

闪电辐射频谱的观测与分析*

陈铁汉 姚克亚 周秀骥

(中国科学技术大学)

(气象科学研究院)

提 要

1984年8月,利用我们研制的闪电数字信号接收设备,在合肥地区进行了观测。并使用微机对信号进行数字滤波、Fourier变换等处理。所接收的信号一类具有明显的回击脉冲,而另一类则无。从前者中挑选出21个典型信号作为个例进行分析,得出了这类信号及其振幅频谱的主要特点,并与理论结果和其他的模拟观测结果作了比较。

一、引 言

闪电辐射频谱研究不仅能了解闪电本身以及雷雨云的物理性质,而且还能“解调”出某些有用的气象学、大气物理学和空间物理学量。多年来,理论研究中一般是在给定闪电通道电流的空间分布和时间变化的条件下,由经典电磁场理论和Fourier变换的方法得到闪电频谱^[1,2]。理论工作中的一些重要参数源于直接探测,所以野外探测是研究闪电辐射频谱的重要手段。闪电辐射频谱的探测,通常采用宽带接收和窄带接收两种方法^[3],在七十年代以前,接收和记录都是模拟性质的。为了快速、方便地观测和记录资料,我们研制了一套由微机控制的闪电高速数字化观测系统,结合闪电单站定位的研究,对我国合肥地区闪电辐射特性作了分析研究,并取得了初步结果。

二、观测系统简介

本观测系统由四个部分组成:

1. 信号接收系统,包括电天线、磁天线、放大器和滤波器。

电天线是用直径为45毫米的紫铜管做成的鞭状天线,高度为2米。磁天线由边长1米的正方形线框构成,共有两付,线框用25×25毫米的槽铝焊成,槽中绕有直径1毫米的漆包线18圈,外加铝皮封闭。

放大器的放大倍数为40分贝左右,由高速运放F055做成。低通滤波器与放大器总的3分贝带宽为100赫—200千赫。

2. 数据采集系统,主要由两台国产BC-V瞬态波形存储器组成。该机内装高速A/D转

* 本文于1985年11月27日收到。

换器和高速半导体存储器, 其采样速度最高为 4 兆赫, 八位精度, 缓冲区长度为 2K 字节。

3. I/O 接口, 由 8255A 及少量其它元件搭成, 工作在 0 方式, 口 A、口 B 分别与 BC-V 波存器的两个通道口相连, 用作数据传输, 口 C 用于状态检测和控制, 控制字为 93H。

4. 微机, 采用 H89 微机控制和管理整个观测系统, 记录观测结果。该机的 CPU 为 Z80, 可运行 CP/M 操作系统, 配有一个单面单密度的软盘驱动器。

整个系统的连接如图 1 所示。

系统的控制子程序用 Z80 汇编语言写成, 在 CP/M 操作系统支持下运行, 其主要功能有:

- (1) 将系统初始化, 进入准备接收状态;
- (2) 将波存器中数据读入微机内存;
- (3) 向外输出任意周期的脉冲;

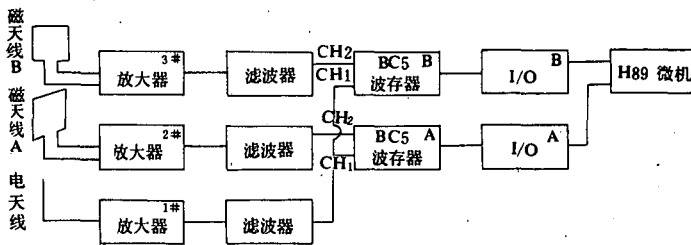


图 1

- (4) 十六进制码与 ASCII 码相互转换;
- (5) 建立磁盘文件;
- (6) 微机屏幕显示采集的数据内容。

调用这些子程序, 给编写主程序带来很大便利。部分程序的框图见图 2。

三、观测与数据处理

使用上述系统, 我们于 1984 年 8 月在合肥骆岗机场进行了实验观测, 这里远离市区, 干扰很小, 且地势平坦、开阔, 是比较理想的观测场地。

两付磁天线垂直地面, 正交置于同一水平支架上, 一取东西向, 另一取南北向, 与电天线相距 4 米, 电天线也垂直地面。其它设备均放在与天线相距约 20 米的室内, 所有的仪器设备都在避雷针的保护范围之内。

为了获取更多的资料, 用程序将两台 BC-V 瞬态波形存储器“串联”使用, 并准备两套程序。一是连续接收、连续记录, 观测中启动程序后, 无需人员干预, 直到磁盘写满为止。另一是有选择地记录, 通过模拟显示, 选择令人满意的信号写入磁盘, 以节省磁盘空间。

