

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205819

基于时差和聚类算法的闪电定位方法*

郑玉兰^{1,2} 徐 伟^{1,2}

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044;
2. 南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044)

摘 要: 闪电的监测与定位对减少雷电灾害具有重要的意义,定位精度是闪电定位系统的关键指标。针对传统定位方法的定位精度受到数据粗差、站网布局影响大的问题,提出一种基于时差和聚类算法的定位方法。基于到达时间差原理对闪电定位数据进行组合定位,采用 K-means 对组合定位数值进行分类并剔除离群点得到最终精确定位值。以江苏省闪电探测网为例,定量研究了区域内定位误差的数值分布、测时精度和站网布局对定位误差的影响。结果表明,相对传统的到达时间差方法,该方法计算的区域定位误差由 5 km 减小为 2 km;四站定位的均方根误差由 0.89 km 减少为 0.07 km;定位误差受到测时误差的急剧增加变为缓慢增加,且网站布局对定位误差的影响明显减小。

关键词: 闪电定位;到达时间差;聚类算法;蒙特卡罗

中图分类号: TN98; P41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.15

Lightning location method based on time difference and clustering algorithm

Zheng Yulan^{1,2} Xu Wei^{1,2}

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The lightning monitoring and location are of great significance to reduce the lightning disaster, and the location accuracy is the key index of the lightning location system. Aiming at the problem that the positioning accuracy of traditional positioning methods is greatly affected by gross error of data and station network layout, a positioning method based on time difference and clustering algorithm is proposed. The lightning positioning data is combined based on the principle of time difference of arrival, K-means clustering algorithm is used to classify the combined positioning values and remove outliers to obtain the final accurate positioning value. Taking the lightning detection network in Jiangsu Province as an example, the numerical distribution of location error, the time measurement accuracy and the influence of station network layout on the location error are quantitatively studied. The results show that compared with the traditional arrival time difference method, the regional positioning error calculated by this method is reduced from 5 km to 2 km; The root mean square error of four station positioning is reduced from 0.89 km to 0.07 km; The location error is slowly increased due to the sharp increase of the time measurement error, and the impact of website layout on the location error is significantly reduced.

Keywords: lightning location; arrival time difference; clustering algorithm; Monte Carlo

0 引 言

闪电是大气中的放电现象,常伴随着冰雹、暴雨等强

对流天气过程^[1]。闪电具有强大电流、电磁辐射以及炙热高温等物理效应因此常常引起雷击灾害,包括对建筑物、电力设备、信息通信设备、油罐储运等造成的巨大破坏^[2-3]。闪电的监测预警及准确定位对减少雷击灾害事

故具有重要的意义^[4]。

目前,闪电定位系统利用闪电回击辐射的电磁场特性来遥测其发生的时间、位置、强度和极性,已应用于气象、电力、航天航空等领域。定位精度是评价闪电定位系统的关键技术指标^[5]。到达时间差(time difference of arrival, TDOA)定位方法由于定位精度较高,已成为主流闪电定位方法。该方法是基于各个闪电探测站与闪电辐射源之间的距离差确定定位双曲线,通过求解双曲线方程组来确定闪电辐射源信号相对于各个探测站相对位置^[6]。

2019 年,中国气象研究院的 Chen 等^[7]首次将时间反演技术(time reversal, TR)引入雷电低频三维定位,对 7 次触发雷电事件和 45 次回击事件的检测效率分别达到 100% 和 95.6%,其相比到达时间方法得到了更多的定位点,提高了闪电定位能力,但该方法需要更多的处理时间。2020 年,王涛等^[8]基于群时延计算到达时差,采用高斯牛顿迭代方法确定闪电回击点,该超长基线闪电定位算法定位精度较高,但当个别探测站受未知低频信号源的影响而使到达时刻计算误差较大时,闪电定位结果会陷入局部极小值而定位失败。Mehranzmir 等^[9]针对到达时间差技术使用 3 个传感器定位存在伪雷击点的问题,提出了人工神经网络算法确定真正雷击点,节省了硬件成本并将平均误差降为 350 m,但人工神经网络同样需要较长的训练时间难以应用到探测网络中。Qin 等^[10]利用网格遍历算法(grid traverse algorithm, GTA)建立网格数据库,找到与时间差匹配的网格点,提出并检验了基于图形处理器(graphics processing unit, GPU)的网格遍历地理定位算法(a GPU-based grid traverse geolocation algorithm, GPU-GTA),该算法在二维和三维闪电定位网络都较好的定位了闪电定位源,提高了闪电定位速度,但闪电信号的匹配能力没有很高。2021 年, Li 等^[11]使用到达时间差确定电磁时间反转(electromagnetic time reversal, EMTR)技术的初始域成像二维闪电通道,相比 TDOA 方法提高了定位效率,但频域中操作的 EMTR 方法计算成本较高。王彦辉等^[12]利用经验模态分解方法处理闪电电场信号,进行闪电辐射源脉冲匹配后基于到达时间差进行闪电三维定位,获得了较好的定位效果,但当有多个辐射源脉冲杂糅时,相同闪电辐射源脉冲匹配效果不佳,影响定位结果。2022 年, Fan 等^[13]提出了一种基于距离差空间投影的三维闪电定位方法,将 TDOA 投影到距离差空间中后采用网格遍历算法遍历地理空间,该方法可以实时、准确地定位闪电辐射源,虽然该方法考虑了遍历计算成本,但闪电数据具有聚集性,其未能充分挖掘闪电数据的特征。骆瑶莹等^[14]提出融合雷电声波信号和放电电磁信号的 TDOA 雷电定位改进方法,将监测目标区域的整体雷电定位精度提高了 46.6%,但

