

发射场闪电定位精度与效能分析

杨道勇¹ 周 率² 肖银萍¹ 李 钢²

(1 西昌卫星发射中心 2 北京航天飞行控制中心)

摘 要 为了实现闪电定位中定位误差及探测效率评估的自动化,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以及其定位的误差来源。利用非线性最小二乘法进行优化计算,采用计算机模拟的方法,实现了对西昌卫星发射中心所使用的 ADTD 闪电定位系统的定位误差评估。研究成果不仅可以评估已设探测网络的定位误差,而且可为布设站点提供选址依据,提高探测精度。

关键词 闪电定位 探测效率 非线性最小二乘法 评估

分类号 V555+.2 **献标识码** A **文章编号** 1674-5825 (2010) 02-0053-05

随着闪电灾害对航空航天带来的巨大威胁,闪电探测越来越受到人们的关注。目前西昌卫星发射中心使用的 ADTD 型闪电探测设备在气象观测中扮演着十分重要的角色。闪电定位探测设备依靠闪电发生时产生的电磁波来对闪电进行定位。而闪电定位的误差问题和探测效率问题,往往依靠经验来判定,这对探测设备站点的位置选定有较大的影响。为了能够根据实际情况对闪电定位的误差和探测效率进行评估,制作有效的误差及效率评估工具是非常必要和紧迫的。

1 闪电定位原理

目前的闪电定位方法主要有三种,分别为定向交汇法、视察法和定向时差联合法。而时差法是目前闪电定位的主要方法,即使是定向时差联合办法,定位精度也主要取决于时差法定位。

每对探测站测量的到达时间之差可以确定 1 条双曲线,2 条双曲线的交点就是闪电的发生地点^[1]。时差定位有两种算法: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,采用三站以上的算法。

3 站定位时,3 个探测站收到信号时,2 条时差双曲线交于一点,此点即为雷击点。3 站以上定位时,有 3 个以上的探测站收到信号,由于多种因素的作用,

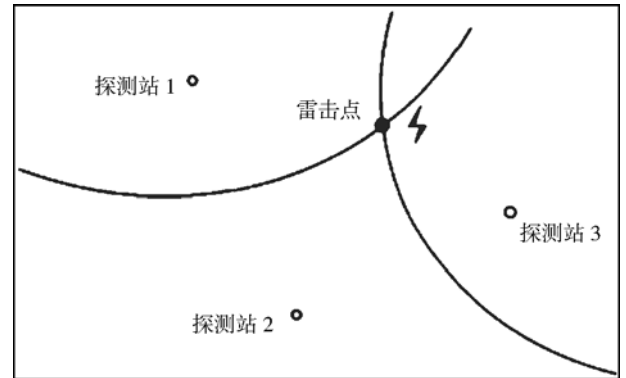


图 1 时差法双曲线定位

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,可以得出雷击点最有可能发生的地方。

最小二乘法算法原理归于利用广义逆求解无约束条件下的优化问题:

$$f_i(x_0, x_1, \dots, x_{n-1}) = 0, i = 0, 1, \dots, m-1, m \geq n \quad (1)$$

当 $m = n$ 时,即为求解非线性方程组。

其雅克比矩阵为:

$$F(X) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_0}{\partial x_0} & \frac{\partial f_0}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_0}{\partial x_{n-1}} \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_0} & \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{n-1}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_{m-1}}{\partial x_0} & \frac{\partial f_{m-1}}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_{m-1}}{\partial x_{n-1}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

来稿日期:2009-12-26;修回日期:2010-01-15。

作者简介:杨道勇(1977.02-),男,本科,工程师,主要从事气象信息处理工作。

计算非线性方程组最小二乘法的迭代公式为:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - a_k Z^{(k)} \quad (3)$$

