闪 电 单 站 定 位

——仪器、方法及现场试验*

陶 善 昌　　周 秀 骥

（中国科学技术大学七系，合肥 230026）　（中国气象科学研究院，北京 100081）

关键词　云地闪电、相位差、天、地波、单站定位

强风暴机理研究、短时灾害天气预报以及航空、航天、电业和林业等一系列部门雷电防护工作都迫切需要闪电定位和特性测量资料. 70 年代末美国 LLP 公司改进了云地闪电测向技术，推出了多站定位系统[1]. 这是一个较为成功的闪电定位技术，已在世界许多国家和地区付诸应用. 但存在一些固有缺点，原理上假定了三站测量的时间同步等同于空间位置一致，技术上存在方位角站址系统误差[2]，以及近距离信号饱和效应都使实际测量精度大大下降，有时造成定位错误. 另外，建网成本较高、常年维持也耗资费力. 因此，改进乃至革新闪电探测和定位技术仍然是一个有重要意义的研究课题.

闪电单站定位方法的研究开始很早[3]，难点在于测距. 周秀骥(1965)提出利用闪电电磁波传播相位差-距离关系测距，大气物理所[4]、中国科技大学[5]先后进行过试验. 由于当时未比较切合实际地考虑低电离层参数日变化，没有找到克服相位差曲线多值性引起定位结果模糊的有效方法，加上技术条件不具备，以致试验不能证实相位差测距方法的可行性. Kinzer[6]，McDonald[7] 等人基于射线模式，试验了闪电天波、地波到达时间差测距方法. 显然这一方法不适合近距离闪电定位，加上准确决定天、地波到达时间差存在困难，一直在闪电定位中未被正式采用. 其它如利用闪电特征参数-距离统计关系估计距离，闪电光，声信号到达时间差测距等单站定位方法也还不能解决问题. 技术上，单站定位系统在闪电信号接收、鉴别、采样和实时整理等方面较三站定位系统有更高的难度. 因此，国内外迄今尚未见到距离和方位的测量精度以及探测范围都可以与三站定位相比拟的单站定位系统投入正式应用.

中国科学技术大学近两年研制了一套新的闪电单站探测和定位系统（简称 M-LDARS），在中国气象科学研究院的支持下，于 1991 年夏季参加了京津冀中尺度网的现场试验，取得了一批资料. 本文概述 M-LDARS 的工作原理和定位方法，提出对比分析的主要结果.

一、仪器和定位方法

图 1 给出了 M-LDARS 的原理框图. 小型化的偶极子电天线放在正交环状磁天线的对称轴上方，外面的玻璃钢罩保护天线和前置放大器不受风雨和尘污的侵袭，使之能长期稳定、可靠地工作. 三通道接收机由前置放大器、滤波器和线性放大器组成. 磁通道另加有积分器

1992-03-30 收稿，1992-05-08 收修改稿

* 中国科学技术大学重点课题经费和国家气象局强风暴开放实验室课题经费资助项目

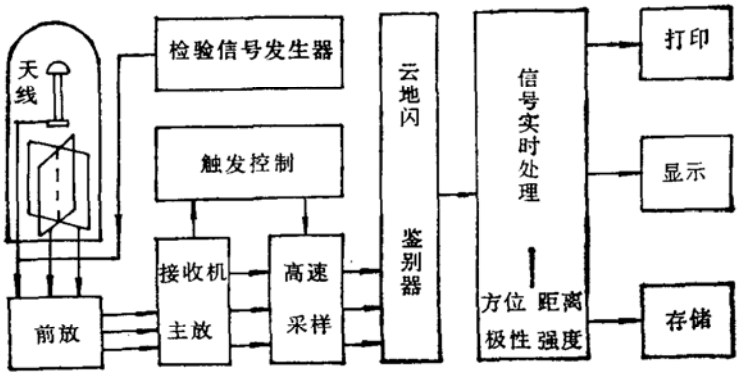

图 1　M-LDARS 原理框图

电路. 通带带宽为 500—350 × 10^3Hz，增益设高、中、低三挡可选. 信号的高速采样应用了中国科学技术大学生产的 T0810 瞬态记录仪，采样速率有 10，5，2.5，1.25MSPS……八挡任选，精度八位，缓存容量为 8KByte.

触发控制器实质是由模拟数字电路构成的云地闪识别器，接收云地闪信号、拒绝干扰及云闪信号. 云地闪鉴别器软件，有更强的鉴别功能，以保障即使在复杂干扰条件下系统也能正确无误地接收云地闪信号.