从 8 月 13—31 日, 19 天内共接收到 474 个闪电信号, 其中在白天接收 205 个, 夜晚接收 269 个, 共生成 1400 多份数据文件。采样速度多选在 1 兆赫和 2 兆赫, 持续采集时间分别为 2.048 毫秒和 1.024 毫秒。

由于 H89 微机内存小, 外围设备少, 我们将数据文件通过 SIO 接口传送到 Cromenco-III 微机, 在 Cromix 操作系统下, 以 FORTRAN77 语言进行数据处理。在处理中, 作了以下几点

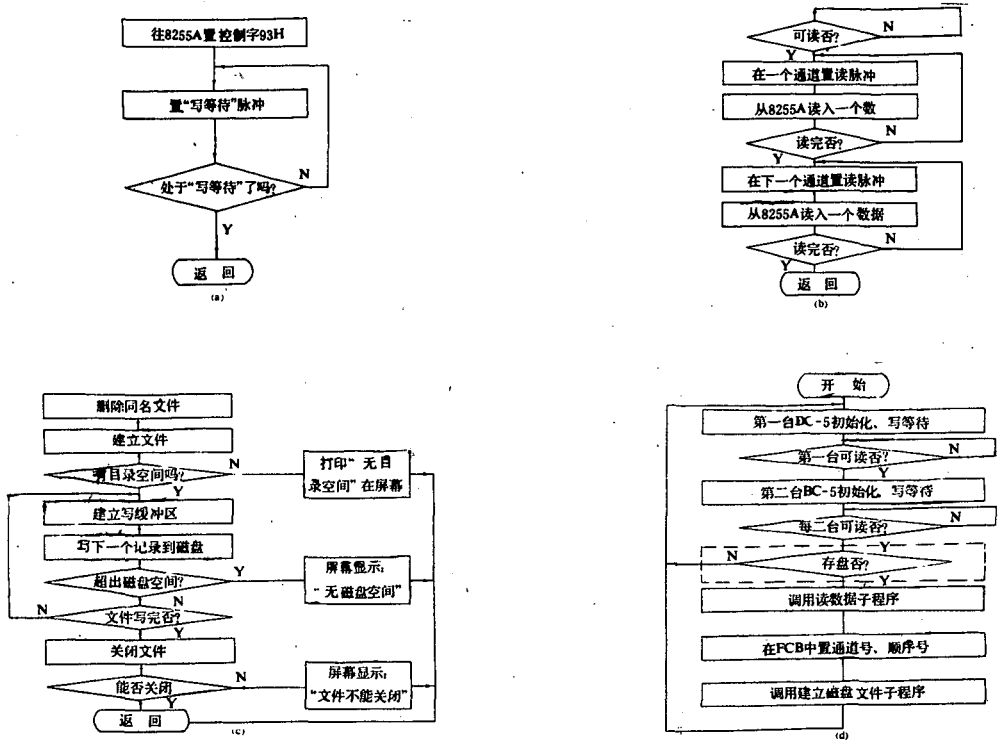


图 2 (a) 初始化子程序, (b) 读数据子程序, (c) 建立磁盘文件子程序, (d) 闪电信号接收主程序考虑和设计:

(1) 传播因子: 由于缺乏实验资料, 我们采用理论计算的结果, 将频谱折算到1公里处.

$$S(f, d) = e^{i2\pi fd/c} \frac{S_0(f)}{d} W(f, d)^{[4]}$$

$$S(f, 1) = e^{i2\pi f/c} S_0(f) W(f, 1)$$

两式相比:

$$S(f, 1) = e^{i2\pi f(1-d)/c} \frac{W(f, 1)d}{W(f, d)} \cdot S(f, d)$$

其中 $S(f, 1)$ 为折算后的频谱, $S(f, d)$ 为观测到的频谱, $W(f, d)$ 为传播因子, d 为距离, c 为光速.

据闪电单站定位的结果^[1], 我们所接收到的闪电信号大都发生在200公里范围以内, 所以传播因子选为地波传播形式^[5]:

$$W(f, d) = \frac{X^2}{2(C - i2\pi f)(D - i2\pi f)}$$

其中 $X = \sqrt{2c\sigma_E / (\epsilon d)} \approx 260\sqrt{\sigma_E / d}$,

$$C = XA, D = \frac{X}{2A},$$

$$A = a + bi = 0.496 + 0.853i,$$

σ_E 为地球表面的电导率.