其中 $Z^{(k)}$ 为线性方程组 $A^{(k)} Z^{(k)} = F^{(k)}$ 的最小二乘解。

式中 $A^{(k)}$ 为 k 次迭代值 $X^{(k)}$ 的雅克比矩阵; $F^{(k)}$ 为 k 次迭代值的左端函数值, 即:

$$F^{(k)} = (f_0^{(k)}, f_1^{(k)}, \dots, f_{m-1}^{(k)})^T \quad (4)$$

$$f_i^{(k)} = f_i(x_0^{(k)}, x_1^{(k)}, \dots, x_{n-1}^{(k)}), i=0, 1, \dots, m-1 \quad (5)$$

a_k 是使 a 的一元函数 $\sum_{i=0}^{m-1} (f_i^{(k+1)})^2$ 达到极小值的点, 即为所求定位点。

2 闪电误差分析

利用时差法进行闪电定位, 其误差来源主要有两种, 一种是闪电定位仪的测量误差, 另一种是由于闪电定位仪的布站位置引起的定位误差。

测量误差来源于所测闪电波到达不同站点的时间 Δt 的精确度。所测得的 Δt 精度越高, 定位误差越小, 反之越大。时间差 Δt 以定位仪 GPS 测时的精度为基础, 目前采用的 GPS 测试的精度可以达到 $0.1\mu\text{s}$ 。又由于电磁波传播路径受环境影响等原因, 闪电波形会发生畸变, GPS 所记录闪电波到达时间与闪电波沿直线到达时间之间还存在一个时间差 $\Delta t'$ 。因此, 所测得的 Δt 的误差为 GPS 测试误差与 $\Delta t'$ 之和。

由于时差法定位是采用双曲线交汇的方法对闪电进行定位, 理论和实践都表明, 布设站点的位置会直接影响闪电定位的精度。闪电在距离探测站较近时, 尤其是在探测站中间的区域, 定位的精度高; 而离探测站较远的区域, 定位的精度低; 并且在相同距离的情况下, 定位精度高低又与探测站的站点布设位置有关。合理地布设站点位置可以提高闪电定位的精度, 并且通过评估不同布站方式下闪电定位的误差, 可以尽量减小第二种误差。

3 闪电定位误差评估

目前闪电定位误差基本上是根据经验估计, 或依据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, 极少在布设前进行精度分析和技术评估。为了解决这些问题, 可以根据闪电定位的原理及其误差来源, 利用计算机模拟来对闪电定位误差进行定量评估。

时差法闪电定位的误差评估是对评估区域内各点可能存在的定位误差进行定量估算。由时差法定位原理可知, 进行定位的前提是知道闪电波到达各参与定位的探测站的时间。在实际探测中, 该时间存在误差, 因此可以将时间分解为两部分。一部分为误差情况下, 电磁波从雷击点到达探测站的时间; 另一部分为实际测量时间与无误差时间之间的时间差。在理论上, 如果探测站的测量无误差, 采用时差法进行闪电定位也是无误差的。探测站的测时误差导致了定位误差的出现, 因此首先需要确定测时误差。

电磁波传播理论的研究表明^[2], 长波在地表传播时, 受地形影响, 会发生畸变, 引起测时误差。根据统计结果, 每 100km 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 300km 以内, 最大测时误差不超过 $3\mu\text{s}$, 具体值可以根据当地的地理环境设定。由于测时误差是随机分布的, 在评估过程中, 将各个评估点到探测站的 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距离加权随机误差时间之和。

在评估区域内某一点发生闪电, 则探测站记录的闪电电磁波传播时间为真实闪电电磁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的偏差, 这个偏差就是各个点的定位误差。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个站点的含误差闪电电磁波传播时间, 求出时间差, 再利用时差定位算法进行定位, 定位结果与雷击点之间的距离就是所求的定位误差。

因此, 按上述原理和方法可以进行误差评估, 误差评估的步骤如下:

(1) 给定评估区域的经纬度, 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) 在西昌卫星发射中心, 划定以凉山州为主体、包括甘孜州南部的地区进行研究。所选取的闪电定位探测站为西昌站 (102.2438°E , 27.8976°N)、24# 站 (102.0676°E , 28.1946°N)、越西站 (102.5118°E ,

28.65045°N)、木里站(101.2751°E, 27.92939°N)和九龙站(101.5009°E, 29.008°N)。其具体分布如图 2:

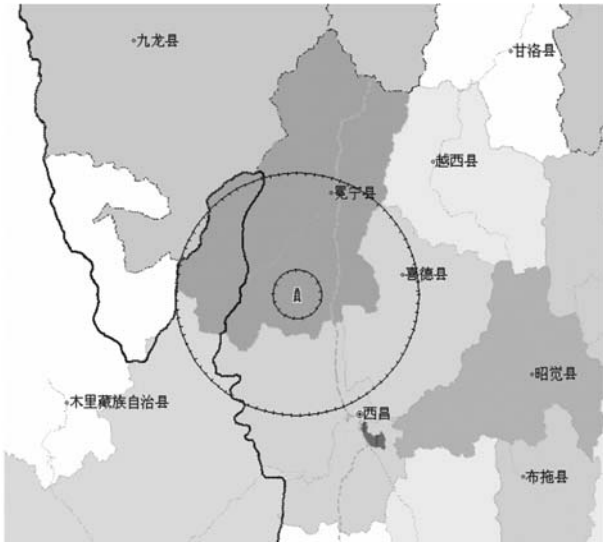


图 2 所选探测站分布示意图

(3) 将评估区域分割若干个格点, 我们划分为 200×200 个格点, 求出各格点与各探测站的距离 D_n 。

(4) 将 D_n 除以光速, 得到闪电产生的电磁波从格点到个站点无误差传播时间 T_n 。

(5) 将 T_n 与小于最大测时误差的距离加权随机误差时间相加, 模拟电磁波从格点位置到各个站点的记录传播时间 T_{nn} 。

(6) 利用模拟的记录传播时间 T_{nn} , 求得时间差。

(7) 再根据上述时间差, 利用 3 站或 3 站以上时间差定位算法, 得出闪电发生的位置的经纬度计算值。

可以计算出闪电发生点 (X, Y) 距离西昌站 (X_0, Y_0) 、24# 站 (X_1, Y_1) 、越西站 (X_2, Y_2) 、木里站 (X_3, Y_3) 和九龙站 (X_4, Y_4) 的距离为 L_0, L_1, L_2, L_3 , 和 L_4 。由此我们可以建立以西昌站为中心的包含四个双曲线方程的非线性方程组。

$$Y(1) = \text{Sqr}((X-X_1)^2 + (Y-Y_1)^2) - \text{Sqr}((X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2) - (L_1-L_0)$$

$$Y(2) = \text{Sqr}((X-X_2)^2 + (Y-Y_2)^2) - \text{Sqr}((X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2) - (L_2-L_0)$$

$$Y(3) = \text{Sqr}((X-X_3)^2 + (Y-Y_3)^2) - \text{Sqr}((X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2) - (L_3-L_0)$$

$$Y(4) = \text{Sqr}((X-X_4)^2 + (Y-Y_4)^2) - \text{Sqr}((X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2) - (L_4-L_0)$$

接下来就可以计算得到方程组的雅克比矩阵:

$$\begin{aligned} p(1,1) &= (X-X_1) / \text{Sqr}((X-X_1)^2 + (Y-Y_1)^2) \\ &\quad - (X-X_0) / \text{Sqr}((X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2) \\ p(1,2) &= (Y-Y_1) / \text{Sqr}((X-X_1)^2 + (Y-Y_1)^2) \\ &\quad - (Y-Y_0) / \text{Sqr}((X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2) \\ p(2,1) &= (X-X_2) / \text{Sqr}((X-X_2)^2 + (Y-Y_2)^2) \\ &\quad - (X-X_0) / \text{Sqr}((X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2) \\ p(2,2) &= (Y-Y_2) / \text{Sqr}((X-X_2)^2 + (Y-Y_2)^2) \\ &\quad - (Y-Y_0) / \text{Sqr}((X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2) \\ p(3,1) &= (X-X_3) / \text{Sqr}((X-X_3)^2 + (Y-Y_3)^2) \\ &\quad - (X-X_0) / \text{Sqr}((X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2) \\ p(3,2) &= (Y-Y_3) / \text{Sqr}((X-X_3)^2 + (Y-Y_3)^2) \\ &\quad - (Y-Y_0) / \text{Sqr}((X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2) \\ p(4,1) &= (X-X_4) / \text{Sqr}((X-X_4)^2 + (Y-Y_4)^2) \\ &\quad - (X-X_0) / \text{Sqr}((X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2) \\ p(4,2) &= (Y-Y_4) / \text{Sqr}((X-X_4)^2 + (Y-Y_4)^2) \\ &\quad - (Y-Y_0) / \text{Sqr}((X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2) \end{aligned}$$

