

雷电单站定位系统*

肖剑鸣 陶善昌 姚克亚 陈铁汉

(中国科学技术大学地球空间科学系)

周秀骥

(气象科学研究院)

提 要

本文介绍数字化的VLF雷电单站定位系统,本系统以Wait的波导理论为基础,测量磁—电场的相位差确定测站与源的距离。系统主要由接收机、BC-5波形存储器、H-89微型计算机及控制软件包组成。其性能较好:快速(最高记录速度为4兆字节/秒)、灵活(功能可用软件改变)、宽带(100赫兹—200千赫兹)。利用此系统观测到VLF频谱,并作了单站定位的初步尝试。

一、引 言

雷电定位对于防止森林火灾、保证电网安全、监视航线上的危险天气有重要的意义。雷电的位置亦是了解中小尺度天气过程的一个重要因子。由于雷电多站定位系统中同步、传送等方面的困难,使得我们有必要去寻找一种单站定位系统。单站系统的主要困难是源—站间的距离测定,到目前为止,还没有找到一种有效的测距方法。有些工作取得了一些初步结果,归纳起来,可以分为两类。其一为射线模式,以电离层及地面皆为良好的电波反射体,测量传播过程中经不同反射次数的波的到达时间差,以计算距离和电离高度(D. Kinzer 1974, Mc Donland III)。其二为波导模型,以电离层—地面波导中VLF、ELF电磁波传播的振幅、相位随距离变化定距¹⁾,但所有这些工作,都只取得部分的成功。各种定位原理对应的观测系统差别很大,而我们要试验各种原理,所以要求系统易于变化。因此,此系统采用了尽可能简单的硬件接收、记录雷电辐射的VLF、ELF信号,在计算机内进行模拟,代替硬件变化。建成的系统具有宽带、高速采样、灵活等特点。我们利用这个系统进行了谱频分析和单站定位试验,并取得了一些结果。

* 本文于1985年10月14日收到。

¹⁾ 陈仲民等, 1964; Sao等, 1974。

二、探测原理

测向：用于测向的是鞭状天线和交叉框天线，两正交的框天线感应电压的比等于平面波入射角的正切，而入射波的象限由两个框天线感应电压与鞭状天线感应电压的相位关系确定。若把电信号相位移90°，电磁信号同相为“+”，反相为“-”，则象限图如图1。

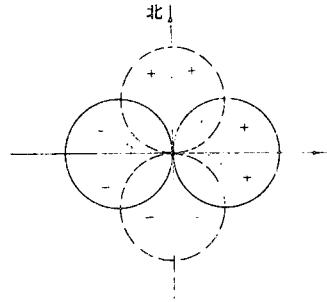


图1 象限图

测距：闪电过程中辐射的VLF、ELF电磁波，在地—电离层波导的传播过程中，电场和磁场的相位差随距离变化，本实验是以相位差反演距离的。

假定测站与闪电源的距离远大于云—地闪电的几何尺度，则闪电辐射的各种频率的电磁波可用对应该频率的垂直电偶极子模型来处理。又假定地球、空气、电离层都是均匀各向同性介质，它们之间的分界面为平面，则在上述边界条件下求解Maxwell方程组，计算距离—电磁相位差的关系，得出如图2的解。

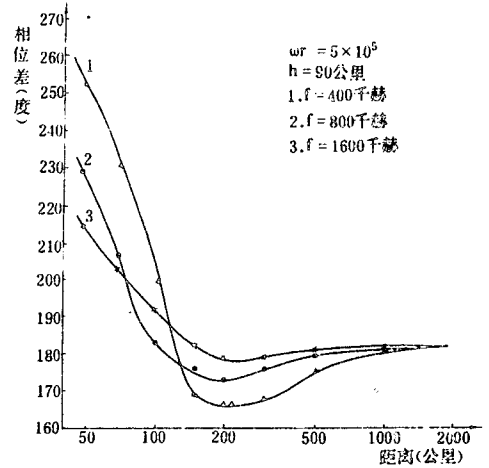


图2 相位差与距离关系(见文献[4])

