

闪电定位误差评估与实例分析

梁 华¹, 张 涛², 姚延锋³, 徐子龙¹, 庞文程⁴, 张宇飞⁴

(1. 甘肃省气象局兰州大学联合数据实验室, 甘肃省气象信息与技术装备保障中心, 甘肃 兰州 730020;
2. 云南省大气探测中心, 云南 昆明 650034; 3. 甘肃省天水市气象台, 甘肃 天水 741000;
4. 兰州中心气象台, 甘肃 兰州 730020)

摘 要: 为了对闪电定位的误差进行定量评估, 从时差法闪电定位原理出发, 分析了闪电定位原理存在的问题及其定位的误差来源。采用计算机模拟的方法, 实现了对闪电的定位误差的评估, 可以为已有的闪电定位网络作出有效的定位误差评估, 为将要布置的站点提供选址依据。最后以兰州区域气象中心闪电定位网为例, 验证了“5 站布点”的优越性, 为将来甘肃省闪电定位网的后续布置提供了选址依据。

关键词: 闪电定位; 误差评估; 兰州; 选址

中图分类号: P413. 2⁺2

文献标识码: A

引 言

闪电灾害是当今世界的主要自然灾害之一, 它是雷暴云能量释放过程中伴随的一种强大的大气放电现象, 随着闪电灾害带来的巨大损失逐年增加, 闪电探测越来越受人们的关注。目前, 已经出现很多类型的闪电探测设备, 而最普遍采用的是对闪电进行定位的探测设备。闪电定位探测设备依靠探测闪电发生时产生的电磁波来对闪电进行定位。闪电定位的误差问题和探测效率问题, 一般依靠经验来判断, 这对探测设备站点位置选定有较大影响。为了能根据现实情况对闪电定位的误差和探测效率进行有效评估, 那么对闪电误差及效率评估进行定量的分析至关重要。

1 闪电定位误差分析

1.1 时差定位法^[1]闪电定位系统的探测原理

目前的闪电定位方法主要有 3 种, 分别为方位交汇定位法、到达时间差定位法 (简称时差定位法)、方位交汇和时差综合定位法。时差定位法是目前闪电定位的重要方法。

时差定位有 2 种算法: 当探测站为 3 站时, 采用 3 站定位算法; 当探测站多于 3 站时, 采用 3 站以上定位算法。

设有 3 个接收机 R_1 、 R_2 、 R_3 按图 1 所示布成一个接收网, R_1 、 R_2 、 R_3 均被同步在同一时间系统上。当在 t_0 时, 在 L 处发生了一个雷击, 该雷击所辐射的电磁脉冲信号至各站时的时刻分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 则

$$t_2 - t_1 = (t_2 - t_0) - (t_1 - t_0) = \frac{(R_2 - R_1)L}{c}$$

其中 c 为光速, $(R_2 - R_1)L$ 为 R_1 、 R_2 2 个探测站到雷击点的距离差。若雷击点已知, 则 $(t_2 - t_1)$ 也为一定值。反过来说, 若测得 $(t_2 - t_1)$, 则雷击点也必然位于等距离为 $(R_2 - R_1)L$ 的 1 条双曲线 AB 上。同样, 对于 R_3 、 R_2 来说也可以通过测量 $(t_3 - t_2)$ 而得到相对应的另 1 条双曲线 CD , AB 与 CD 的交点就必然是雷击发生的位置。这样就把 1 个定位问题变成了测量信号到达不同接收站的时间问题。

3 站以上定位, 由 3 个以上的探测站收到信号时, 由于多种因素的作用, 多站确定的多条球面双曲线不可能相交于同一点, 因此采用最小二乘法进行优化计算求出雷击点最有可能发生的地方。