声波信息在实际环境中易受其他信息干扰,从而可能得出错误雷击点。

TDOA 定位方法依据时间差定位,由于雷电电磁场在传播过程中会受到地形、地球电导率等因素干扰,用于定位的原始闪电数据受到各类误差因素的影响会含有粗差,使 TDOA 算法定位曲线往往无法相交于一点,因此该方法存在定位不准确、抗干扰性差等问题。而聚类算法可以从大量模糊、含噪声或随机的实际数据中提取出需要的信息,基于此提出一种基于聚类算法的闪电定位方法。采用 TDOA 四站定位方法对闪电回击数据进行组合定位得到闪电定位结果,之后利用 K-means 算法对得到的定位结果进行分类并剔除离群点得到最终的定位结果,提高定位的准确率以及抗干扰能力。

1 到达时间差定位原理

闪电定位系统由闪电探测站、数据处理及系统控制中心、用户工作站 3 部分组成。闪电信号探测站由电磁脉冲接收天线、雷电波形识别及处理单元、高精度晶振、电源、通信和保护单元组成^[15]。探测站将测定的闪电回击的时间、方位、强度等特征量同步发送至中心站,中心站的前置处理机处理接收的闪电信号后进行闪电位置计算并将结果发送给用户工作站。

TDOA 是一种无线定位方法,需要 3 个或 3 个以上已知位置坐标的闪电探测站进行定位。基于 TDOA 定位的基本原理图如图 1 所示。

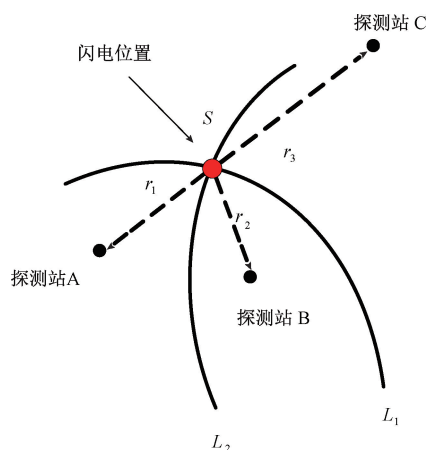


图 1 TDOA 定位原理

Fig. 1 TDOA positioning principle

图 1 中共有 3 个闪电探测站 A、B、C, S 为闪电发生位置。假设闪电辐射源 S 到探测站 A、B、C 的距离分别为 r_1 、 r_2 和 r_3 , 实际情况中该距离未知。闪电探测站 A 和 B 可测量闪电回击辐射源 S 发出的电磁波信号到达各自探测站的时间, 两站存在时间差, 将时间差乘以闪电信号

的传播速度可确定两站之间的距离差 $r_{21}=r_2-r_1$, 构成一条以探测站 A、B 为焦点, 距离差 r_{21} 为长轴的双曲线 L_2 , 闪电发生位置在这条双曲线上的某一点。探测站 C 与闪电探测站 B 同样可构成另一条定位双曲线 L_1 , 两条双曲线的交点 S 即为闪电辐射源位置, 即图 1 中实线箭头所指圆点位置。

图 2 为闪电定位系统的布站示意图。假设闪电的发生位置为 $S(x, y, z)$, 发生时间为 t , 第 i 个闪电探测站的坐标位置为 (x_i, y_i, z_i) , 到达时间为 t_i 。 $i=0$ 时表示主站, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 时表示副站。闪电到主站 (x_0, y_0, z_0) 的距离为 r_0 , 到第 i 个副站的距离为 r_i , Δr_i 为 r_i 与 r_0 的距离差, c 为电磁波信号的传播速率。

根据 TDOA 定位原理, 距离差方程可表示为:

$$\begin{cases} r_0 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \\ r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \\ \Delta r_i = r_i - r_0 = c(t_i - t_0) \end{cases} \quad (1)$$

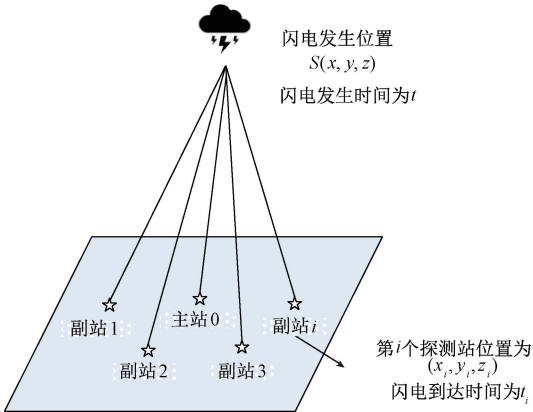


图 2 闪电定位系统布站示意图

Fig. 2 Schematic diagram of lightning positioning system station layout

若探测站个数为 4, 即式 (1) 中的 $i=0, 1, 2, 3$ 。式 (1) 可变化为:

$$r_i^2 - r_0^2 = d_i - d_0 \quad (2)$$

其中, $d_i = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2$, $d_0 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2$ 。

对式 (2) 进行移项、平方、整理化简可得:

$$\begin{cases} (x_0 - x_i)x + (y_0 - y_i)y + (z_0 - z_i)z = k_i + r_0 \cdot \Delta r_i \\ k_i = \frac{1}{2} [\Delta r_i^2 + (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2) - (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, 3$ 。是一个关于 (x, y, z, t) 的非线性方程组, 将 r_0 作为已知量, 可得到矩阵表达式:

$$AX = B \quad (4)$$

即:

$$\begin{bmatrix} x_0 - x_1 & y_0 - y_1 & z_0 - z_1 \\ x_0 - x_2 & y_0 - y_2 & z_0 - z_2 \\ x_0 - x_3 & y_0 - y_3 & z_0 - z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 + r_0 \Delta r_1 \\ k_2 + r_0 \Delta r_2 \\ k_3 + r_0 \Delta r_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