最后将雅克比式带入最小二乘法模块中, 进行最多迭代次数设计为 60 次的计算。在迭代计算一定次数之后, 当计算值的精度达到预设值 δ 后 (δ 的取值主要根据闪电定位仪网的业务需求, 如西昌卫星发射中心是根据发射试验任务气象条件设定), 即认为定位成功; 如果 60 次迭代计算完成后, 结果是发散的, 则视为本次定位失败。

计算上述计算值与各站点位置之间的距离, 即得到所求误差。

重复 4~7 步 5 次, 轮流以西昌站、24# 站、越西站、木里站、和九龙站为中心, 将 5 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, 如图 3。

图 3 是 200×200 的网格中绘制的闪电定位精度分析图, 其中深红色区域代表定位精度 $\leq 100\text{m}$; 紫红色的范围表示定位精度 $\leq 300\text{m}$; 黄色区域代表定位精度 $\leq 500\text{m}$; 蓝色区域定位精度 $\leq 1000\text{m}$ 。从图中可

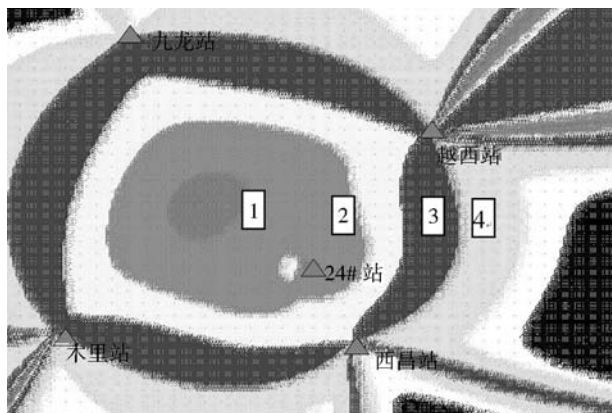


图3 西昌地区闪电定位精度分析图
(图中 1:深红;2:紫红;3:黄色;4:蓝色)

可以看出,以发射场区为中心的 40km 范围之内,大部分区域的定位精度能够达到 300m 以内,小部分区域也达到 500m 以内,说明西昌卫星发射中心所建立的闪电定位监测网,其探测站布局基本合理,探测精度较高,所得到的闪电定位结果可以作为发射试验任务和日常气象保障中进行雷电预警的可靠依据。

4 闪电定位探测效率评估

由于电磁波在传播路径上存在衰减,受到干扰,闪电定位系统对能探测到的闪电有一个电流强度要求,即闪电探测效率问题。如果环境的电磁波干扰较强,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,如果环境的电磁干扰弱,就能探测到电流相对较小的闪电,探测效率相对较高。

在闪电定位仪所在位置的电场与闪电电流存在以下关系^[2]:

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

其中, K 和 m 都是与地面电导率、地形及闪电波形有关的系数。

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

着闪电发生位置与定位仪距离的不同而不同,距离越近,值越小;距离越远,值越大。

探测效率评估步骤为:

(1)假设雷击点为 A ,计算雷击点 A 到各个探测站的距离;

(2)找出距雷击点最近的 3 个或 4 个探测站(3 站定位时找出 3 站,4 站定位时找出 4 站),根据距雷击点的距离对找出的站点进行排序;

(3)设定的可探测场强阈值 E ;

(4)根据电场与电流的关系,计算出第 3 或者第 4 个站的可探测的在 A 点闪电最小电流值 I ;