三、观测系统

建成的系统是数字化的，最高记录速度可达4兆字节/秒，接收机频带也较宽，达100赫兹—500千赫兹，可以同时用于单站定位试验和ELF、VLF频谱分析，易于用计算机处理，可适应不同的定位原理。系统的框图如图3。

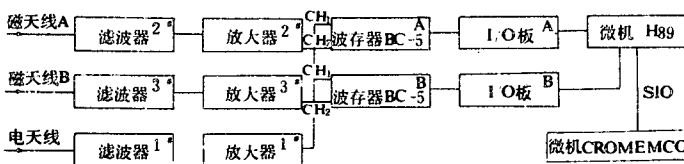


图3 观测系统

(1) 天线

电场的接收天线为长2米、外径5厘米的铜管，顶端有防止尖端放电的铅球，其等效高度为1米，等效电容28微微法。

磁场的接收天线为槽铝制成的方框，边长1米，槽内绕有18匝漆包线，外加铝片屏蔽。其电感量约为 0.78×10^{-3} 亨利。

(2) 接收机

接收机是直放式的，总增益约40分贝。电放大器频幅特性如图4，磁放大器频幅特性如图5。

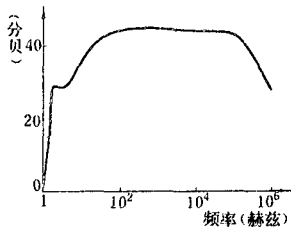


图4 电放大器频幅特性

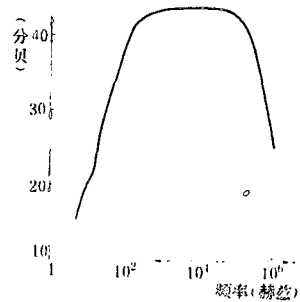


图5 磁放大器频幅特性

(3) 波形存储器

波存储器是本系统的核心部分，在计算机的控制下，BC5对信号进行放大、限幅、A/D变换、缓存。要实现计算机的控制，需要对BC5进行功能扩充，图6是其最后的框图。

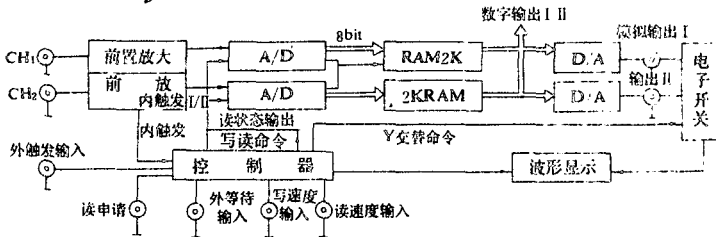


图6 波形存储器(BC5)

控制器各端子功能的说明:

写状态输出——处于高电平时波寄存器状态为待触发; 处于低电平时波寄存器状态为可读数据。

触发输入——输入一个 TTL 电平脉冲, 可使处于待触发状态的波寄存器开始贮存信号。

外等待输入——输入一个 TTL 电平脉冲, 置波寄存器于等待状态。

写速度输入——输入一个 TTL 电平脉冲, BC 5 即存贮一个数到当前地址, 这个端子输入脉冲的速率为波寄存器的采样速度 (仅在采样速度为 EXT 档时)。

读申请输入——使这个端子低电平, 则波寄存器进入可以读出状态。

读速度输入——每输入一个 TTL 电平脉冲, 数据线上出现下一个地址的数据。

另外, BC 5 有内触发、预置地址功能, 为观测随机信号提供了可能性。

(4) H89 微型计算机

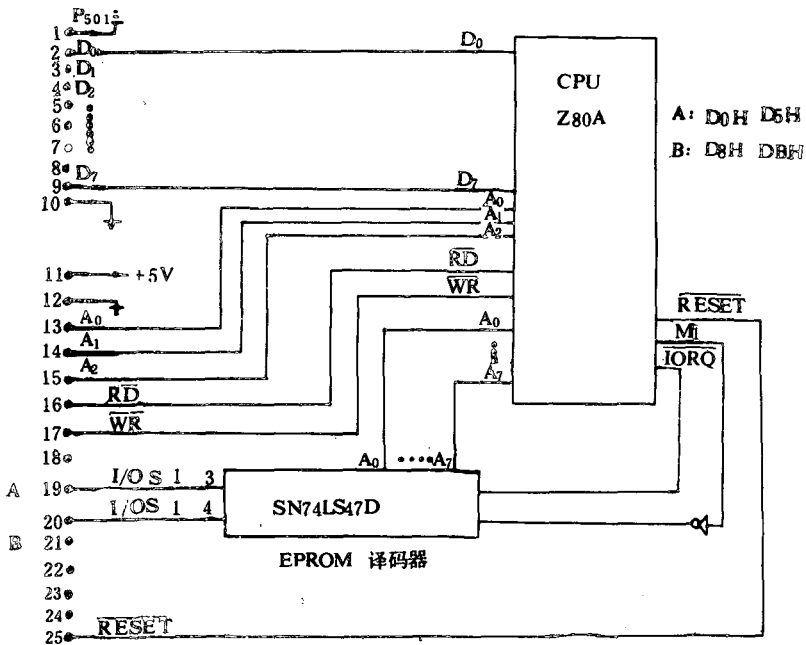


图 7 CPU 引线图

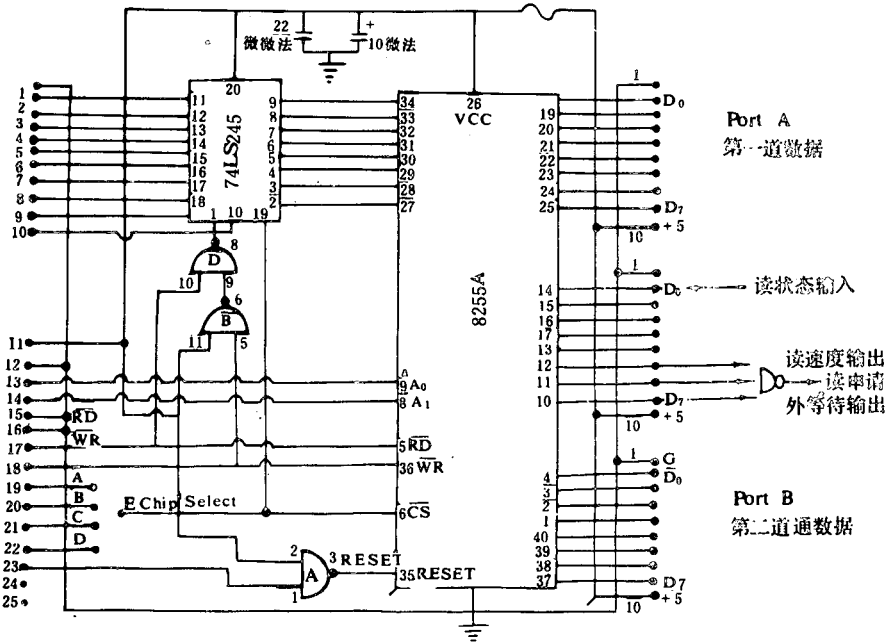


图 8 I/O 口电路

本系统选用 H89 微型计算机作为数据的采集和存贮控制器。H89 有一个单面单密度 12.7 厘米驱动器, 48 K 内存, 可运行 CP/M、HDOS 操作系统, 配有汇编、BASIC 语言。H89 结构比较紧凑, 留有足够的扩充插座, 改装后的 H89 可以控制三台以下的示波器。另外, H89 有 SIO 口可与其他机器连接。

为使 I/O 板的结构尽可能简单, 不独设 I/O 译码器, 而利用 H89 原有用于串行口, 卡式磁带机的地址。改装后的接线如图 7。

(5) I/O 接口

接口电路由 8255 A 及少量元件搭成, 电路如图 8。接口板的地址由 Chip Select 跳线选择。选择 A 时, 口地址 D0—D 3 H, 选择 B 时, 口地址为 D 8 H—DB H。

8255 A 上有三个 8 位数据口, 本系统中它工作在 0 方式, 口 A 和口 B 分别用来作为通道 1 和通道 2 的数据传送, C 口用于状态检测和控制信号输出, 控制字为 93 H, 所代表的意义如图 9 所示。

(6) 控制子程序包

控制子程序包由 8 个子程序组成, 它们赋予系统各种功能。子程序用汇编写成, 在 CP/M 操作系统的支持下运行, 其主要功能如下:

- ① 使端口及波寄存器初始化，等待触发信号。
- ② 把波寄存器的数据读入内存。
- ③ 向外输出任意周期的脉冲 ($f \leq 100$ 千赫兹)。
- ④ 建立磁盘文件。
- ⑤ 显示内存区内容。

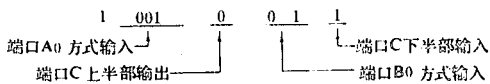


图 9 控制字

这些子程序的主要作用是充当程序员和硬件之间的界面，使程序员省去了解硬件结构的时间，用户可以根据需要通过编程来改变硬件的功能。我们曾利用不同的主程序使这个系统的硬件不作任何变动就可作定位和频谱分析两种观测。

(7) 主要指标

电信号接收机：增益43分贝 3分贝带宽125赫兹—200千赫兹。

磁信号接收机：增益44分贝 3分贝带宽220赫兹—125千赫兹。

采样速度：最高采样速度为4兆字节/秒，按1：2：5十分档，在不超过最高采样速度

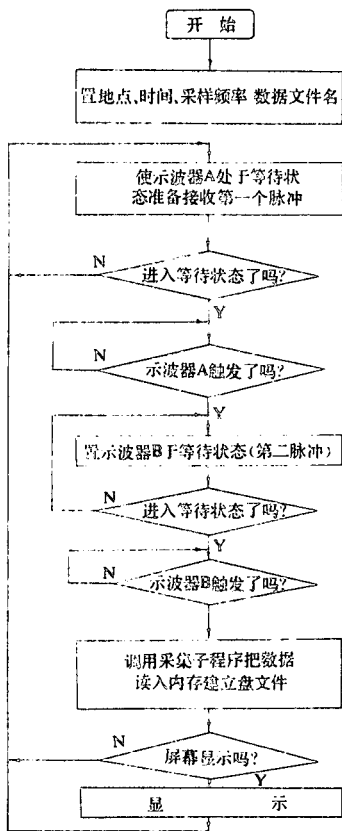


图 10 用于定位的采样框图

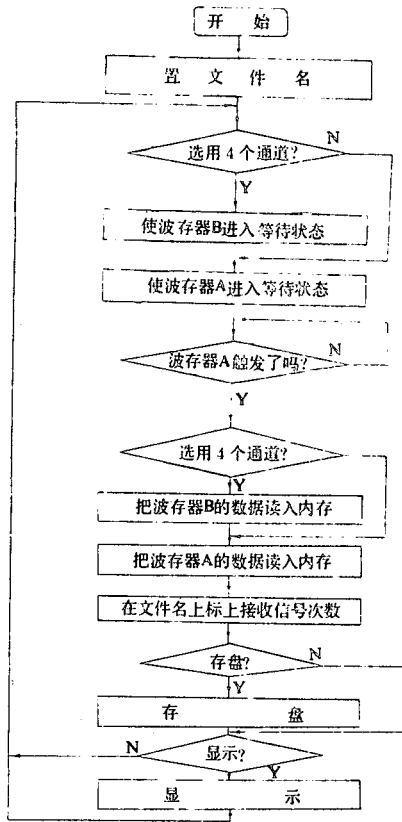


图 11 用于频谱分析的数据采样框图

情况下可以自选采样速度。

精度: 八位二进制。

通道数: 四道, 每两道同一个控制器。

缓冲区长度: 2千字节/通道。

输入幅度: $\pm 0.5 - \pm 100$ 伏, 分七档(波

存器)。

触发方式: 预置电平内触发, 外触发。

盘容量: 40×2 千字节数据/盘。

具有延时(外触发)、预置地址(内触发)

