

万协成, 唐瑶, 薛明, 等. 基于定位方式的雷电落点误差分析与筛选方法研究[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 41-46; [WAN Xiecheng, TANG Yao, XUE Ming, et al. Research on Error Analysis and Screening Method of Lightning Drop Point Based on Location Method [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 41-46. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.008.]

基于定位方式的雷电落点误差分析与筛选方法研究*

万协成¹, 唐瑶¹, 薛明², 刘艳清³, 刘凤姣¹, 薛德锋⁴

(1. 湖南省气象灾害防御技术中心 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 湖南长沙 410007;
2. 靖州县气象局, 湖南靖州 4184003; 3. 湘乡市气象局, 湖南湘乡 411400; 4. 怀化市气象局, 湖南怀化 418000)

摘要: 雷电落点探测误差直接影响雷电灾害的定位确定。雷电定位系统监测到的雷电位置是根据定位方式原理确定的, 雷电定位方式包含时差定位和磁方向定位。不同的定位方式可产生不同的定位误差, 而雷电落点误差的存在可导致雷电预警、预报、风险区划评估出现错误。为减少由定位方式带来的落点误差, 提高雷电数据的可靠性和通用性, 根据雷电定位原理, 分析了不同定位方式可能出现的位置误差, 给出了雷电落点误差的计算模型和方法。结果表明: 时差定位精度高于磁方向定位; 四种定位方式按优劣排名依次是: 三站混合、四站算法、二站混合、二站振幅; 落点误差的产生主要来自于二站振幅; 二站混合有一定的误差, 但比二站振幅小; 在湖南, 雷电落点误差主要分布在衡阳—郴州、安化—张家界基延线及怀化的新晃、通道等地。并认为: 在湖南西部的保靖、西南部的靖州、南部的江华(或附近县)增置测站, 可大幅降低湖南雷电探测误差并提高所在地域的探测效率。

关键词: 雷电灾害; 雷电落点; 探测原理; 定位方式; 误差分析

中图分类号: X43; TU984; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)03-0041-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.008

雷电落点探测误差直接影响雷电灾害的定位确定、影响雷电的业务发展。雷电定位系统(LLS)采集到的地闪数据包括地闪时间、位置、强度、误差、定位方式等数据。这些数据与仪器的设计参数、相隔距离、安置密度等有直接关系。崔逊、顾宇丹、赵伟等^[1-7]对南京、上海、浙江等多套LLS资料进行了对比, 发现江苏电力部门和江苏气象部门两种不同LLS的观测, 二者随时间的变化基本一致, 但电力部门的闪电数据量远超气象部门, WWLLN探测到的闪电频次和闪电密度值比ADTD型小一个数量级; 上海雷暴过程中两套系统探测的地闪随时间变化趋势较为一致, 且与雷达回波有一定的匹配度, 但由于设备型号、探测技术和自身误差等方面的差异, 数据量上有差异; 浙江电力部门雷电监测的年平均频次稳定大于气象部门; ADTD型LLS在地闪空间分布、雷电流极性和强度的探测方面比LD-II型准确度更高, 且距离受灾点较近、误差较小; VLF/LF三维全闪电LLS探测的闪电频数约是ADTD的3倍多。刘凤姣^[8]提出雷电数据正确优选对雷电预警结果影响较大。曾庆锋、彭国平、代声发等^[9-12]就如何处理或筛选有差异的雷电数据作了研究, 探讨了相

应的方法。Rodger C. J等^[13-15]在21世纪初就对雷电定位及数据计算作过论述。《QX/T405-2017雷电灾害风险区划技术指南》规定剔除雷电流幅值为0~2 kA和200 kA以上的LLS资料^[16]; 《T/CMSA 0012—2019爆炸和火灾危险场所雷电监测预警技术要求》建议地闪回击宜选取大于等于5kA且小于等于300 kA, 并选取三个站点及以上定位方式^[17]。这些研究或结论表明: LLS数据存在差异, 要投入实际应用, 需进行误差计算或修订。为提高LLS数据在雷电特征分析、风险区划、风险评估、风险预警等项目中的可用性、可比性、风险指示性, 本文根据雷电定位原理, 对定位方式可能存在误差进行分析计算, 对湖南雷电误差的分布进行分析并给出相关建议。