当闪电探测站不部署在同一平面上时, 系数矩阵 A 的秩等于 3, 可以得到:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (6)$$

将 X 代入式 (1) 可以得到方程:

$$ar_0^2 + br_0 + c = 0 \quad (7)$$

解一元二次方程式 (7) 得到 r_0 的数值解后, 将 r_0 反代入式 (6) 中即可求出闪电辐射源的大地坐标。方程式 (7) 可能会出现解的模糊。当 $\Delta = b^2 - 4ac > 0$ 时, r_0 有两个解 r_{01}, r_{02} , 即双曲面有 2 个交点。 r_0 表示距离必须为正数, r_{01}, r_{02} 一正一负时选取正根作为定位解。 r_{01}, r_{02} 皆为正数时可以增加方位角等辅助信息消除定位模糊。 $\Delta = b^2 - 4ac = 0$ 时 r_0 有唯一解, 不存在定位模糊问题。 $\Delta = b^2 - 4ac < 0$ 时 r_0 无解, 无法定位闪电辐射源。

闪电定位系统记录的闪电回击数据是每个闪电探测站的经度、纬度、高度信息, 需要将空间大地坐标系与空间直角坐标系进行转换。

由于地球表面真实形状不是完美的规则球形, 使用 1984 年世界大地坐标系 (world geodetic system 1984, WGS-84) 椭球模型作为闪电定位参考模型。WGS-84 椭球模型中经度 L 、纬度 B 、高度 H 的求解公式为:

$$\begin{cases} L = \arctan(y/x) \\ B \approx \arctan\left[\frac{z}{(1 - e^2) \sqrt{x^2 + y^2}}\right] \\ H = \sqrt{x^2 + y^2} / \cos B - N \\ N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B} \end{cases} \quad (8)$$

式中: a, b 分别为椭球的长短半轴, $a = 6378.137 \text{ km}$, $b = 6356.752 \text{ km}$ 。 e 为椭球的第一偏心率, N 为椭球的卯西圈曲率半径。

相同基准下空间直角坐标系下定位的坐标 x, y, z 的求解公式为:

$$\begin{cases} x = (N + H) \cos L \cos B \\ y = (N + H) \sin L \cos B \\ z = [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{cases} \quad (9)$$

综上, 闪电定位系统记录接收到闪电回击数据的站经纬高信息以及到达时间后, 经式 (9) 进行坐标转换, 通过方程式 (7) 计算得到距离 r_0 的解析解, 将 r_0 代入式 (6) 可求出闪电辐射源的坐标, 最终经过式 (8) 得到闪电的经纬高位置。

2 基于聚类的 TDOA 闪电定位方法

闪电定位系统的探测站探测到同一闪电的回击数据

并输出至中心站,每 4 个探测站即可进行一次定位。若接收的观测数据为 n 条,则最多可得到 c_n^4 个定位结果。在探测站接收到的闪电定位数据进行定位结果计算时,部分雷电探测数据会含有粗差,粗差包括局部电磁噪声、复杂地形造成的传播误差以及仪器测量误差等^[16]。若不剔除粗差,雷电定位结果也会有较大误差。对雷电定位结果进行聚类分析,实际中含有粗差的闪电回击数据较少,根据这个特性,对定位结果进行多次聚类,不含有粗差或粗差较小的数据得到的定位结果将聚类为最集中的最大类簇,故将含有最多定位数据的最大类簇的聚类中心点作为闪电的真实位置。

聚类分析是指将各种形式的数据的集合分为由相似的对象组成的数个不同类的分析过程。K-means 聚类算法^[17]是无监督聚类算法的代表,属于划分聚类算法。主要功能是将指定的 m 个数据对象中相似度高的样本划分为一个簇。每个簇中至少包含一个数据对象,且每个数据对象必须只属于一个类簇。K-means 聚类算法时间复杂度低,在处理较大数据集时具有良好的伸缩性和效率,故使用 K-means 算法来进行闪电定位。

K-means 聚类算法的描述如下:

首先初始化闪电定位样本质心。 m 维向量闪电定位样本集合 X 中,样本元素 $x_i \in X, x_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi})^T$ 。初次迭代时在集合 X 中随机选取 k ($k < n$) 个闪电定位样本点作为初始化的聚类中心点,记为 $n^{(0)} = (n_1^{(0)}, \dots, n_l^{(0)}, \dots, n_k^{(0)})$ 。

对固定的聚类中心 $n^{(t)} = (n_1^{(t)}, \dots, n_l^{(t)}, \dots, n_k^{(t)})$,其中 $n_l^{(t)}$ 为类簇 S_l 的中心点,按照样本点与初始聚类中心的距离对闪电定位样本点进行聚类。对于样本点 x_i 与聚类中心点 n_j 之间的闵氏距离为:

$$d_{ij} = \left(\sum_{k=1}^m |x_{ki} - n_{kj}|^p \right)^{\frac{1}{p}}, p \geq 1 \quad (10)$$

采用欧氏距离计算闪电数据集 X 中的每个闪电定位点到簇聚类中心的距离。式 (10) 中 $p=2$ 可表示为欧氏距离:

$$d_{ij} = \left(\sum_{k=1}^m |x_{ki} - n_{kj}|^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \|x_i - n_j\| \quad (11)$$

根据式 (11) 计算每个样本点到类簇中心的距离,依据计算的距离使每个闪电定位点归属到与其距离最小的类簇中,可得到 k 个类簇的集合 $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_k\}$,生成初步的聚类结果 $C^{(t)}$ 。

对聚类结果 $C^{(t)}$ 计算当前每个类簇的样本均值:

$$u_l = \frac{\sum_{i=1}^z x_i \big|_{s^{(i)}=l}}{\sum_{i=1}^z 1 \big|_{s^{(i)}=l}} = \frac{\text{类别 } l \text{ 中所有样本特征和}}{\text{类别 } l \text{ 中的样本个数}} \quad (12)$$