(2) Fourier分析, 离散信号的Fourier变换理论给出^[6]:

$$S(f_k, d) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n, d) e^{-i2\pi \frac{k n}{N}} \quad 0 \leq k \leq \frac{N}{2}$$

其中 $S(f_k, d)$ 为离散频谱, $s(n, d)$ 为离散信号, N 为采样的总点数, 离散频率 $f_k = \frac{k}{N\Delta}$, Δ 为采样的时间间隔。根据参考文献[7], 编写出了快速Fourier变换的处理程序, 便计算出 $S(f_k, d)$ 的实部和虚部, 进而得到信号的离散振幅谱和离散相位谱。

(3) 数字滤波: 这是为了得到闪电信号的波形特点, 由参考文献[7]编出滤波程序, 滤波器为有限冲击响应低通滤波器, 时窗函数选择Hamming窗, 长度为256个点。

(4) 市电干扰的考虑: 由于是在机场观测, 其电缆电线都铺设在地下, 且远离高压输电线, 所以市电的50赫及其谐波的干扰很小。另外, 离散Fourier变换后, 离散频率 $f_k = \frac{k}{N\Delta}$,

所以频率间隔为 $\frac{1}{N\Delta}$, 由于观测中采样的时间间隔 ≤ 1 微秒, 采样总点数 N 为2048, 所以频率间隔 ≥ 488 赫, 大于50赫9次谐波的频率, 因此, 50赫及其谐波的干扰对观测和处理都没有什么影响。

四、结果分析

我们共处理了112个闪电信号, 占总接收信号的24%, 从中可以看到闪电信号及其频谱的一些特点。

1. 信号的特点

所接收到的信号可以明显地分为两类, 第一类具有明显的回击脉冲, 其振幅谱的主峰值在较低频段; 在较高频段, 振幅值随频率增加而迅速趋于减小。典型的信号如图3所示, 其中(a)为闪电信号, (b)为其振幅谱。这类信号不论本站有无雷雨天气, 能否看到电闪或听到雷鸣, 均能接收到。第二类是信号中具有大量的正负脉冲, 这些脉冲的持续时间非常短暂,

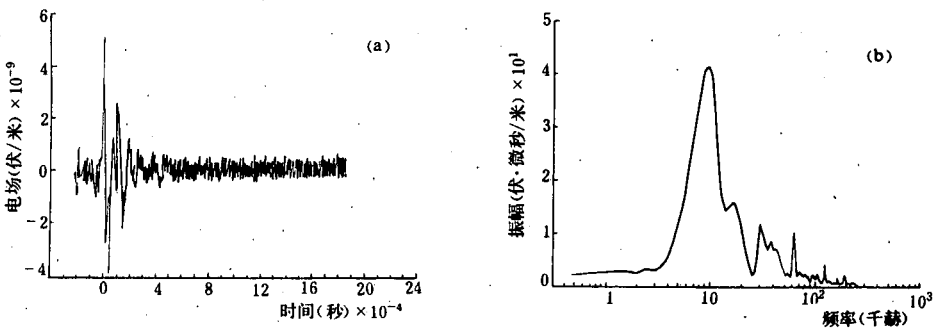


图3 合肥1984年8月23日21时30分(取样频率1兆赫)(a)闪电信号, (b)振幅谱

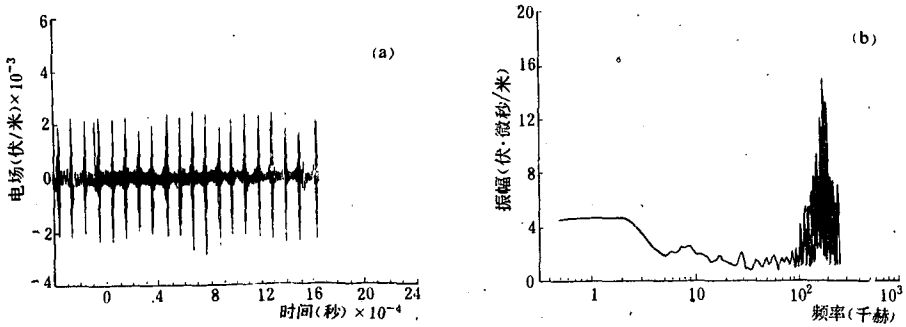


图 4 合肥 1984 年 8 月 27 日 20 时 19 分(取样频率 1 兆赫) (a) 闪电信号, (b) 振幅谱

强度很小, 其“振幅谱”的主峰值在较高频段, 较低频部分的幅值很小, 如图 4 所示。这类信号多在有明显的天气过程中接收到, 并能看到电闪和听到隆隆雷声。

按照 Marney 和 Shanmugam (1971) [8] 的分析, 从这两类信号及其频谱的特点上, 可以推出, 第一类信号具有云地闪电的特征, 而第二类信号具有云间、云内闪电的特征。