信号实时整理软件完成云地闪信号的测向、测距、极性和强度的计算. 对于 140 km 以内闪电，主要根据 ELF 频段几个频率的电磁波相位-距离关系测距，而 140km 以外便依照改进的地波和一次天波到达时间差方法定距. 图 2 给出不同电离层反射高度的 610Hz 的磁电波相位差曲线，这是根据 Wait 理论[8]，选择典型中纬度低电离层参数[9]进行计算的结果. 低电离层等效反射高度夜间最大取为 85 km，中午最小取为 70 km 这是根据 1991 年 7 月 28 日和 8 月 16 日两天 M-LDARS 记录中一次、二次天波明显的一组资料的平均估算值，与 Kinzer 得到的相应值 86 和 75km 略有不同. 并参照中纬度低电离层特性参数日变化[10]情况，考虑了等效反射高度的日变化.

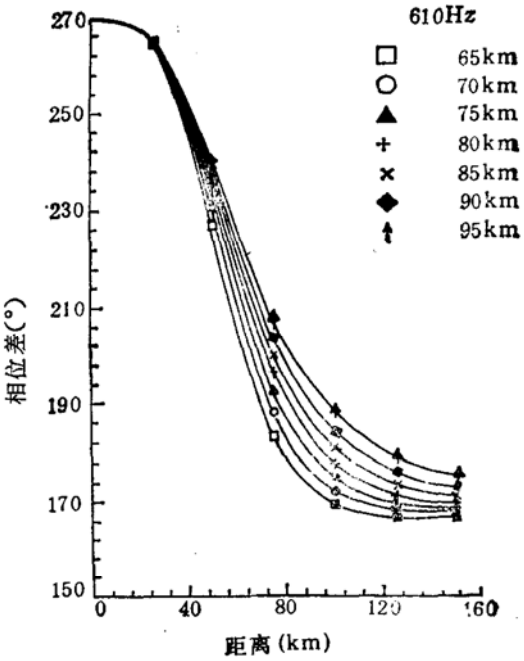

图 2　不同电离层反射高度的磁电波相位差曲线

系统终端给出闪电极性、方位、距离的彩色图像显示，记录可同时存盘保存.

二、试验结果的对比分析

由于模拟闪电的人工甚低频信号源难以得到，不论对三站或三站定位，要准确地估计闪电定位结果的实际精度都是困难的. LLP 公司生产的三站定位系统虽然成熟，但它的实际测量精度难以决定. 不考虑由于近距离闪电信号饱和效应影响测量精度，也不考虑三站同步错误

及基线误差(根据估计[1]，现运行的三站系统的站址误差在一些方位上达到7—8°)，仅仅考虑方位角测量随机误差，经计算得到1°的角误差相应测距误差在100，120，180km处分别为9%，11%，14.5%，2°的角误差相应测距误差分别为18.0%，22.0%，29.0%。尽管如此，对M-LDARS和LLP公司生产的三站系统的测量进行对比分析，仍是目前可以评价闪电单站定位可靠性的一种较好的方法。

为了排除三站和单站测量不同步或定位错误给这一分析造成的不确定性，从7月28日、8月10日、8月14日、8月16日四天的单站和三站的资料中(其中单站1118个记录)挑选出401对记录，挑选的原则是：(1)两种不同仪器系统记录的闪电出现时间相差小于1s，(2)闪电极性相同，(3)落在同一风暴活动区内或附近，否则视为不同步或定位错误，记录予以舍弃。由于(1)、(2)两项舍弃的占被舍弃的记录数的80%，(3)项舍弃的占20%(这部分记录主要是由于两种仪器对30km以内近距离和150km以外远距离闪电判断不同造成的)。符合上述三条的记录，便认为单站、三站测量的是同一个闪电。