功能, 具有模拟输出。

(8) 工作方式

计算机在执行采集程序后, 先把波存器置于待触发状态, 波存器处于内触发方式。这样, 波存器就以预选的采样速率采样并循环贮存。一旦出现雷电信号, 若其电平高于预选电平, 则地址计数器从预置地址开始计数, 直到2048(缓冲区末址)。这时, 状态标志改变, 并立即被计算机检测到, 计算机发出读申请信号, 把缓冲区内数据读入内存, 存盘, 显示, 使示波器回到等待状态。

用于定位的软件是使两台示波器“并联”工作, 四个通道同时记录信号, 然后分别存盘、显示, 如图10。

用于频谱分析的软件是使两台波存器“串联”, 当第一台示波器采满缓冲区时, 即令第二台进入等待状态, 如有紧靠的信号, 就会被捕获。其方框如图11。

整个系统只需要一人在键盘上操作, 自动的软件版本起动后就不需要人的干预, 直到采满盘为止。在有天气过程时, 十分钟即可采到40个2K的闪电信号数据。

以下的图例, 是把采到的信号通过SIO口传入CROMEMCO机后, 在数字绘图仪上恢复出来的。每条曲线包含了2048个点(图12)。

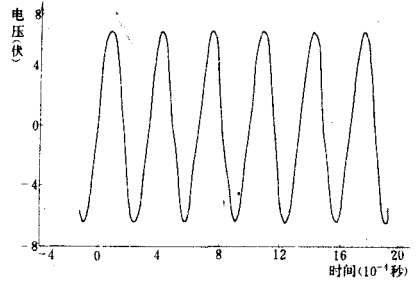


图12 取样频率1兆赫, 正弦波(30K)

四、观测及结果

1984年8月, 用上述系统在合肥骆岗机场进行了观测, 观测的内容是低频电频电磁波辐射频谱和雷电单站定位, 在二十天的时间内, 观测到几次天气过程, 记录到400多个闪电。

天线架设在机场跑道旁的空地上, 尽可能靠近地面。由于机场5公里范围内没有高压输电线, 故电力干扰比较少, 只是飞机起落及机场某些设备工作时, 会造成一些干扰。

我们观测到的多是近程雷电, 数据传入CROMEMCO机进行处理, 图13是一些典型结果。

按前述的定向、定距原理, 对收到的信号进行定位试验。由于系统并未严格按照定位的要求设计, 从定位的角度来讲, 信号质量是不高的, 这就造成了定位的误差。信号处理的框图如图14所示。图15是定向结果与当时雷达图片的比较, 图16是定位结果与雷达图片的比较。需要指出的是: 由于安徽省气象台提供的雷达照片与观测时间不一致, 天气系统的移动会使对比的结果不可靠。