在本次观测实验中, 第一类信号中回击信号的宽度最小为 20 微秒, 最大为 460 微秒, 平均值为 159 微秒, 标准差为 90 微秒。

2. 频谱的特点

我们着重分析了第一类闪电信号的振幅频谱。这类信号振幅谱的显著特点是具有多个峰值, 其主峰值多在 20 千赫以下的频段出现, 在主峰值以后, 振幅谱随频率的变化趋势为衰减。我们选择了 21 个距测站 100 公里左右且具有典型回击特点的信号作为个例进行分析, 其中有 13 个夜晚信号, 8 个白天信号。图 5—7 展示了部分闪电电信号的振幅谱, 其中 (a) 为折算到 1 公里后的谱, (b) 为距闪电源为 D 时的谱。

图 5 中的两个信号均为夜晚接收到的, 这两个频谱的共同特点是: 在 2 千赫以下, 振幅几乎不变, 在 5.86 千赫都取到峰值, 从 5.86—50 千赫左右, 频谱成阻尼振荡形式。二者不同之处是频谱 (2) 主峰值所在的频率大于频谱 (1), 且频谱 (2) 振荡的次数更多一些。62.99 千赫为接收系统的共振频率, 125.98 千赫为其倍频。屏弃系统共振的影响, 频谱 (2) 的振荡将一直延续到 100 千赫以上。

图 6 是在同一天气过程中两次电信号的频谱, 两个频谱很相象, 只是 (3) 中对应频率的幅值大一些, 两主峰对应的频率相同, 次峰对应的频率相近, 两信号相隔 30 分钟, 却如同从同一辐射源发出。从 (4) 到 (3), 测站的天气正由多云转向晴天。

图 7 是四个电信号的振幅谱, 它们分别选自不同的日期和时间, 已折算到 1 公里处, 它们的共同特点是主峰突出, 明显地大于其它峰值; 主峰值为第一个峰值, 出现在 9 千赫以下; 从 10 千赫左右开始出现阻尼振荡形式。

平均振幅谱如图 8 (a) 所示, 最大值出现在 6.35 千赫处, 在 500 赫—2 千赫之间, 振幅几乎不变, 10 千赫以外的“振荡”也大大削弱。在最大值前后, 幅值分别按 f^α 和 f^β ($\alpha > 0$, $\beta < 0$, f 为频率) 变化, 图 9 展示了曲线 f^α 、 f^β 与幅值变化的近似程度, 其中振幅谱和曲线 f^α 、 f^β 都已作了归一化处理。在订正到 1 公里时, $\alpha = 1.6$, β 在 6.35—20 千

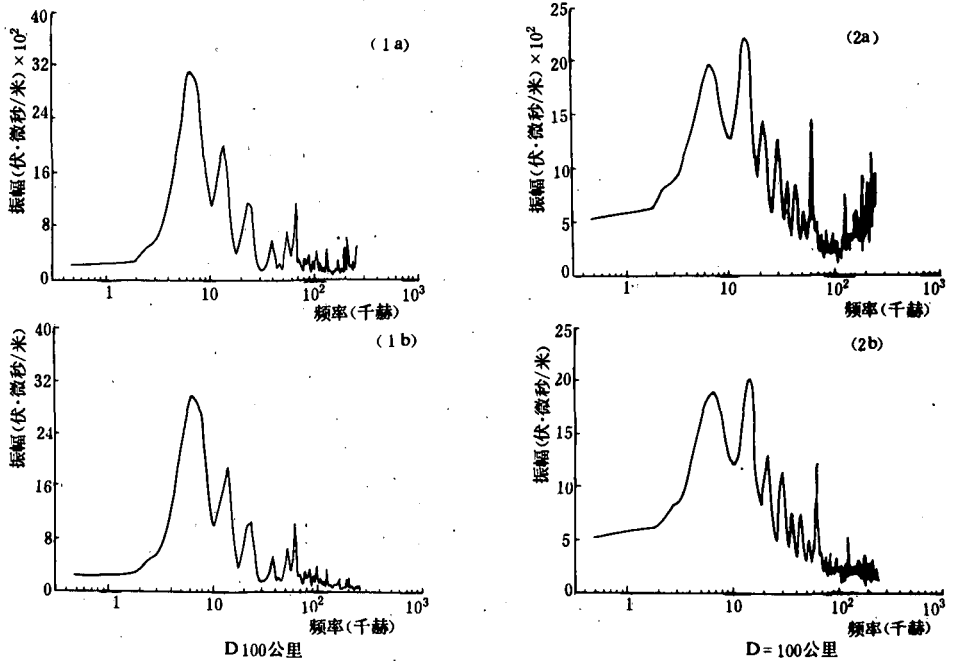


图 5

合肥 1984年 8月 23日 21时 24分(取样频率 1兆赫) (1a)振幅谱, (1b)振幅谱
 合肥 1984年 8月 28日 20时 23分(2a)振幅谱, (2b)振幅谱

