; (c) 雷声频率范围为 500—2000 Hz

图3给出了闪电距离为4 km处,雷声的不同频段在环境气压75.73 kPa,温度293.15 K时,吸声系数随相对湿度的变化关系,横轴表示相对湿度,纵轴表示吸声系数.由图3(a)可以看出,对于20—100 Hz频段的雷声信号,吸声系数较小,大多在 $(0—1.8) \times 10^{-4}$ dB/m范围,吸声系数随相对湿度的增加略呈递减趋势,相对湿度对吸声系数影响不太显著,所以频率低于100 Hz信号,衰减可以忽略,这一结论与文献[8]的结果一致;由图3(b)可以看出,对于125—400 Hz的中频段雷声信号,吸声系数在 $(1—7) \times 10^{-4}$ dB/m左右,并且随相对湿度的变化比较明显,吸声系数随相湿度的增加而呈现先增加后递减趋势;由图3(c)可以看出,对于500—2000 Hz的高频段雷声,吸声系数较大,在 $(3—17) \times 10^{-4}$ dB/m范围,吸声系数随相湿度的增加呈快速递增趋势,变化幅度大.显然,相对湿度对高频信号吸声系数的影响比低频段强得多.

图4进一步给出了闪电距离为4 km,环境压强75.73 kPa,相对湿度为60%时,不同频段的雷声信号吸声系数随温度的变化,横轴表示温度,纵轴表

示吸声系数.图4(a),(b),(c)的共同特点是温度从273.15—313.15 K变化时,吸声系数随温度的增加呈先增加后减小的趋势,随着信号频率的增大,对应最大吸声系数的温度逐渐升高,并且,频率小于100 Hz信号,温度对吸声系数的影响较小,频率大于100 Hz信号,温度对吸声系数的影响随频率的增加逐渐增大.图4(a)为20—125 Hz的雷声信号,温度在283.15—288.15 K左右时,吸声系数达到最大;图4(b)为160—500 Hz频段的雷声信号,温度在293.15—298.15 K左右时,吸声系数达到最大;图4(c)为630—2000 Hz的雷声信号,当温度在303.15—308.15 K左右时,吸声系数达到最大.一定湿度下和气压下,不同频率的雷声信号的吸声系数随温度的变化都出现一个峰值,频率越大吸声系数峰值对应的温度越高.从大气温度、相对湿度对雷声传播吸收的计算结果推断:观测点记录的雷声信号受闪电发生的距离、大气环境因素的影响,其频谱的主要频率范围除了与闪电放电特征有关以外,还依赖于闪电的发生距离、大气温度、湿度等^[19]因素.考虑到传播过程中的衰减因素后,雷声源中

应该有比较强的高频成分. 由于温度和湿度对高频成分的吸收更加明显, 在高温、高湿度的地区(如我国沿海)观测到的雷声信号中, 高频信号衰减幅度

会更大, 另外, 闪电过程中伴随的降雨也是影响雷声高频成分传播的因素.

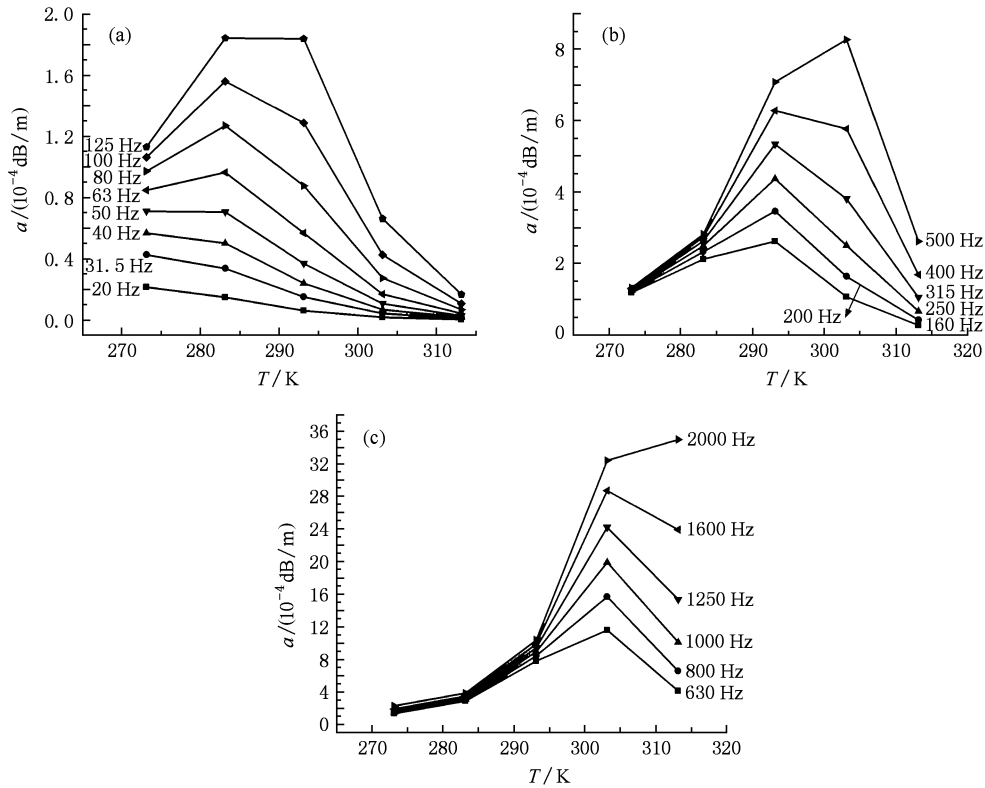


图4 闪电距离为4 km, 在环境气压为75.73 kPa, 相对湿度为60%时, 不同频率的雷声吸声系数随温度的变化关系(温度范围273.15—313.15K) (a) 雷声频率范围为20—125 Hz; (b) 雷声频率范围为160—500 Hz; (c) 雷声频率范围为630—2000 Hz

上述计算所用的理论公式是在理想均匀介质中得到的. 在雷暴环境下, 尤其是我国青藏高原地区, 局地小范围的雷暴发生概率较高, 在这种情况下, 雷声传播路径上大气温度和湿度有一定的不均匀性. 因此, 在实际应用中, 可以考虑采用多点观测和分段计算等方法对计算结果作进一步修正.