其中, x_i 为类别 l 中的闪电数据样本点, $s^{(i)}$ 为 x_i 所属

类别, z 为各个类簇中样本点的总数。将均值作为新的聚类中心点 $u^{(t+1)} = (u_1^{(t+1)}, \dots, u_l^{(t+1)}, \dots, u_k^{(t+1)})$ 。定义闪电样本点与其所属类中心之间的距离总和为最终损失函数:

$$W(C) = \sum_{i=1}^k \sum_{C(i)=l} \|x_i - \bar{u}_l\|^2 \quad (13)$$

其中, $\bar{u}_l = (\bar{u}_{1l}, \bar{u}_{2l}, \dots, \bar{u}_{ml})^T$ 为第 l 个类的质心(即聚

类中心点)。 $n_l = \sum_{i=1}^n I(C(i)=l)$ 中 $I(C(i)=l)$ 表示取值为 0 或 1 的指示函数。函数 $W(C)$ 表示相同类簇中样本点的相似程度。K-means 聚类转换为一个优化问题的求解:

$$C^* = \operatorname{argmin}_C W(C) = \operatorname{argmin}_C \sum_{l=1}^k \sum_{C(i)=l} \|x_i - u_j\|^2 \quad (14)$$

如果迭代收敛或者满足迭代停止条件,即式 (13) 中的误差平方和 $W(C)$ 达到最小则输出最后聚类结果 $C^* = C^{(t)}$,否则继续迭代,令迭代次数 $t = t + 1$ 且返回式 (11) 重新计算。

闪电定位流程图如图 3 所示。主要步骤如下:

1) 假设所有闪电探测站可同时接收到同一条闪电信号的闪电回击数据 X ;

2) 将所有闪电探测站每 4 站进行组合,最多可以得到 $j=c_n^4$ 种组合;

3) 利用四站时差定位法分别对闪电辐射源进行定位,可以得到闪电定位数据集 $X = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}$;

4) 采用 K-means 算法对所有定位数据进行聚类分析,不含噪声或噪声较小的数据点因聚合性较好可以聚成一类,含噪声较大的数据点聚合成另外一类或几类,共 k 类: $s_1, s_2, s_3, \dots, s_k$;

5) 选取输出 k 个聚类簇集合 $\{s_1, s_2, s_3, \dots, s_k\}$ 中包含闪电定位数据点最多的簇中心 $n_p, 1 \leq p \leq k$, 作为最终的闪电定位结果,排除定位结果中的干扰定位点;

6) 根据实际定位结果分析算法的定位性能。

3 实验研究

3.1 定位精度影响因素

闪电定位精度以几何精度稀释 (geometrical dilution of precision, GDOP) 描述空间不同位置的定位误差分布^[18]。影响三维闪电时差定位精度的主要因素有站址误差、闪电布站方式与测时误差等。

站址误差一般包括天线安装引起的误差以及全球定位系统 (global position system, GPS) 定位引起的误差,误差影响小,布站方式对定位精度影响的研究对实际应用中探测站的选址具有重要意义。测时误差对定位精度影

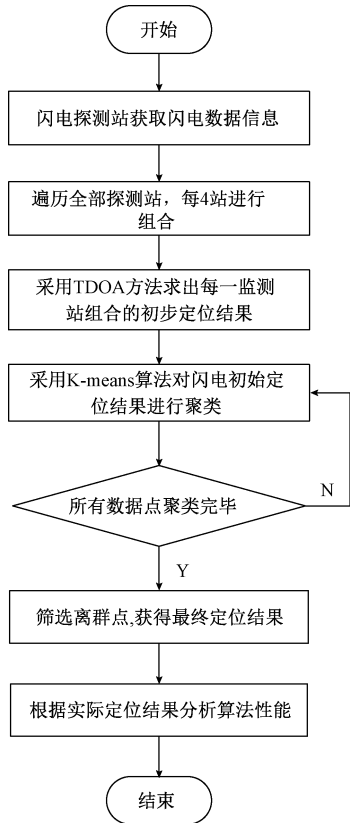


图 3 聚类算法闪电定位流程图

Fig. 3 Flow chart of lightning location based on clustering algorithm

响的研究对闪电定位系统的硬件设计具有指导作用。

研究探测站布站方式对闪电定位精度的影响。设定目标定位区域为 $200\text{ km} \times 200\text{ km}$, 闪电发生高度为 10 km , 闪电探测站站间距离为 20 km , 系统测时误差为 20 ns 。闪电探测站在不同布站方式下的坐标如表 1 所示。表 1 中的 1、2、3、4 分别为 Y 型、矩形、菱形和 T 型 4 种布站方式。

表 1 不同布站方式下的站点坐标

Table 1 Station coordinates under different station layout modes

布站	主站 坐标	副站 1 坐标	副站 2 坐标	副站 3 坐标
1	(100,100,0)	(117.32,110,0)	(82.68,110,0)	(100,80,0)
2	(110,90,0)	(90,90,0)	(90,110,0)	(110,110,0)
3	(100,100,0)	(117.32,110,0)	(82.68,110,0)	(110,120,0)
4	(100,100,0)	(100,120,0)	(80,120,0)	(120,120,0)

图 4 分别为 4 种布站方式:Y 型、矩形、菱形和 T 型在相同仿真设定条件下的 GDOP 定位精度分布图。图 4 中红点表示主站位置,黑点表示副站位置,等高线数值表示误差大小。