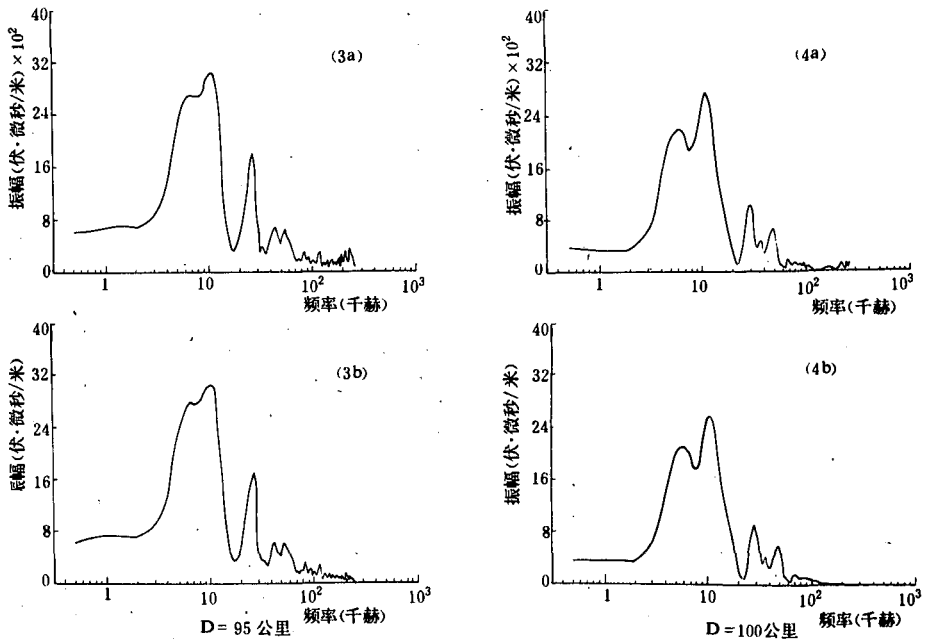


图 6

合肥 1984年 8月 26日 14时 53分(取样频率 1兆赫) (3a)振幅谱, (3b)振幅谱
 1984年 8月 26日 14时 23分(取样频率 1兆赫) (4a)振幅谱, (4b)振幅谱