收稿日期: 2007 - 09 - 04; 改回日期: 2007 - 10 - 26

基金项目: 甘肃省气象信息中心数据实验室开放式科技创新 (2007 - 07) 项目资助

作者简介: 梁华 (1981 -), 男, 汉族, 四川人, 助理工程师, 现从事大气综合探测装备的保障与研究。

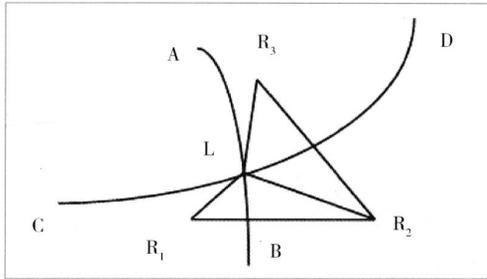


图 1 时差法定位

Fig 1 Sketch map of TOA location

1.2 时差法定位原理误差分析

时差法闪电定位原理误差来源主要有 2 种:第 1 种是闪电定位仪的测量误差,它来源于所测闪电波到达不同站点的时间差 t_1 (t_1 是以闪电定位仪 GPS 测时的精度为基础的^[2],目前采用的 GPS 测时的精度可达到 $0.1 \mu\text{s}$);对电磁波传播理论的研究表明,长波在地表传播时,受地形的影响,会发生波形的畸变,引起测时误差 t_2 ,根据统计结果,每 100 km 引起的测时误差约为 $1 \mu\text{s}$ 。一般情况下,探测站的有效探测距离在 300 km 以内,最大测时误差不超过 $3 \mu\text{s}$,因此所测得的测时误差 T 为 GPS 测时误差 t_1 与 t_2 之和。第 2 种是由于闪电定位仪的布站场地引起的定位误差^[3],场地误差由 2 部分组成,1 部分是闪电定位仪本身天线方位安装不正引起的“旋转误差”,它是个常数;另 1 部分是定位仪周围环境引起的误差,这一部分误差是随测量角变化的,即为方位角函数。本文主要阐述闪电定位第 1 种误差的来源及如何利用计算机实现闪电定位误差评估,通过评估不同布站方式下闪电定位误差,尽量减小第 2 种误差。

2 闪电定位误差评估^[4-6]

在实际探测中,定位时间(闪电回击辐射的电磁波到达各参与定位的探测站的时间)存在误差,因此可以将该时间分解为 2 部分,1 部分为无误差情况下,电磁波从雷击点到达探测站的时间,另 1 部分为实际测量时间与无误差时间之间的时间差。理论上讲,如果探测站的测时无误差,环境无干扰,有 3 个以上测站,采用时差法进行闪电定位也是无误差的。探测站的测时误差 T 导致了定位误差的出

现,因此首先需要确定测时误差,具体值可根据当地环境设定。由于测时误差是随机分布的,我们在评估过程中,将各评估点到探测站的 GPS 时间确定为:评估点到探测站的无误差光速时间与小于最大测时误差的随机误差时间之和。

在评估区域内某点发生闪电,则探测站记录的闪电波传播时间为真实闪电波传播时间和测时误差之和,由此记录的时间进行双曲线交汇得到的雷击点位置就会与实际雷击点存在一定偏差,这个偏差就是各点的定位误差。为了定量估算该定位误差,需要知道评估点的经纬度坐标和用于定位的各站点的经纬度坐标,由此得到评估点到各站点的含误差闪电波传播时间,求出时间差,再利用时差法定位算法进行定位,定位结果与雷击点之间的距离就是所求的定位误差。

误差评估的步骤如下:

- (1) 给定评估区域经纬度,并设定站点位置及最大测时误差,将经纬度坐标转换为直角坐标;
- (2) 将评估区域分割成若干个格点,求出各格点距各探测站的距离 D_n ;
- (3) 将 D_n 除以光速,得到闪电产生的电磁波从格点到各站点无误差传播时间 T_n ;
- (4) 将 T_n 与小于最大测时误差的距离加权随机误差时间(该随机误差是人为设置的,对每个格点的随机误差时间我们是通过一个 < 1 的随机函数来处理的)相加,模拟电磁波从格点位置到各站点的记录传播时间 T_{nn} ;
- (5) 利用模拟的记录传播时间 T_{nn} ,求得时间差;
- (6) 再根据上述时间差,利用 3 站或 3 站以上时差法定位算法,得出闪电发生的位置的经纬度计算值;
- (7) 计算上述计算值与格点位置之间的距离,即所求误差。
- (8) 重复 4~7 步 N 次,将 N 次由第 7 步得到的误差进行求和平均,即得到对应格点的误差评估结果;
- (9) 绘制评估结果图像。