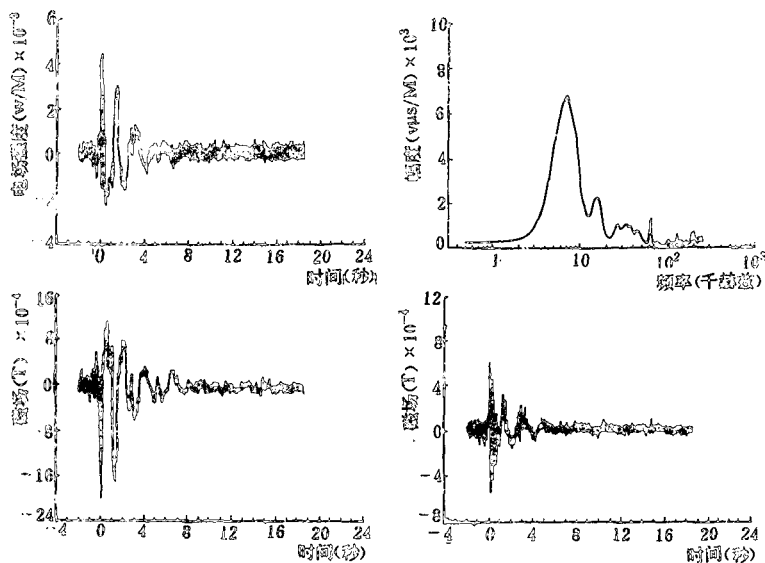


图 13 1984年8月23日20时49分闪电

电信号、磁信号及电信号的振幅谱（订正到1公里）

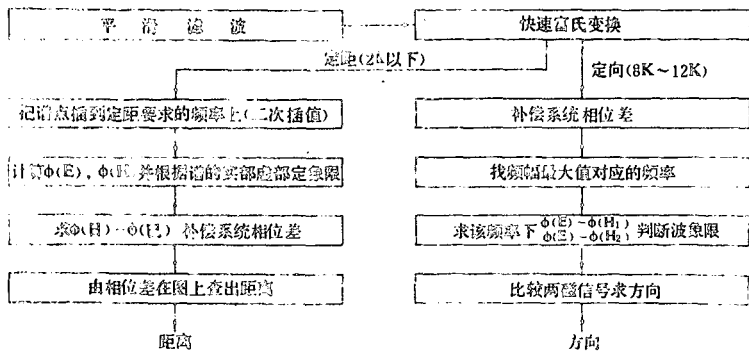


图 14 信号处理流程

只分析波的入射方向的信号23个，其中87%落在降水回波区内，可见结果与雷达回波还是比较一致的。

作定位试验的点37个，都为夜间情况，落在回波区内的占35%。如果考虑到其中一天可能有其他因素，余下的点有50%落在回波区内，因此，定位结果与回波照片符合较差。

虽然定位的结果与雷达回波照片有符合的趋势，但目前其精度尚很难确定，主要是缺少有效的验证手段。引起误差的原因较多，需作一些讨论。

(1) 系统误差：系统的设计兼顾谱分析和单站定位，虽有其方便之处，但亦带来一系列问题，主要是影响定位的精度。接收机频带宽，所受的干扰也多，为达到宽带的目的，放大器采用高速运放，本机噪声也跟着上升，这些都影响信号的质量。另外，高速采样使频率

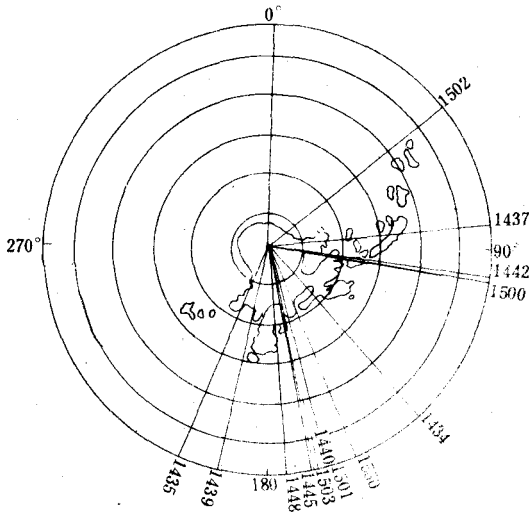


图 15 定向结果与雷达照片之比较

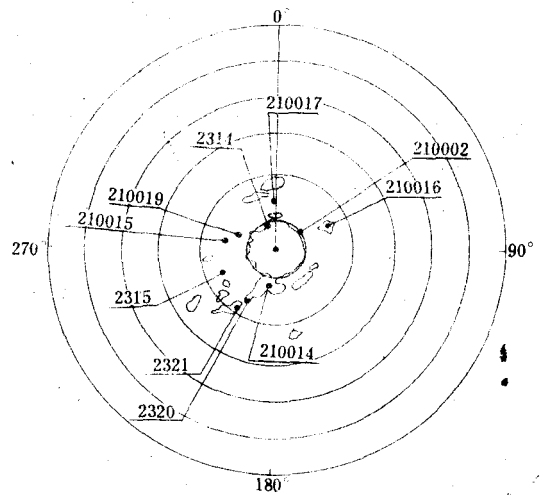


图 16 定位结果与雷达回波照片之比较

间隔增大, 亦是使精度降低的因素之一。

两个磁信号放大器增益稍有不同, 测量结果是 $A_2/A_3=0.98$ 。这样, 当入射角为 45° 时会引起 0.5° 的定向误差, 其他入射角都小于或等于 0.5° 。