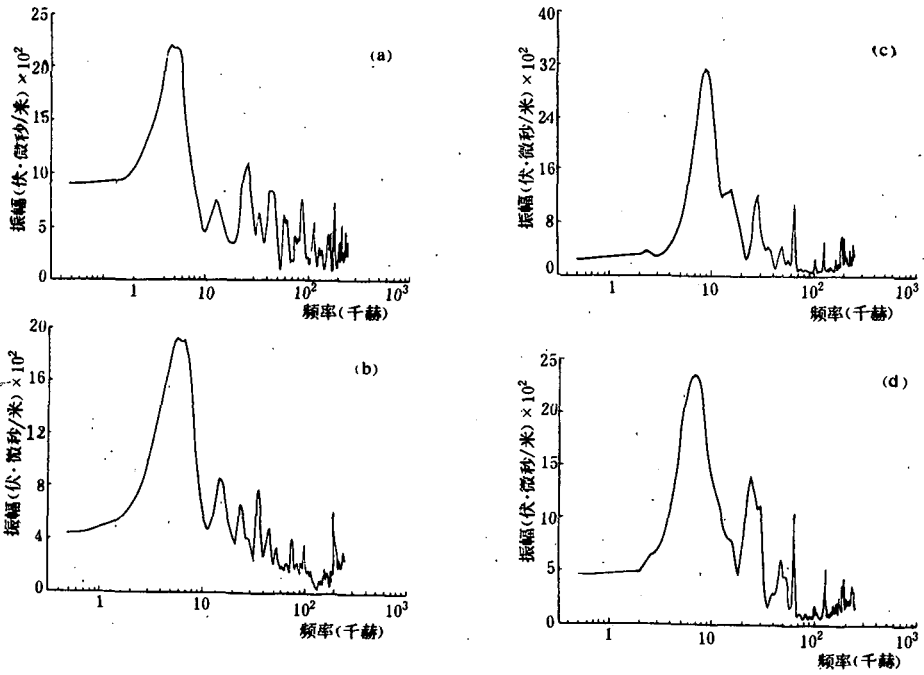


图 7

(a) 合肥1984年8月24日15时59分振幅谱
 (b) 合肥1984年8月25日23时16分振幅谱

(c) 合肥1984年8月27日20时28分振幅谱
 (d) 合肥1984年8月28日14时59分振幅谱

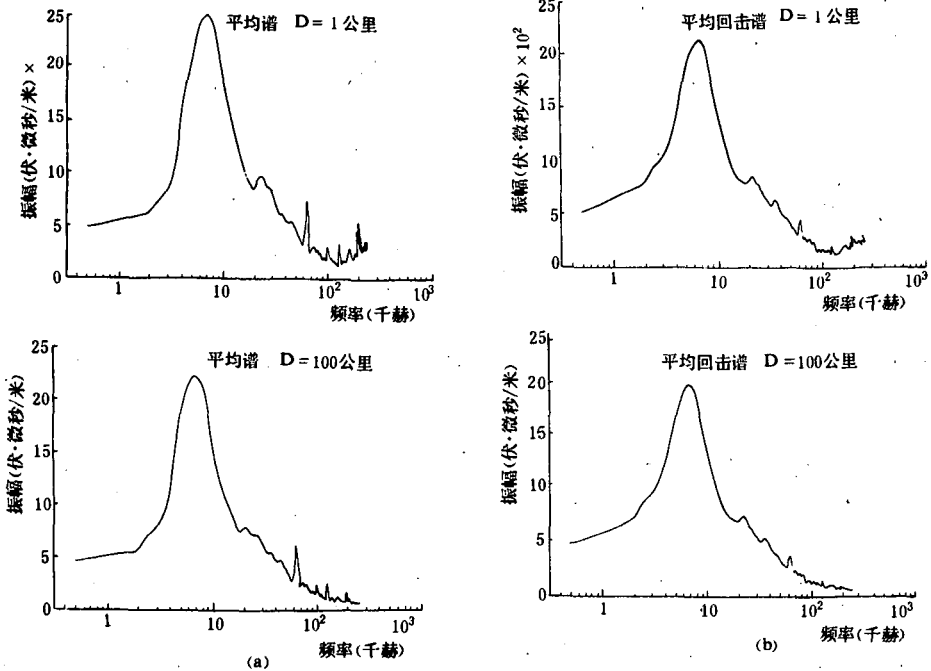


图 8

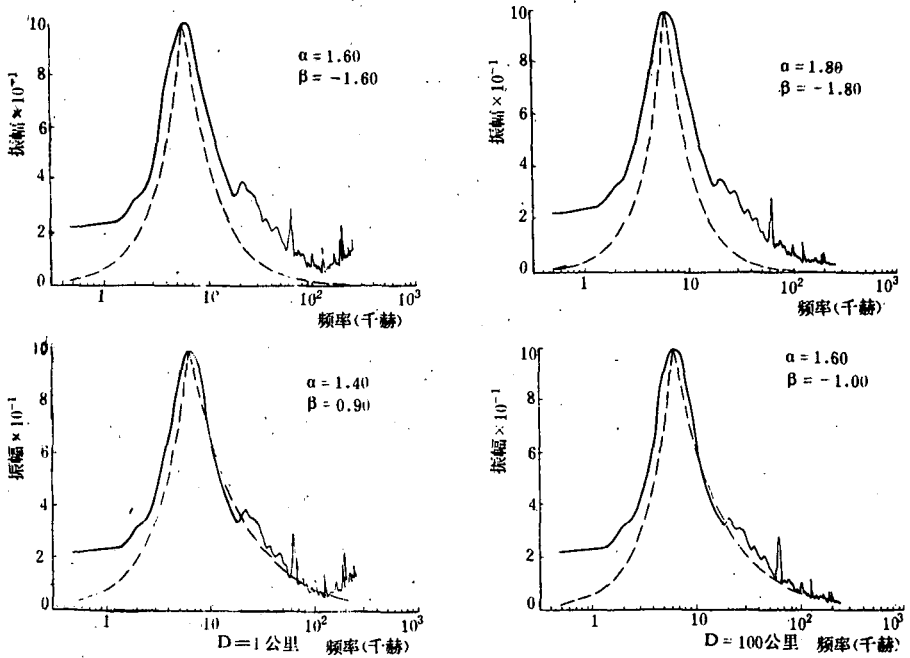


图9 合肥1984年8月23—28日平均谱

赫之间约等于-1.6,在20—120千赫约等于-0.9。在订正到100公里时, α 仍约等于1.6, β 在6.35—20千赫之间约等于-1.8, 在20—250千赫之间约等于-1.0。