4. 结 论

计算了雷声在大气中传播的吸声系数, 并分析了其随环境温度、相对湿度的变化, 结果表明: 在一

定闪电距离和环境因素下, 吸声系数随频率的增加单调增大; 相对湿度对不同频率的雷声信号的吸声系数影响不同, 频率低于100 Hz 信号, 吸声系数较小, 相对湿度对吸声系数影响不太显著; 频率高于100 Hz 的信号相对湿度对吸声系数影响显著, 尤其对500—2000 Hz 高频信号吸声系数大且随湿度的增加而快速递增; 在273.15—313.5 K 温度变化范围内, 一定相对湿度和气压下, 不同频率雷声信号的吸声系数随温度呈非单调变化, 频率越大, 吸声系数峰值对应的温度越高. 由计算结果推断: 雷声源频谱中应该有比较强的高频成分.

[1] Uman M A 2001 *The Lightning Discharge* (New york; Dover) p377
 [2] Few A A 1968 *Thunder* Ph. D. *Dissertation* (Texas; Rice

university) p26
 [3] Bhartendu H 1968 *Can. J. Phys.* **46** 269
 [4] Few A A 1969 *J. geophys. Res.* **74** 6926

- [5] Holmes C R, Brook M 1971 *J. geophys. Res.* **76** 2106
- [6] Remillard W J 1960 *The acoustics of thunder* (Cambridge: Havard University)p387
- [7] Harris C M 1967 *Absorption of sound in air versus humidity and temperature NASA Report CR-647* (New York: Columbia University)p34
- [8] Bass H E, Losely R E 1975 *J. Acoustsoc. Am.* **57** 822
- [9] Few A A 1982 *Acoustic radiations from lightning. In Handbook of Atmospherics*, ed. H. Volland, vol. II (Boca Raton, Florida: CRC Press)p257
- [10] Few A A 1995 *Acoustic radiations from lightning. In Handbook of Atmospherics* ,ed. H. Volland, vol. II (Boca Raton, Florida: CRC Press)p11
- [11] Yang X R 2007 *Atmospheric Acoustics* (Beijing: Science Press) p120 (in Chinese) [杨训仁 2007 大气声学(北京:科学出版社)第 120 页]
- [12] Ma D Y, Shen H 1983 *Acoustics Handbook* (Beijing: Science Press)p113 (in Chinese) [马大猷、沈 壕 1983 声学手册(北京:科学出版社)第 113 页]
- [13] Shen X Z, Yuan P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5715 (in Chinese) [申晓志、袁 萍 2007 物理学报 **56** 5715]
- [14] Evans L B, Sutherland L C 1970 *Wyle Rep. N o. WR 70-14. for U. S. Army Res. Off* **1** 14
- [15] Monk R 1969 *J. Acoust. soc. Amer.* **46** 580
- [16] Evans L B 1972 *Acoust. soc. Amer.* **51** 409
- [17] Yuan P, OuYang Y H, Lv S H 2006 *Plateau Meteorology* **25** 503 (in Chinese) [袁 萍、欧阳玉花、吕世华 2006 高原气象 **25** 503]
- [18] Depass P 1994 *J. Geophys. Res.* **99** 25 933
- [19] Hao Z Q, YU J, Zhang J, Yuan X H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1290 (in Chinese) [郝作强、俞 进、张 杰、远晓辉 2005 物理学报 **54** 1290]

Characteristics of absorption and attenuation of thunder propagating in atmosphere *

Zhang Jing-Chuan¹⁾²⁾ Yuan Ping^{1)†} Ouyang Yu-Hua¹⁾³⁾

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

2) (College of Mechanic and Electrical Engineering; University of Tarim, Alar 843300, China)

3) (School of Mathematics Physics and Software Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

(Received 31 March 2009; revised manuscript received 18 February 2010)

Abstract

Using the thunder signals of a C-G lightning process recorded in the Qinghai region and the theory of signal processing, the frequency spectrum of thunder at observation point is obtained; Based on the propagation theory of acoustic waves, the absorption coefficients in air are calculated and their variations with environmental factors are analyzed. The results show that under a certain propagation distance and environmental condition, the absorption coefficient increases with frequency increasing. The attenuation of signal below 100Hz is negligible under a certain propagation distance and environmental factors. The attenuations for high-frequency signals of more than 500 Hz are large, their absorption coefficients increase rapidly with the relative humidity increasing and vary non-monotonical with temperature. It is deduced that high frequency components of more than 500Hz should be contained in the thunder source.

Keywords: propagation of thunder, absorption in air, attenuation

PACC: 9265D, 9260P, 9260

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40475007), the Technology Innovation Program of Northwest Normal University, China (Grant No. NWNNU -KJCXGC-03-21).

† Corresponding author. E-mail: yuanp@nwnu.edu.cn