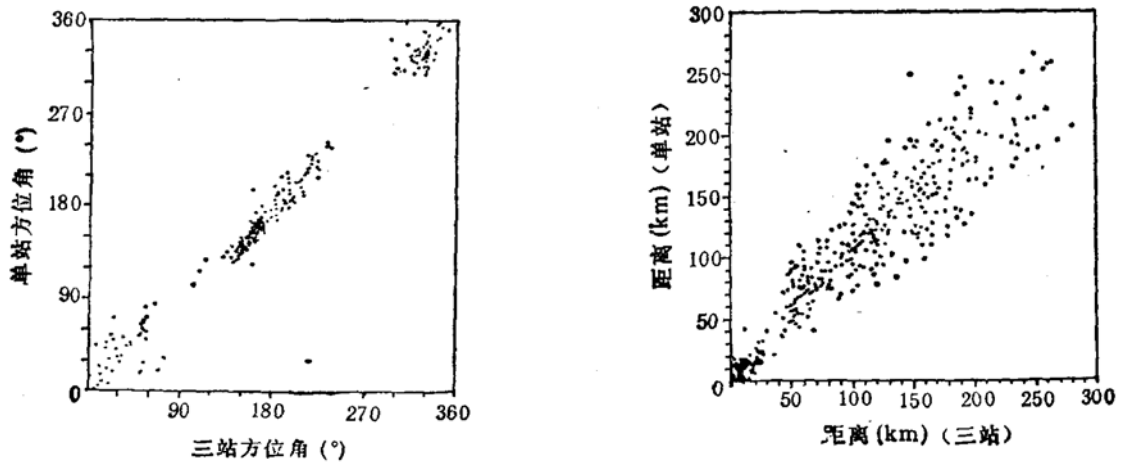

图3　单站定位和三站定位之间的相关

左图：方位角；右图：距离

单站和三站测量的方位角和距离的点聚图表示在图3上。定义方位角均方根偏差σ_a和距离的均方根相对偏差σ_d分别是

$$\sigma_a = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}(a_i - \bar{a}_i)^2/(N-1)}, \quad \sigma_d = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}((d_i - \bar{d}_i)/\bar{d}_i)^2/(N-1)},$$

式中a_i和d_i是单站测量的第i个闪电方位角和距离，$\bar{a}_i$和$\bar{d}_i$是由回归直线方程决定的第i个平均方位角和平均距离。

计算得到单站和三站测量的闪电方位角相关系数为0.979，均方根偏差12.8°；单站和三站测量的闪电距离相关系数为0.989，均方根相对偏差14.1%。由此可见，在三站和单站都不发生定位错误的前提下，方位角和距离回归直线斜率都近于1.0。

此外，雷达降雨回波资料是经常用来检验闪电定位结果可靠性的另一方法。仔细观测对比发现，M-LDARS定位结果与雷达回波反映的雷暴活动演变和移动趋势相符合。

1) 陈明理等，北京地区雷电定位系统场地误差及结构分析，气象学报(待刊)。

三、结果和讨论

上述结果表明，基于闪电电磁波传播相位差-距离关系和改进的天、地波到达时间差两种方法适当结合，M-LDARS 可以用于探测半径 250km 范围内云地闪电的方位、距离、强度和极性，结果的可靠性可以和三站定位系统相比拟。这一方法的突出优点是不存在多站同步的问题，测向误差不象三站那样会影响测距精度，信号一定程度的饱和效应也不致于产生定位错误，并且造价相当便宜，维护较为简易。另外，根据研究工作需要，这一系统可以记录云地闪信号波形甚至云中放电信号波形，而三站系统不能提供这方面的宝贵资料。

这一方法固有的问题是，定位结果可靠性依赖于传播模式和低电离层参数的合适选取。目前，虽有一定方法推算电离层对闪电电磁波的等效反射高度及其日变化，但对这一问题的进一步研究，减少等效反射高度参数的不确定性影响，仍是必要的。进行更多的现场试验也已在计划之中。

致谢　中国国家气象局强风暴开放实验室提供了对比资料，中国科学院兰州高原大气物理研究所提供了 LLP 三站闪电定位资料，在此表示感谢。

参　考　文　献

[1] Krider, E. P., Noggle, R. C., Uman, M. A., *J. Appl. Met.*, **15**(1976), 301—306.
[2] Mach, D. M. et al., *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **3** (1986), 67—74.
[3] 顾震潮，科学通报，1965，11：973—978.
[4] 陈仲文等，中国科学院大气物理研究所集刊，第 4 号，1974，60—75.
[5] 肖剑鸣等，气象科学研究院院刊，**1**(1986)，2：123—132.
[6] Kinzer, G. D., *J. Atmos, Science*, **31**(1974), 787—799.
[7] McDonald III, T. B. et al., *J.G.R.*, **84**(1979), 4:1727—1734.
[8] Wait, J. R., *Eletromagnetic Waves in Stratified Media*, Pergamon Press, New York, 1970,132—193.
[9] Bremer, J., Singer, W., *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**(1977), 25—34.
[10] Inhester, B. et al., *J. Atmos, Terr. Phys.*, **52**(1990), 855—873.