将信号中除回击以外的其它部分置为零,只保留回击部分,频谱分析后得出的平均谱见图8(b),我们暂且把它叫做回击频谱。从图中可以看出,最大值仍然在6.35千赫,只是谱值比整个信号的平均谱为小。振幅谱随频率的变化情况见图10, $D=1$ 公里时, $\alpha \approx 1.2$, β 在6.35—12千赫范围内约等于-1.8, 在12—120千赫范围内,约等于-0.9, $D=100$ 公里时, α 不变, β 在6.35—20千赫范围内约等于-1.8, 在20—80千赫范围内约等于-0.9, 在80—220千赫范围内,约等于-1.0。

回击频谱的形状与整个信号频谱的形状基本相同,数值也相差不大,在高频端回击频谱更平滑一些。可见回击频谱是第一类信号频谱的主要部分。

另外,由振幅谱的数值可算得平均振幅谱的半宽度约为5.6千赫,回击的平均振幅谱的半宽度也为5.6千赫。

五、结论与讨论

通过本次的观测实验和以上的分析,我们得出以下结论:

1. 云地闪电辐射具有很强的VLF分量,其最大值出现在6.35千赫左右。
2. 在最大值以前,振幅谱随 $f^{1.6}$ 增加,且受传播因子影响很小;在最大值以后,振幅谱按 f^β ($\beta < 0$) 衰减,订正到1公里处, β 在6.35—20千赫以内,为-1.6, 在20—120千赫以

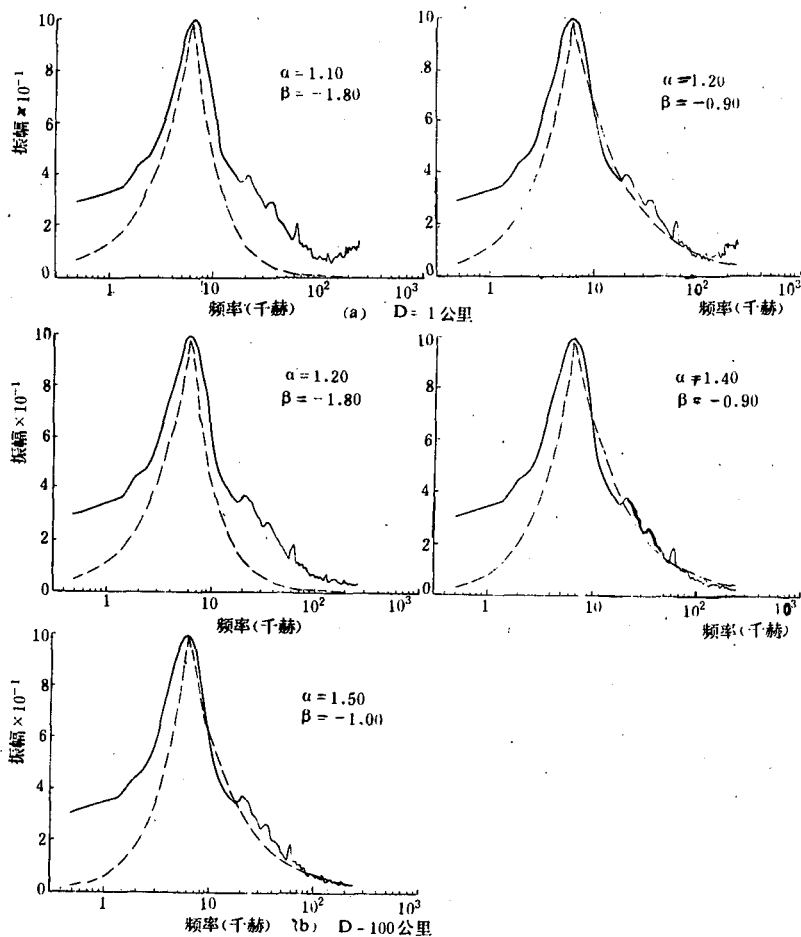


图 10

内为 -0.9 。在传播 100 公里以后, β 在 6.35—20 千赫以内为 -1.8 , 在 20—250 千赫以内为 -1.0 。

3. 回击信号的持续时间约为 159 微秒左右, 其频谱是云地闪电频谱的主要成分, 其振幅谱形状与整个云地闪振幅谱基本相同, 最大值也出现在 6.35 千赫, 振幅谱随频率的变化与整个信号也大致相同。