1 资料处理方法

文中选用湖南省气象局闪电定位系统数据进行分析, 采用2 000大地坐标参数对雷电数据进行网格化处理。

* 收稿日期: 2021-01-03 修回日期: 2021-03-15

基金项目: 中国气象局预报预测核心业务发展专项(CMAHX20160211); 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2006CB200303)

第一作者简介: 万协成(1964-), 男, 汉族, 湖南常德人, 高级工程师, 主要从事雷电灾害防御研究. E-mail: 870476555@qq.com

2 定位原理简述

2008-2020年湖南省雷电数据给出的定位方式包含二站振幅、二站混合、三站混合、四站算法四种。其中,二站振幅对应MDF,二站混合对应IMPACT,三站混合、四站算法对应TOA。

2.1 磁定向法

磁定向法(MDF)是多站定位法中的一种。MDF是利用两个相互正交且垂直的环(平面分别指向东西向和南北向)测量来自近似垂直的闪电回击通道的辐射磁场,每个环上的感应电压与回击磁场的强度和入射方向有关,通过比较两个环上的感应电压,来确定闪电辐射源的方向。某次闪电被二个测站同时探测到,则二个测站磁方向的交点就是闪电落点。事实上,磁方向并不是一条线,而是存在一个误差角 θ (一般小于 1°),两个测站M、N以 θ 误差角方向与地面的交叉区域(图1中灰色部分)不是唯一的一个点,而是一个面,所以磁定向法普遍存在一定误差。

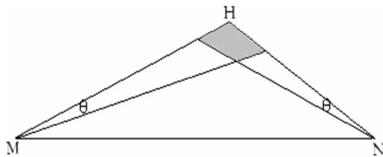


图1 磁定向法示意图

2.2 到达时间法

到达时间法(TOA)是利用两个信号到达接收机的时间差,计算出辐射源的位置。TOA要求有三个或以上接收机。如图2,设有三个接收机M、N、L布成一个接收网,且被同步在同一时间系统上,它以测量雷击甚低频(VLF)电磁脉冲到达不同测站点的时间差作为定位基础,精确计算闪电发生的地理位置。 t_0 时刻,在H处发生了一个雷击,该雷击所辐射的电磁脉冲信号至各站的时刻分别为 t_M 、 t_N 、 t_L ,则:

$$NH - MH = (t_N - t_M)C. \quad (1)$$

式中: C 为光速, $NH - MH$ 为M、N两站到雷击点的距离差;若测得 t_M 和 t_N ,则式(1)右边为一个常数。在数学中,把平面内两个定点M与N的距离差的绝对值等于一个常数的轨迹称为双曲线。因此,式(1)所表示的雷击点也必然位于以M、N为焦点,到两点距离差为恒定值($NH - MH$)的一条双曲线AB上。同样,对于M、L来说也可以通过测量 t_M 和 t_L 而得到另外一条相对应的双曲线CD。AB与CD的交点就是雷击发生的位置H。TOA是线与线的交点,理论上不存在误差。

2.3 混合定位法

时差测向混合闪电定位(IMPACT)是将MDF和TOA混合使用的一种方法。它的定位原理是:每个测站既探测回击发生的方位角,又探测回击辐射的电磁脉冲波形峰点到达的准确时间。当有二个探测站接收到数据时,采用一条时差双曲线

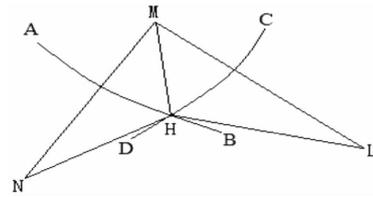


图2 时间到达法示意图

和两个测向量的混合算法计算位置,仍有一定误差出现;当有三个探测站接收到数据时,在非双解区域,采用时差算法,在双解区域,先采用时差算法得出双解,后利用测向数据剔除双解中的假解(图3);当有四个及四个以上探测站接收到数据时,会有3条以上双曲线和2个以上交点,采用时差最小二乘算法定位计算。三站或四站测得的雷电落点均为曲线的交点,误差较小。