由图 4 可以看出,闪电监测站的布局方式不同,闪电定位精度 GDOP 也随之变化。Y 型布站下定位误差等高线围绕站点呈同心圆分布,误差由内向外依次递增,在站点周围位置误差最小为 0.1 km ,最大为 0.9 km 。误差分布均匀,无定位盲区。矩形布站下,4 个站点周围的等高线形成 4 个花瓣形状的区域。花瓣区间内,靠近站点的定位误差为 0.2 km 。误差围绕站点由内向外逐渐增大,离站点最远处定位误差为 1.5 km 。花瓣之外的空白区域为定位盲区。菱形布站方式下定位区域分成 3 部分,包括垂直方向上呈沙漏形、水平方向上两个呈花瓣形的等高线图。垂直方向的沙漏形区域定位精度较高,误差最小为 0.1 km ,水平方向的两个花瓣区域定位精度相对较低,最小为 0.2 km 。菱形布站方式下也存在无等高线分布的定位盲区。T 型布站下定位区域的误差等高线图在垂直方向呈沙漏型分布,垂直方向上的定位精度较高,最小为 0.1 km 。在确定闪电监测站位置分布时应充分考虑闪电站点的布站方式以提高闪电定位系统定位精度。

以 T 型布站为例研究测时误差对定位精度的影响。各闪电探测站坐标位置与表 1 中 T 型布站站点相同。设定闪电发生高度为 10 km , 闪电探测站站间距离为 20 km , 系统测量误差的标准差分别为 25 和 50 ns , GDOP 仿真图如图 5 所示。从图 5 可以看出,定位误差在 1.5 km 以内的定位区域随着测量误差的增大而减小,因此实际中,应尽量减小因测时误差增大而造成的闪电定位精度减小的影响。

3.2 区域定位误差实验分析

1) 实验方法闪电定位系统的误差主要受几个因素影响,包括:测时误差,如 GPS 时钟误差;雷电辐射源传播路径引起的偏差,如对流层反射误差;布网误差,即因探测网站点布站方式造成的探测网内定位精度不同。闪电定位系统所用的 GPS 授时精度小于 50 ns ,考虑雷电监测区域、雷电辐射传播误差如波形峰值时间判定及地表起伏等因素影响,设定各探测站测量误差的标准差值为 $1\text{ }\mu\text{s}$ 。

利用蒙特卡罗计算机模拟方法^[19]对江苏省闪电探测网进行定位误差的定量评估。区域内某处发生闪电时,闪电探测子站记录的实际闪电发生时间为闪电电磁波信号真实传播时间与测时误差之和。利用探测子站记录的时间计算得到的位置结果与实际雷击点存在一定的偏差,此偏差即为闪电定位误差。误差评估具体步骤如下:

- (1) 依据闪电探测网的站点布置,将经纬度坐标转换为直角坐标;
- (2) 对区域进行网格划分,分割成若干个网格,分别将各网格的中心点作为闪电发生位置,计算各网格中心点到每个探测站点的距离 d ;