(5)将评估区域内各个格点作为雷击点重复(1)~(4)步,找出各个格点对应的最小电流值。

由于闪电定位探测效率的解算与其定位精度解算类似,而且在西昌卫星发射中心,计算出的闪电定位探测效率的分布模态也与定位精度非常一致(图略),在此不再详述。

同时,我们已通过计算机编程实现对上述定位精度和探测效率的计算与评估。

5 结束语

定位误差评估解决了对闪电定位仪定位的定量估计问题,探测效率评估则可用于分析探测设备对闪电的有效探测区域。采用计算机模拟方式进行定位误差计算以及探测效率评估,不仅可以评估已设探测网络的定位误差,更重要的是还可为布设站点提供选址依据,提高探测精度,有效合理利用探测设备。在新建海南发射场的闪电定位网络布站设计,以及探测精度和范围评估中,我们将应用本文的技术进行详细讨论,具体研究结果将另文总结。◇

参 考 文 献

- [1] 黄建波,王克印.双曲线最优生成算法及实现.微型计算机,1997(3).
- [2] 吴翠红,左申正,王玉发.闪电定位系统布网方案设计的技术探讨.气象,2008 第 6 期:24-25.

Analysis on Precision and Efficiency of Lightning Positioning System in Xichang Satellite Launch Center

YANG Daoyong¹ ZHOU Lv² XIAO Yinping¹ LI Gang²

(1. Xichang Satellite Launch Center 2. Beijing Aerospace Command and Control Center)

Abstract: In order to automatically evaluate the precision and efficiency of lightning positioning system in Xichang Satellite Launch Center (XSLC), lightning positioning principle and source of errors for the positioning are analyzed by using time difference lightning positioning principle. By means of nonlinear least square method to optimize calculation and utilizing computer simulation approach, effective evaluations on the positioning errors for the ADTA lightning positioning system used in XSLC are realized. The products can be used to provide site choosing information for setting up stations and improving detection precision, as well as used to evaluate the errors of lightning positioning systems.

Key words: Lightning Positioning; Detection Efficiency; Nonlinear Least Square Method; Evaluation

“猎鹰 9”商业运载火箭进行首次飞行试验

美国东部时间 6 月 4 日 14 时 25 分,美国空间技术探索(SpaceX)公司的“猎鹰 9”(Falcon 9)运载火箭从美国佛罗里达州卡纳维拉尔角空军基地发射升空,并于 9.5min 后将“龙”太空舱的实体模型送入 250km 高、倾角 34.5° 的预定轨道。这是美国“商业轨道运输服务”计划下开发的商业运载火箭进行的首次飞行试验。

“猎鹰 9”火箭高约 55m,为两级液体火箭,全部采用液氧和煤油作为推进剂,近地轨道运载能力达到 9t 左右。

由于在奥巴马政府制定的 NASA 2011 财年预算中,取消了“星座”计划中“阿瑞斯”运载火箭的研制,转而在未来 5 年内投资 60 亿美元支持发展可靠的、成本可支付的商业乘员和货物运输能力,因此此次发射在美国受到极大关注。NASA 局长博尔登表示,“猎鹰 9”火箭的成功发射是商业运输尝试的一个重要里程碑,使其在为国际空间站提供货运服务方面又向前迈进了一步。

NASA 于 2008 年授出 31 亿美元合同,用于国际空间站 2011~2016 年的商业运输服务,其中 SpaceX 公司获得了 16 亿美元。不过此次发射并不属于合同规定的演示验证飞行,首次“猎鹰 9”火箭/“龙”太空舱演示验证飞行将在 2010 年 7 月进行。届时,“龙”太空舱将携带推进装置和全套电子设备,执行为期 4.5h 的飞行任务,以演示验证系统的发射、分离、入轨、信号传输、遥测、指令接收、轨道机动、热控制、再入大气层和飞船回收等能力。而在 2011 年 3 月进行的飞行中,“龙”太空舱将演示验证与国际空间站对接的能力。

轨道科学公司是 NASA 授予商业运输服务合同的另一家私营企业,其设计的“金牛座”火箭/“天鹅座”飞船系统将在 2011 年 6 月进行首次飞行。

摘编自《载人航天动态》