4. 振幅谱的半宽度为 5.6 千赫, 回击的振幅谱也相同。

与理论值相比, 最大值出现的频率与 Dennis 和 Pierce (1964)^[1] 的第一回击振幅谱峰值在 4—7 千赫的结论相吻合, 但大于他们给出的典型值 5 千赫, 振幅值随频率变化的规律与 Dennis 和 Pierce 理论中振幅谱随 $f^{-\alpha}$ 变化且 c 随频率增加而增加的结论不相符合。

与许多研究的实验观测相比较, 最大值出现的频率落在公认的范围 5—10 千赫^[9-13], 最大值以后, 振幅谱随频率的变化分段描述, 比其他表述为 f^{-1} 的近似程度更好一些。

虽然数字化接收信号的精度较高, 但由于单站定位尚属探索阶段, 给出的距离只能作为

一般参考。距离的远近不仅影响订正因子的大小,还影响到闪电电磁波传播机制的选择。本文给出的谱值都是相对量,谱随频率的变化规律也带有很大的经验性和试探性,难以给出其精度。

使用数字化信号接收系统,将微机应用到闪电辐射观测,极大地提高了观测质量和效率,可方便地获得丰富的观测资料,这在我国还是首次。本文利用这种有效手段,通过实验观测初步得出的闪电辐射信号和频谱的一些特征,基本符合实际情况。若将系统进一步完善,并将信号、频谱与闪电的物理过程联系起来,将会对我国闪电辐射特征有更详细、更深入的了解。

致谢:感谢中国科技大学地球和空间科学系陶善昌、李时灿、徐果明同志和中国科学院大气物理研究所吕达仁、王海文同志对我们的帮助。

参 考 文 献

- [1] Dennis, A. S. and Pierce, E. T., The return stroke of the lightning flash to earth as a source of VLF atmospherics, J. Res. NBS 68 D, 1964.
- [2] Hill, R. D., Electromagnetic radiation from the return stroke of a lightning discharge, J. G. R., Vol. 71, 1963, 1966.
- [3] Barr, R., The ELF and VLF amplitude spectrum of atmospherics with particular reference to the attenuation band near 3 kHz, J. Atmos. Terr. Phys., Vol. 32, 1970.
- [4] Jean, A. G., W. L. Taylor and J. R. Wait, VLF phase characteristics deduced from atmospheric wave forms, J. G. R., Vol. 65, 907, 1960.
- [5] Volland, H. editor, Handbook of Atmospherics, Vol. I, 183, Crc Press, Inc. Boca Raton FL, 1982.
- [6] 程乾生, 信号数字处理的数学原理, 石油工业出版社, 1979年。
- [7] 数字信号处理程序库, 清华大学出版社, 1983。
- [8] Marney and K. Shanmugam, Effect of channel orientation on the frequency spectrum of lightning discharges, J. G. R., Vol. 76, No. 18, 1971.
- [9] Taylor, W. L. and A. G. Jean, Very-low-frequency radiation spectra of lightning discharge, J. Res. NBS Vol. 63 D, No. 2, 1959.
- [10] Watt, A. D. and E. L. Maxwell, Characteristics of atmospheric noise from 1 to 100 kc, PRO. IRE 45, 787, 1957.
- [11] Horner, F. and Bradley, P. A., The spectra of atmospherics from near lightning discharges, J. Atmos. Terr. Phy., Vol. 26, 1964.
- [12] Groom, D. L., The frequency spectra and attenuation of atmospherics in the range 1-15 kc/s, J. Atmos. Terr. Phy., Vol. 26, 1015, 1964.
- [13] Taylor, W. L., Radiation field characteristics of lightning discharge in band 1 kc/s to 100 kc/s, J. R. NBS 67 D, 1963.

OBSERVATION AND ANALYSIS OF FREQUENCY SPECTRUM FROM LIGHTNING DISCHARGE RADIATION

Chen Tiehan Yao Keya Zhou Xiuji

(University of Science and Technology of China) (Academy of Meteorological Science, SMA)

Abstract

In Aug. 1984, we observed lightning discharge radiation in Hefei, Anhui Province by using the lightning digital receiver developed by ourself. The signals were processed by digital filter, Fourier translation and so on with microcomputer. One group of the signals has obvious return strokes, and the other not. 21 typical signals were selected as examples. Some characteristics of signals and their amplitude frequency spectrum were drawn, and were compared with theoretical and other analogue observational results.