3 定位误差评估的应用^[6]

利用上述定位误差评估方法,可以制作专用闪

电定位误差评估软件,实现定位误差评估的计算机模拟。只要知道评估区域的经纬度范围和各站点的经纬度,就能对评估区域内各点的可能存在的误差进行评估。

闪电定位误差评估软件可以用于已有探测网络的定位误差评估,更重要是可以为布设站点选址提供依据。不同的站点布设方式可以达到不同的效

果,合理布设站点,不仅可以提高定位精度,而且可以充分利用站点资源,以尽量少的站点达到尽量高的定位精度。实验结果表明,探测站布站形状对探测精度影响很大,如图 2 是分别采用正三角形、矩形、菱形和矩形及其中心 4 种典型形状布站后,利用时差法定位的误差评估效果。图中采用不同颜色色标表示不同的误差大小。

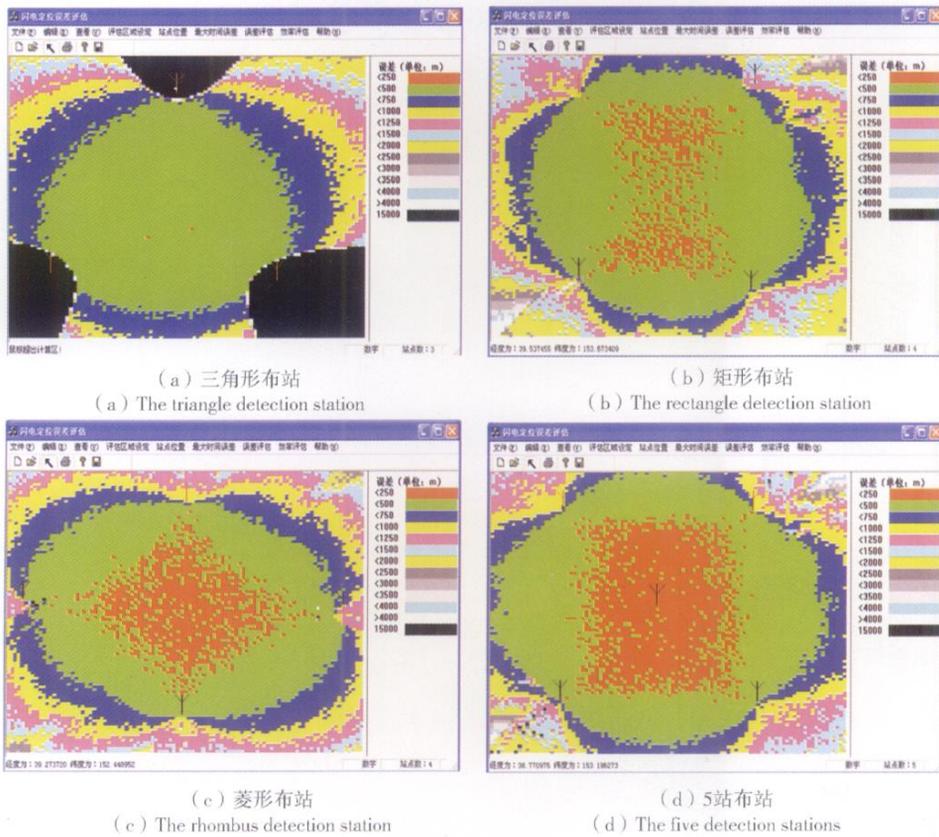


图 2 不同布站形状对探测精度的影响

Fig 2 Detection precision with the different station distribution schemes

在探测范围基本相同的情况下,根据评估结果,我们可以总结为几点:

(1) 站数相同情况下,布站位置选择不同,误差变化可以很大。在站点围线内探测精度高,围线外探测精度低;距探测站相同距离位置探测精度变化很大。在站点背向各站围线中心的一面,误差较大,面向各站围线中心的一面,误差较小;