由于电信号通道与磁信号通道造成的相移不相同, 并且差值随频率变化, 会给定距带来误差。虽然进行了补偿, 由于补偿曲线测量的精度不够高, 所以不能排除这个因素。

(2) 偏振产生的定向误差: 由于电离层的反射及闪电源的非垂直取向, 磁信号有径向分量。由于其幅度及其与水平分量之相位差无法确定, 所以由收到的信号无法分析误差的大小。根据 Yamashite and Sao 的研究, 在远距离 ($r \geq 1000$ 公里) 若使用频率为 10 K , 误差约 $0 \sim 5^\circ$, 在近场区, 无疑误差将会更大。

(3) 定距曲线的误差: 本次实验用的定位曲线是在忽略磁场、闪电通道取向和电离层的不匀性之下取得的, 实际上这些因素都会引起误差。据文献[4]中的估计, 影响如下:

① 由非云地闪电引起的误差影响不大, 在 500 公里范围内, 当闪电通道与水平方向夹角大于 10° 时, 引起电场 (或磁场) 相位误差约为 1° 。

② 电离层对单站定位影响非常显著。电离层高度的日夜变化能引起定距 20% 的相对误差, 故白天和夜晚应用不同的定距曲线。电离层参数 ω_r ($\omega_r = 4 \pi e^2 N_e / \epsilon m_e v$) 的变化在 500 公里以内, 引起的相位误差不大于 20% , ω_r 的日夜变化亦应加以考虑。另外, 因太阳活动干扰电离层, 将严重影响单站定位。

五、结 论

观测实验表明, 数字化的雷电观测系统具有很大的优越性。其记录的精度、计算速度, 特别是变化能力是模拟系统所不及的。研究闪电需要处理大量的、高速的信号, 计算机在此

领域将发挥很大的作用。尤其是近年来数字信号技术的进展,使我们有可能在干扰噪声中获取高质量的信号,并用数字实验模拟各种条件的改变,加快工作的进展。

实验工作是初步的,有许多地方需改进,其中最重要的是改进验证方法。除了使用气象雷达外,还有必要借鉴较为成熟的多站系统的定位结果。系统本身亦可作如下改进:①改善天线和接收机的匹配。②使接收机的频带窄一些(3分贝带宽80赫兹—20千赫兹),增益也需提高,动态范围加大。③增加缓存区的长度,使记录更完整。

雷电单站定位的理论工作亦要进行,主要是研究电离层引起的相位变化,并探讨实时反演电离层参数的可能性。这不但对于雷电定位,而且对于低电离层研究都会有很重大的意义。

参 考 文 献

- [1] 顾德温, 雷电活动的单站定位问题, 科学通报, 第11期, 1965年。
- [2] D. Kinzer, Cloud to Ground Lightning Versus Radar Reflectivity in Oklahoma Thunderstorm, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 31, 787, 1974.
- [3] Mc Donald III etc., Lightning Location and Lower Ionosphere Height Determination by Two-Station Magnetic Field Measurement, *J. G.R.*, Vol. 84, 4, 1727, 1979.
- [4] 陈仲文等, 雷电单站定位的初步分析和试验, 雷达探测和雷电物理研究, 中国科学院大气物理所集刊, 第4号, 1976年。
- [5] Sao etc., Real Time Location of Atmospherics by Single Station Techniques and Preliminary Results, *J. Atmos. and Ter., Phys.*, Vol. 36, 261, 1974.
- [6] M. Yamashita and K. Sao, Some Consideration of the Polarization Errors in Direction Finding of Atmospherics I. II., *J. Atmos. and Ter., Phys.*, Vol. 36, 1623, 1974.

A SINGLE STATION LIGHTNING LOCATION SYSTEM

Xiao Jianming Tao Shanchang Yao Keya Chen Tiehan

(Department of Geospace Science, State University of Science and Technology of China)

Zhou Xiuji

(Academy of Meteorological Science, S. M. A., China)

Abstract

This paper introduces a lightning location system which is based on Wait's waves propagation theory. The system has only one station, which consists of a BC-5 Digital Waves Storage, a H-80 Microcomputer and a Controlling Software Package. The system works in high storage speed (Max. 4 MW/sec) with easy changing function (by software) and wide frequency band (100 Hz—200 KHz). It was used to observe VLF spectrum of lightning electromagnetic radiation and to locate lightning position.