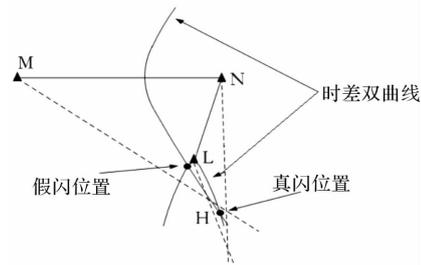


图3 三站混合法定位示意图

3 落点误差的计算

3.1 地表距离的计算

雷电落点误差的估算,需要计算地表二点间的距离。已知地球表面任两点 $E(\lambda_E, \Phi_E)$ 、 $F(\lambda_F, \Phi_F)$ 坐标,按2000大地坐标参数,用式(2)计算E、F二点间的距离。

$$d_{EF} = d_x \left((\lambda_E - \lambda_F)^2 \cos^2 \Phi_E + (\Phi_E - \Phi_F)^2 (1 - f)^2 \right)^{1/2}. \quad (2)$$

式中 $d_x = 2\pi R_x / 360$,为赤道上相距一个经度的距离; R_x 为地球赤道半径; f 为地球扁率。

3.2 磁定向误差计算

根据探测原理,绘制图4。

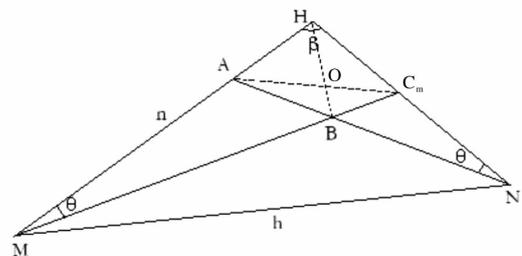


图4 磁定向误差计算示意图

在图4中,设 $H(\lambda_H, \Phi_H)$ 点为闪电落点, $M(\lambda_M, \Phi_M)$ 、 $N(\lambda_N, \Phi_N)$ 为二个探测站点,三点组成的 $\triangle HMN$ 对应的顶角设为 β 、 ζ 、 ω ,对边设为 h 、 m 、 n , θ 为误差角,据式(2),得:

$$h = d_x((\lambda_M - \lambda_N)^2 \cos^2 \Phi_M + (\Phi_M - \Phi_N)^2 (1-f)^2)^{1/2}; \quad (3)$$

$$m = d_x((\lambda_H - \lambda_N)^2 \cos^2 \Phi_H + (\Phi_H - \Phi_N)^2 (1-f)^2)^{1/2}; \quad (4)$$

$$n = d_x((\lambda_M - \lambda_H)^2 \cos^2 \Phi_M + (\Phi_M - \Phi_H)^2 (1-f)^2)^{1/2}; \quad (5)$$

$$\cos \beta = \frac{n^2 + m^2 - h^2}{2mn}; \quad (6)$$

$$\beta = \arccos \frac{n^2 + m^2 - h^2}{2mn}; \quad (7)$$

$$\text{在 } \triangle HMC \text{ 中, } HC = n \times \sin \theta / \sin(\beta + \theta); \quad (8)$$

$$\text{在 } \triangle HAN \text{ 中, } HA = m \times \sin \theta / \sin(\beta + \theta); \quad (9)$$

用余弦定理求取二对角线的长度:

$$AC^2 = HC^2 + HA^2 - 2HC \times HA \times \cos \beta; \quad (10)$$

$$AC = \frac{h \sin \theta}{\sin(\beta + \theta)}; \quad (11)$$

因误差角 θ 为 1° 或 0.5° , 四边形 $HABC$ 近似于平行四边形, 应用余弦定理计算角值:

$$HB^2 = HC^2 + HA^2 + 2HC \times HA \times \cos \beta; \quad (12)$$

$$HB = \frac{\sin \theta}{\sin(\beta + \theta)} (2m^2 + 2n^2 - h^2)^{1/2}; \quad (13)$$