(2) 3站情况下,不管如何布站,必然存在较大范围的定位盲区,即图中黑色区域。该盲区是指时

差法定位存在双解的区域,采用时差定向综合法进行定位时,该区域仍可定位;

(3) 3站定位误差较大,站点数选取应尽量在 4 站以上,4站位置应尽量选用菱形或矩形,在条件允许情况下,可在站点围线中心位置加布 1 站,以提高定位精度。

4 探测效率评估

电磁波在传播路径上会存在衰减与干扰,闪电

定位系统对能探测到的闪电有一个电流强度要求,这就是闪电探测的效率问题。如果环境的电磁干扰较强,那么就只能探测到电流较大的闪电,在这种环境下探测效率就比较低;相反探测效率较高。

在闪电定位仪所在位置的电场与闪电电流存在以下关系:

$$E = KD^{-m}$$

其中: k 和 m 都是与地面电导率、地型及闪电场型有关的常数。

当电场值超过定位仪预设最低门限阈值时,闪电被探测到,最低门限阈值对应的最小电流即为定位仪所能探测到的闪电的最小电流。这个电流值随闪电发生位置离定位仪距离的不同而不同,距离越近,值越小,反之越大。

5 兰州区域气象中心闪电定位网站点设计及误差评估^[7]

5.1 闪电定位网站点设计

为了达到尽量高的探测精度,根据探测站之间的距离、几何形状及安装点的通信条件,结合“5站布点”效果误差评估分析结果,我们对兰州区域气象中心闪电定位仪选址方案进行了设计,将闪电定位仪网分别布设在临夏市气象局、定西市气象局、永登县气象局、靖远县气象局、兰州区域气象中心(甘肃省气象局)。对上述5站的实际电磁干扰情况进行测量分析。选用选址仪、示波器、手持GPS,对上述探测站进行了地理位置测定、环境噪声测定以及阈值测定,具体的测量数据见表1。

表 1 5站测量数据

Tab 1 Measurement data of five stations distribution scheme

	临夏	定西	永登	靖远	兰州
经度 / °E	103.1763	104.6144	103.2504	104.6867	103.6300
纬度 / °N	35.5798	35.5876	36.7475	36.5693	36.0300
B_{EW} / mV	403	434	501	458	468
B_{NS} / mV	394	401	439	410	407
E / mV	615	675	593	603	639
阈值测定 / mV	100	300	100	200	200

其中,测量时旋转选址仪天线记录最大值,各次测量时的天线位置可以移动。 B_{EW} 、 B_{NS} 为选址仪的正交磁场天线接收的磁场信号经电路处理后得到磁场的东西和南北分量,观察时间 1 min,当调到某一阈值时,如果在规定时间内选址仪红色灯不闪动,则 >此阈值的档次可以不测。上述数据均取平均值。通过测量,我们发现定西、靖远、兰州的阈值(电磁干扰)稍大些,为了得到尽可能多的探测数据,在保证闪电定位网正常运行的同时,分别设置了5站的工作门限阈值(依次为 8、14、8、10、10)。

5.2 闪电定位误差评估

根据上述5站位置,利用闪电定位误差评估软件进行了闪电定位误差评估,评估结果如图3所示。

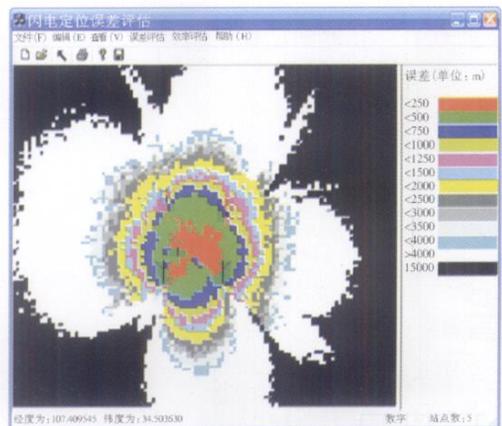


图 3 兰州区域气象中心闪电定位误差评估图

Fig 3 Evaluation of errors in lightning orientation in the network of Lanzhou Center Meteorological Observatory