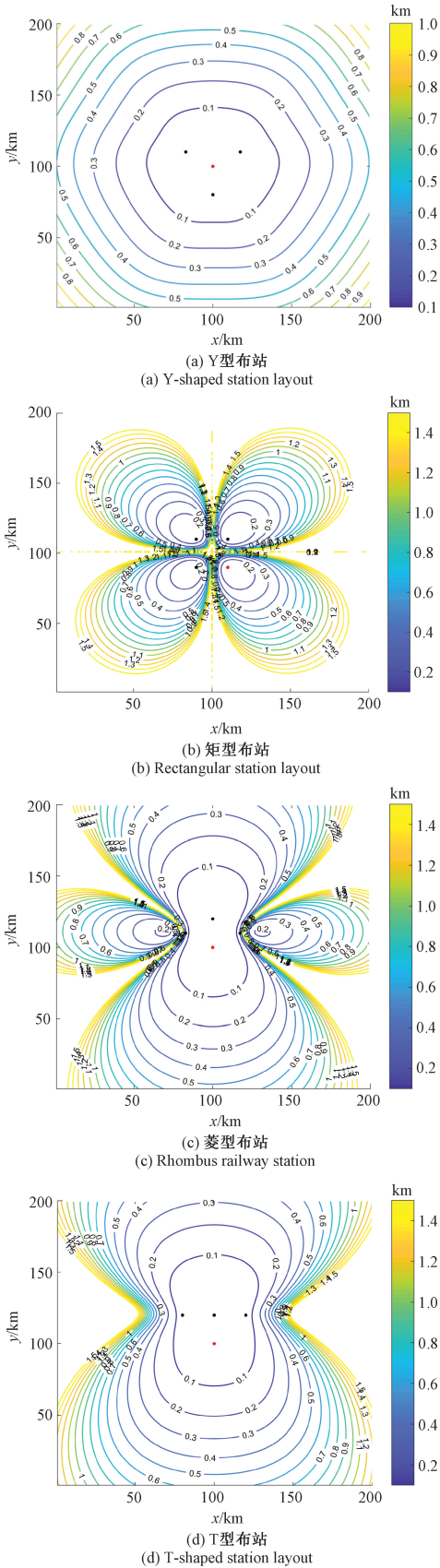


图 4 4 种不同布站方式的定位精度分析图

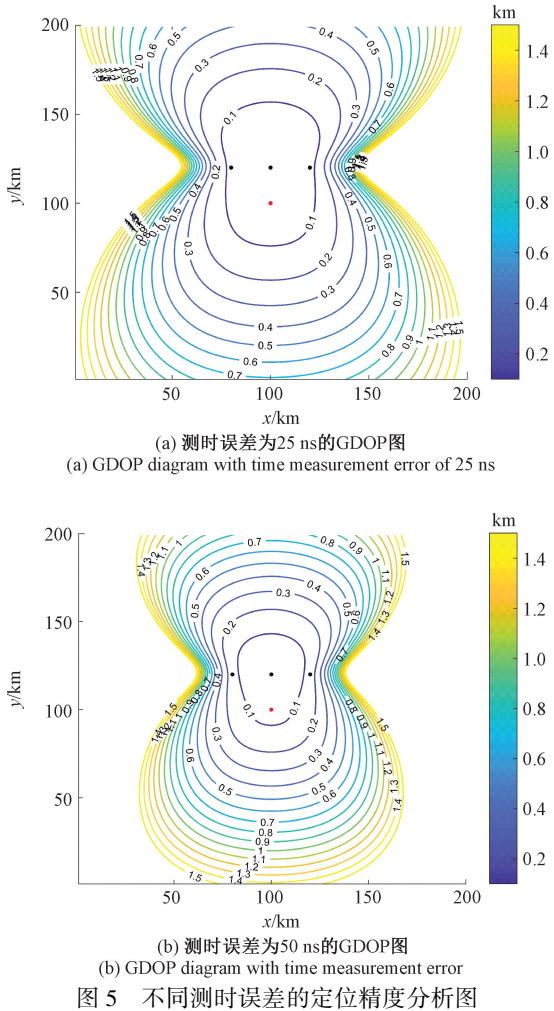


图 5 不同测时误差的定位精度分析图

Fig. 5 Positioning accuracy analysis chart of different time measurement errors

- (3) 将 d 除以光速, 计算各网格中心点处发生的闪电电磁波信号到达各站点的传播时间 t_i ;
- (4) 将步骤(3)计算的无误差时间 t 与随机测时误差相加, 该随机误差为均值为 0, 均方差为 $1\ \mu\text{s}$ 的正态分布随机误差;
- (5) 根据模拟的时间信息, 分别利用 TDOA 定位方法和本文提出的方法计算闪电的定位结果, 定位值与各网格中心点的距离差即为定位误差;
- (6) 重复步骤(3)~(5)共 100 次, 将以每个网格中心点作为闪电发生位置的 100 次闪电定位误差的平均值作为该点的定位误差;
- (7) 依据每个网格点的平均定位误差, 绘制所选区域的闪电定位误差分布图。

2) 站网布局

2012 年 7 月, 江苏省气象局将原有的 ADTD-1 型系统升级为 ADTD-2 型三维全闪定位系统^[20]。站点分布如图 6 所示, 黑色三角形表示探测站位置。以该闪电定

Fig. 4 Positioning accuracy analysis chart of four different modes

位网进行定位误差分析。

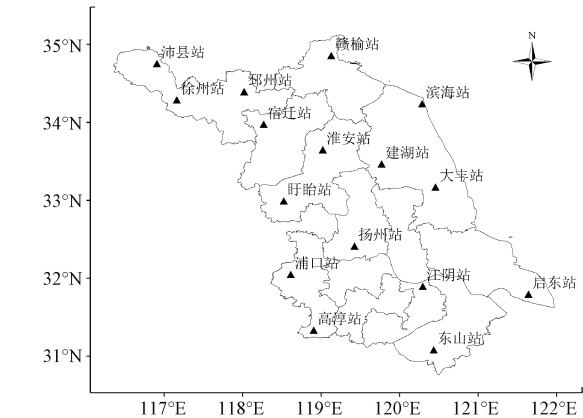


图 6 江苏省闪电探测网站点分布图

Fig. 6 Distribution map of lightning detection sites in Jiangsu province

系统共包括 16 个探测站(浦口、盱眙、建湖、宿迁、徐州、大丰、滨海、沛县、启东、东山、邳州、江阴、扬州、赣榆、淮安、高淳),系统覆盖了江苏省辖区。模拟区域经度范围为 116°E~122°E,纬度范围为 30.5°N~35.5°N。

3.3 结果分析

1) 区域误差分布图

TDOA 传统定位法与基于 K-means 的聚类方法在区域内的定位误差分布分别如图 7 (a)、(b)所示。横纵轴分别为经纬度,白色圆点代表江苏省闪电探测站,等高线数值代表定位误差,单位为 m。由图 7 可知,定位误差在探测网内部精度高,由内向外增加。对于不同位置的闪电辐射源,四站时差定位法的误差较大,在探测网内的定位误差最大达 20 km,中心区域定位误差为 5 km。TDOA 与 K-means 聚类联合定位方法使探测网内的定位误差减小,探测网内部误差最大为 8 km,中心区域误差减小为 2 km,整体定位精度提高。

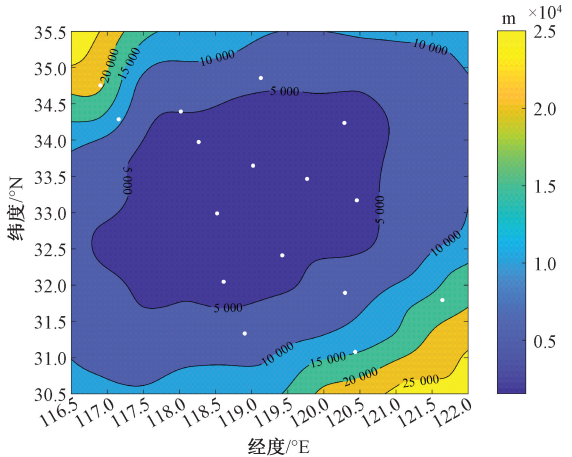
2) 测时误差对定位误差的影响

闪电探测网一般以均方根误差 (root mean square error, RMSE) 作为闪电定位的误差指标。RMSE 的计算公式为:

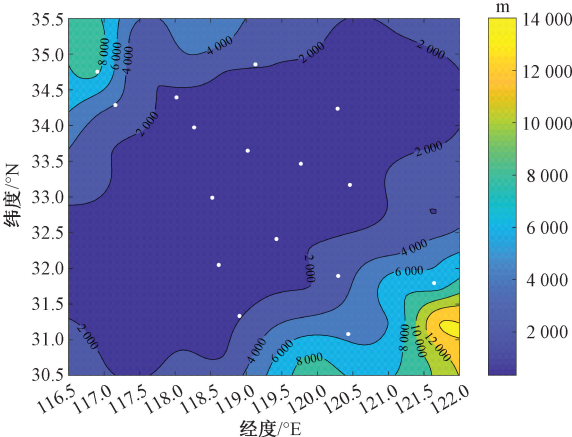
$$RMSE = \sqrt{E[(B - B')^2 + (L - L')^2]} \tag{15}$$

式中: (B, L) 为待定位闪电辐射源的真实坐标, (B', L') 为求得的闪电辐射源估计坐标。

图 8 为到达时间测时误差的标准差分别取值 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1 μs 时,传统 TDOA 定位法与本文定位算法 RMSE 曲线的仿真对比图。从仿真的结果图可以看出,随着 TDOA 测时误差标准差不断增加,两种方法的定位误差值都不断增大。但在所有取值区间内本文算法的 RMSE 值均低于 TDOA 传统定位方法。在测时误差的均



(a) TDOA方法定位误差分布图
(a) TDOA method positioning error distribution



(b) 改进方法定位误差分布图
(b) Location error distribution of improved method

图 7 闪电定位误差分布图

Fig. 7 Lightning location error distribution

方根误差较小时,两种方法的 RMSE 值相差不大,但随着测时误差标准差的增加,TDOA 定位方法受测时误差的影响,定位误差快速增大,本文方法定位误差受测时误差影响较小,定位误差缓慢增加。在实际环境中存在各种噪声,时差测量难免出现失真,而本文算法可以减小测时误差对定位结果的影响,因此也具有较好的可靠性。

3) 站网布置对定位误差的影响

设定测量误差的标准差为 1 μs,以江苏省区域内的 3 个目标位置点为例进行蒙特卡罗模拟仿真,求出闪电目标在不同位置时传统 TDOA 方法与基于 K-means 聚类方法的 RMSE 的值,如表 2 所示。

由表 2 可知,对于江苏省内 3 个不同位置的闪电发生位置,以位于纬度 31.25,经度 121.1,高程为 0 的闪电目标点为例,传统四站时差定位方法的均方根误差较大为 0.893 21 km,而使用本文算法后的均方根误差为 0.066 73 km。由定位误差影响因素仿真分析可知,闪电探测站布站方式对定位结果有较大的影响,但基于聚类

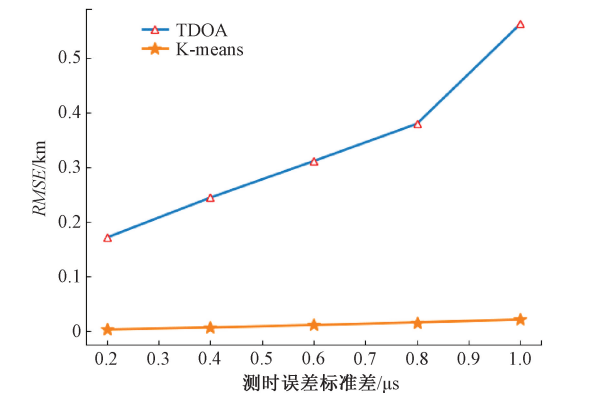


图 8 不同测时误差标准差与 RMSE 的关系

Fig. 8 Relationship between standard deviation of different time measurement errors and RMSE

表 2 不同闪电发生位置的均方根误差

Table 2 Root mean square error of different lightning locations

目标位置	四站时差定位/km	本文算法/km
(34. 25°N, 117. 5°E, 0)	0. 883 20	0. 044 26
(32. 25°N, 118. 7°E, 0)	0. 392 40	0. 011 08
(31. 25°N, 121. 1°E, 0)	0. 893 21	0. 066 73

的定位算法对于分布在不同位置的闪电目标,都能得到较精确的闪电定位结果,表明本算法可以减小站点布站方式对于闪电定位误差的影响。

4 结 论

采用蒙特卡罗模拟方法对同一区域进行闪电定位误差评估。相较于传统定位算法,具有以下 3 点优势:

1) 传统时差定位方法,易受闪电粗差数据的干扰不具备抗干扰能力,通过引入基于时差与 K-means 的定位方法可增强抗干扰能力,避免闪电定位错误或精度低的定位点对最终定位结果产生较大影响。

2) 以椭球模型作为闪电定位参考模型,评估江苏省区域定位误差。传统时差定位的方法在中心区域的定位误差为 5 km, TDOA 结合 K-means 算法将中心区域定位误差减小为 2 km。

3) 分析影响定位结果的测时误差和闪电定位网布局方式可知,基于 TDOA 和 K-means 的方法计算的均方根误差明显减小,以定位点 (31. 25°N, 121. 1°E, 0) 为例,该点的均方根误差由 0. 89 km 减小为 0. 07 km,两者结果相差较大。

论文中主要针对某一区域进行了定位实验,在后续的研究过程中,可以优化算法并针对更大范围的区域进行定位,进一步扩大应用场景。

参考文献

[1] 朱杰,行鸿彦,迎春. 闪电和降水关系动态可视化研究平台开发[J]. 电子测量与仪器学报,2019, 33(11): 65-72.

ZHU J, XING H Y, YING CH. Development of a dynamic visualization research platform for the relationship between lightning and precipitation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(11): 65-72.

[2] 马启明. 雷电监测原理与技术 [M]. 科学出版社, 2015.

MA Q M. Principle and Technology of Lightning Monitoring [M]. Science Publishing, 2015.

[3] 陈家宏,赵淳,谷山强,等. 我国电网雷电监测与防护技术现状及发展趋势 [J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3361-3375.