选择 AC 和 HB 中的最大值作为二站振幅定位方式可能出现的雷电落点最大误差, 并用式(14)表示:

$$g_z = \frac{1}{2} \max(\text{abs}(AC), \text{abs}(HB)). \quad (14)$$

从式(11)和式(13)看出, 当测站位置及误差角确定之后, 误差值 g_z 的大小主要取决于雷电落点到二个测站的距离 m 、 n 和夹角 β 。雷电落点距测站越远, 误差越大; 落点与二测站形成的夹角越小, 误差越大。

$\beta \rightarrow 0^\circ$ 时, 雷电落点在二个测站的基线延长线(下称基延线)上或远离测站; $\beta \rightarrow 180^\circ$ 时, 雷电落点在二个测站的基线上, 二者均可产生较大误差。

3.3 混合误差计算

二站混合定位是一条时差双曲线和两个测向量的混合计算。图 5 中 HF 为时差双曲线, 按式(2)计算雷电落点到最近两个测站的距离 m 、 n , 如果 $m < n$, 则双曲线靠近在 N 站的一支上; 如果 $m > n$, 则双曲线靠近在 M 站的一支上; 如果 $m = n$, 则双曲线为过基线中点的垂直线。设 $m < n$, 过雷击 H 点作 HF 的切线与基线交于 G 。

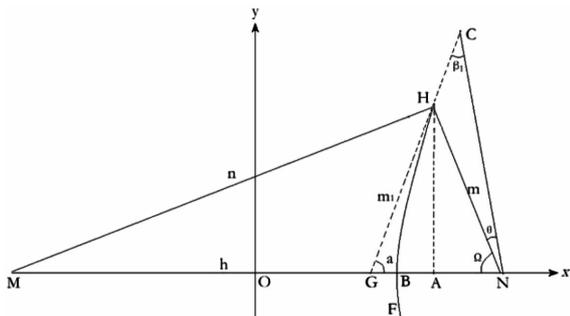


图 5 二站混合误差计算示意图

在以基线中点为原点的坐标中, 点 $H(x_H, y_H)$ 的坐标值为:

$$x_H = \frac{h}{2} - \frac{m^2 + h^2 - n^2}{2h}; \quad (15)$$

$$y_H = m \sin \Omega; \quad (16)$$

在 H 处切线方程:

$$\frac{x_H x}{a^2} - \frac{y_H y}{b^2} = 1; \quad (17)$$

式中:

$$a = \frac{n-m}{2}; \quad (18)$$

$$b^2 = \left(\frac{h}{2}\right)^2 - \left(\frac{n-m}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}(h^2 - (n-m)^2); \quad (19)$$

则 $G(x_G, y_G)$ 点的坐标值为:

$$y_G = 0, x_G = \frac{h(n-m)^2}{2(n^2 - m^2)}; \quad (20)$$

将 G 点视为虚拟测站, 依据磁定向误差计算方法计算出测站 M 与虚拟测站 G 间距 h_1 , 切线 HG 长度并设为 m_1 , 切线与 n 线的夹角并设 $\beta_1 + \theta$ 。

$$h_1 = \frac{h}{2} \left(1 - \frac{(n-m)^2}{(n^2 - m^2)}\right); \quad (21)$$

$$m_1 = \left(m^2 + h_1^2 - \frac{h_1}{h}(m^2 + h^2 - n^2)\right)^{1/2}; \quad (22)$$

$$\cos \Omega = \frac{m^2 + h^2 - n^2}{2hm}; \quad (23)$$

$$\Omega = \arccos \frac{m^2 + h^2 - n^2}{2hm}; \quad (24)$$

$$\beta_1 + \theta = \arccos \frac{m^2 + m_1^2 - h_1^2}{2mm_1}; \quad (25)$$

据正弦定理, 在 $\triangle HNC$ 中, HC 即为二站混合定位方式雷电落点误差:

$$g_h = HC = m \times \sin \theta / \sin \beta_1. \quad (26)$$

雷电落点 H 点靠近基线, $m \neq 0$, B 点位于基线内时, 切线与基线的夹角 $\alpha \rightarrow \pi/2$, 同时 $\beta_1 \rightarrow \pi/2$, 其基线误差为 $g_h = m \times \sin \theta$, 完全取决于 m 的长度。