根据效果评估图结合兰州区域气象中心地图, 我们绘制出了实际探测效果图 4。

由评估结果可以得出结论:兰州区域气象中心

主要地区闪电定位精度优于 300 m, 区域范围内的闪电定位精度可达 500 m。

由上述分析, 结合甘肃省的实际情况^[8]在最大

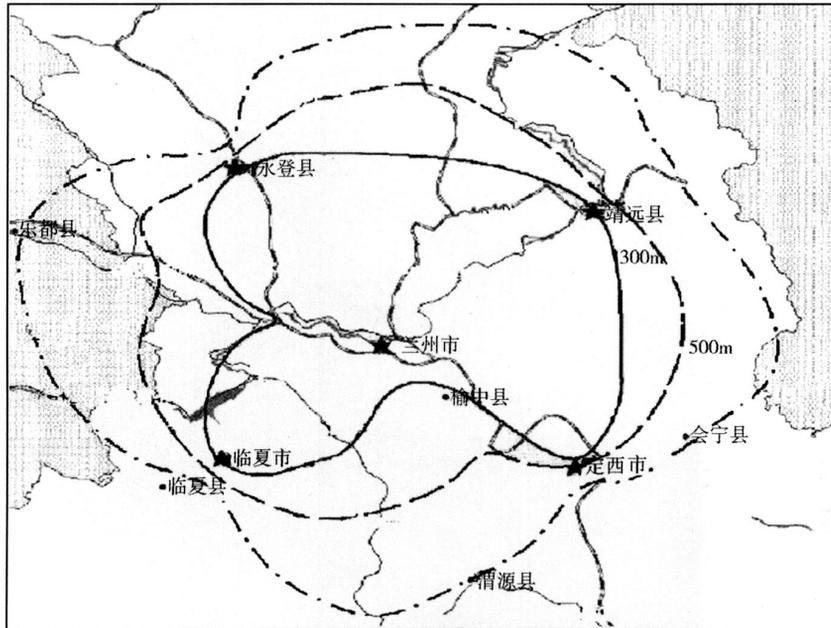


图4 定位精度实际效果图

Fig.4 The practical detection precision in lightning orientation

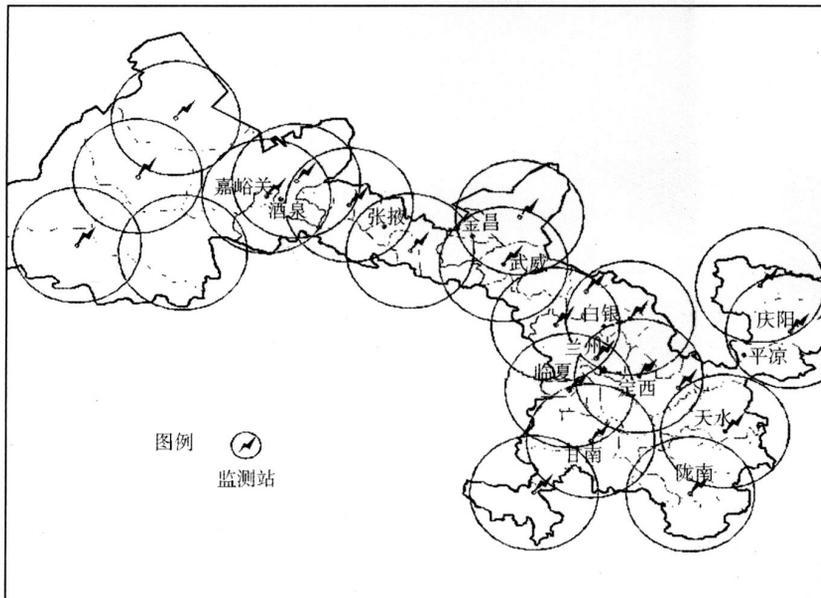


图5 甘肃省闪电定位网效果图

Fig.5 The network of lightning orientation in Gansu Province

限度的节省闪电定位布网成本的前提下,建议在兰州、定西、临夏、永登、靖远 5 站建成以后,其它站点应该布设在玛曲、临潭、武都、天水、庆阳、环县、武威、民勤、民乐、肃南、嘉峪关、金塔、肃北、安西、阿可塞等地,如图 5。从图中可以明显看出,武威、张掖、酒泉 3 个地区的闪电定位网相对比较稀疏,但随着中国气象局在全国范围内大面积进行闪电定位网的布设工作的展开,周边省份的闪电定位网络可以覆盖到这些地区,从而在不增加闪电定位探测设备的前提下,提高甘肃省雷电定位精度。

6 小 结

(1)由时差法闪电定位原理出发,分析了其定位误差的主要来源是由于闪电定位仪的布站位置引起的定位误差。

(2)目前闪电定位误差基本上是根据经验估计或积累的探测资料来进行统计分析的,具有较大的主观性,定位仪站点位置的选定也存在较大的盲目性。根据闪电定位的原理和其误差来源分析,我们利用计算机模拟对闪电定位误差进行定量评估。

(3)闪电定位的定位误差评估解决了对闪电定位仪定位误差的定量估计问题,采用计算机模拟方式进行定位误差评估,定位误差不仅可以评估已设

探测网络的定位误差,更重要的是可以为即将布设站点提供选址依据。

(4)通过对兰州区域气象中心闪电定位网的设计与系统的误差分析,结合闪电定位相关应用软件,得出了兰州区域气象中心闪电定位网的定位精度,为将来在全省范围内的大面积布网选站提供了参考。

参考文献:

- [1] 许小峰. 国家闪电监测网的建设与技术分析 [J]. 中国工程科学, 2002(5): 7 - 13.
- [2] 赵文光, 吴先志, 张文亮. 到达时差法雷电定位系统图形因素误差分析 [J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 8 - 12.
- [3] 吴翠红, 左申正, 万玉发. 闪电定位系统布网方案设计的技术探讨 [J]. 2002, 28(6): 11 - 15.
- [4] 张勤, 王光财, 吴维宁. 新的综合闪电定位系统的误差计算 [J]. 高电压技术, 2000, 96(2): 54 - 55.
- [5] 杨毅, 邱崇践. 多普勒雷达资料方案比较研究 [J]. 干旱气象, 2005, 2(2): 6 - 10.
- [6] 杨波, 邱实, 宁军, 等. 闪电定位误差及探测效率评估 [J]. 解放军理工大学学报, 2006, 7(5): 505 - 509.