CHEN J H, ZHAO CH, GU SH Q, et al. Present status and development trend of lightning detection and protection [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3361-3375.

[4] 徐伟,夏志祥,行鸿彦. 基于集成经验模态分解和极端梯度提升的雷电预警方法 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 235-243.

XU W, XIA ZH X, XING H Y. Lightning warning method based on EEMD and XGBoost [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 235-243.

[5] 田彩霞,马启明,周晓,等. 江苏省三维闪电定位系统算法仿真 [J]. 武汉大学学报 (理学版), 2014, 60(2): 115-121.

TIAN C X, MA Q M, ZHOU X, et al. Algorithm simulation on 3-D lightning location system in Jiangsu province [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2014, 60(2): 115-121.

[6] 马方立,徐扬,徐鹏. 基于大地经纬度的二维 TDOA 无源定位 [J]. 通信学报, 2019, 40(5): 136-143.

MA F L, XU Y, XU P. 2D-TDOA passive location based on geodetic longitude and latitude [J]. Journal on Communications, 2019, 40(5): 136-143.

[7] CHEN Z, ZHANG Y, ZHENG D, et al. A method of three-dimensional location for LFEDA combining the time of arrival method and the time reversal technique [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(12): 6484-6500.

[8] 王涛,陈福贵,张翀,等. 基于 TDOA 的超长基线闪电定位算法 [J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1807-1813.

WANG T, CHEN F G, ZHANG CH, et al. Source locating algorithm for ultra-long baseline lightning detection system based on TDOA [J]. High Voltage Engineering,

- 2020, 46(5): 1807-1813.
- [9] MEHRANZAMIR K, ABDUL-MALEK Z, NABIPOUR AFROUZI H, et al. Artificial neural network application in an implemented lightning locating system[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2020, 210: 105437.
- [10] QIN Z, CHEN M, LYU F, et al. A GPU-based grid traverse algorithm for accelerating lightning geolocation process [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(2): 489-497.
- [11] LI F, SUN Z, LIU M, et al. A new hybrid algorithm to image lightning channels combining the time difference of arrival technique and electromagnetic time reversal technique[J]. Remote Sensing, 2021, 13(22): 4658.
- [12] 王彦辉, 闵应昌, 刘亚栋, 等. 闪电辐射源多脉冲匹配定位方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(27): 11490-11498.
- WANG Y H, MIN Y CH, LIU Y L, et al. Multiple pulses matching method for lightning radiation sources [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(27): 11490-11498.
- [13] FAN L, ZHOU C. 3D lightning location method based on range difference space projection [J]. Remote Sensing, 2022, 14(4): 1003.
- [14] 骆瑶莹, 卞宏志, 刘全桢, 等. 基于 L-M 算法和声波融合的 TDOA 雷电定位改进方法[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(3): 353-360.
- LUO Y Y, BIAN H ZH, LIU Q ZH, et al. An improved TDOA lightning location approach considering L-M algorithm and acoustics [J]. Medical Bulletin of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(3): 353-360.
- [15] 徐伟, 张灿灿, 施元, 等. 闪电电场传感与测量系统的研制[J]. 电子器件, 2019, 42(3): 767-773.
- XU W, ZHANG C C, SHI Y, et al. Development of lightning electric field sensing and measurement system [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2019, 42(3): 767-773.
- [16] 姚年鹏, 侯文豪, 张其林, 等. 地面电导率、地球曲率和电离层对远距离闪电定位的影响[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 31-38.
- YAO N P, HOU W H, ZHANG Q L, et al. Influences of ground conductivity, earth curvature and ionosphere on long-distance lightning locating [J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 31-38.
- [17] 徐雄, 林海军, 刘悠勇, 等. 融合 PCA 与自适应 K-Means 聚类的水电机组故障检测在线方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(3): 260-267.
- XU X, LIN H J, LIU Y Y, et al. On-line fault detection method of hydraulic turbine combining PCA and adaptive K-means clustering [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3): 260-267.
- [18] 张广元, 董德保, 宋佳军, 等. 基于 GDOP 的安徽省闪电定位网探测精度分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2022, 39(1): 36-40.
- ZHANG G Y, DONG D B, SONG J J, et al. Analysis on detection accuracy of lightning location network in Anhui based on GDOP [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2022, 39(1): 36-40.
- [19] 晏威, 肖纯, 吴细秀, 等. 基于雷电活动特征的 10 kV 配电线路雷击跳闸率计算[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 1118-1127.
- YAN W, XIAO CH, WU X X, et al. Calculation of lightning trip out rate of 10 kV distribution lines based on lightning activity characteristics [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1118-1127.
- [20] 冯民学, 周宇, 虞敏, 等. 2013 年江苏省 ADTD 闪电定位系统资料的评估分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(7): 79-84.
- FENG M X, ZHOU Y, YU M, et al. Evaluation of jiangsu ADTD lightning location system data in 2013 [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(7): 79-84.

作者简介



郑玉兰, 2019 年于皖江工学院获得学士学位, 现为南京信息工程大学硕士研究生, 主要研究方向为雷电监测与定位。

E-mail: 1508462257@qq.com

Zheng Yulan, received her B. Sc. degree from Wanjiang University of Technology in 2019. Now she is a master's student of Nanjing University of Information Engineering. Her main research direction is lightning monitoring and positioning.



徐伟 (通信作者), 2004 年、2007 年、2019 年于南京信息工程大学先后获得学士、硕士、博士学位, 现为南京信息工程大学正高级实验师、硕士生导师, 主要研究方向为气象观测方法及仪器。

E-mail: xw@nuist.edu.cn

Xu Wei (Corresponding author), received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree in Nanjing University of Information Engineering in 2004, 2007 and 2019. Now he is a senior experimenter and master's tutor of Nanjing University of Information Engineering. His main research direction is meteorological observation methods and instruments.