- [7] 李照荣, 陈添宇, 康凤琴, 等. 兰州周边地区闪电分布特征 [J]. 干旱气象, 2004, 22(2): 45 - 51.
- [8] 孙林花, 陈旭辉. 沙尘暴资料传输系统 [J]. 干旱气象, 2006, 24(2): 84 - 88.

Evaluation of Lightning Orientation Error and Example Analysis

LIANG Hua¹, ZHANG Tao², YAO Yanfeng³, XU Zibong¹, PANG Wencheng⁴, ZHANG Yufei⁴

(1. United Data Laboratory of Gansu Provincial Meteorological Bureau & Lanzhou University, Gansu Meteorological Information and Technic Support and Equipment Center, Lanzhou 730020, China; 2. Yunnan Atmosphere Observation Technology Center, Kunming 650034, China; 3. Tianshui Meteorological Observatory, Tianshui 741000, China; 4. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Quantitative analysis of errors in lightning orientation is the key issue in its application. In this paper, errors and their sources in the lightning orientation process are analyzed based on the principle of TOA lightning orientation. With a computational model, we quantify errors in lightning orientation, which can be used to evaluate errors of existing lightning orientation network, and can offer some help in distribution of future lightning location system. As an example, the lightning network in Lanzhou Central Meteorological Observatory, it demonstrated that "five stations distribution" had some advantage, which can help to select locations for the future detection network in Gansu province.

Key words: lightning orientation; error evaluation; Lanzhou; site selection