H 点位于基延线上时, $n - m \cong h$, 双曲线趋近于基延线, 误差角射线与基延线重合, 误差较大或不能确定。在有效探测范围内, 因双曲线切线与基线的交点处于渐近线之间, 切线 HG 的长度小于长边 m , 即 $m_1 < m$; 最近测站与虚拟测站间的距离小于二个测站间的距离, 即 $h_1 < h$; 所以, $g_h < g_z$ 。

当 $\beta_1 \rightarrow 0^\circ$ 时, 双曲线、切线与基延线重合, $\sin \beta \rightarrow 0$, 误差较大或不能确定。

当 $\beta_1 \rightarrow 180^\circ$ 时, 雷电在基线上有一个点, 切线与基线垂直, 基线误差 $g_h = m \times \sin \theta$, 值较小。这也是二站混合定位方式比二站振幅定位方式最具优势的地方。

4 误差分布

4.1 大误差分布

通过计算雷电落点误差及到测站的距离, 取误差大于 100 km 的数据进行分析(表 1)。从数量看: 二站混合多出现在衡阳—郴州的东南延向, 出现 261 次, 占总数的 71.5%; 二站振幅多出现在长沙—岳阳的东北延向, 出现 2 003 次, 占总数

表1 2018年湖南雷电落点误差大于100 km以上数据统计

测站组合	二站混合				二站振幅			
	平均误差/km	最远距离/km	数量/次	占比/%	平均误差/km	最大距离/km	数量/次	占比/%
邵阳-永州				0.0	234	122	79	2.3
安化-张家界				0.0	103	200	1	0.0
衡阳-郴州	2 303	9 482	261	71.5	1 731	9 629	127	3.6
长沙-岳阳	286	7 002	62	17.0	482	6 928	2 003	57.2
张家界-常德	135	933	2	0.5	324	5 101	204	5.8
怀化-张家界	4 292	8 582	8	2.2	415	8 088	375	10.7
常德-岳阳	799	2 464	1	0.3	258	3 328	473	13.5
永州-郴州	778	7 559	16	4.4	1 247	11 395	101	2.9
永州-怀化	123	1 125	1	0.3	383	5 915	66	1.9
长沙-郴州	924	7 340	8	2.2	553	7 733	32	0.9
岳阳-张家界				0.0	339	3 193	15	0.4
岳阳-郴州	1 944	8 317	6	1.6	716	4 886	23	0.7
总计	16 700	9 482	365	100.0	497	11 395	3 499	100.0

的57.2%。从距离看：二站混合最远出现在衡阳—郴州的东南延向和怀化—张家界的西北延向，测距超过8 500 km，误差超过2 300 km；二站振幅最远出现在永州—郴州的南部延向和衡阳—郴州的东南延向，测距超过9 000 km，误差超过1 200 km。整体来看：在湖南东北方位省外区域大误差数据数量更多，而东南和南部方位大误差数据位置更远。超距离数据的存在，多由基延线数据造成，并非自然雷电，应予剔除。

4.2 磁定向误差分布

理论上，MDF、IMPACT 分别用二个角的交点、角与线的交点确定雷电位置，存在误差；TOA 以线与线的交点确定雷电位置，不存在误差。

统计2018年1-12月湖南LLS所测数据(下同)，用二站振幅数据和2 000大地坐标参数，以10 km×10 km为网格大小对雷电误差值实行网格化，以误差相距2 km作等值线(图6)。

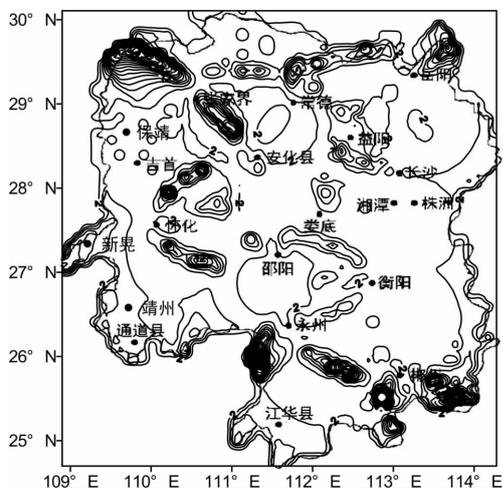


图6 湖南磁定向雷电落点误差分布图

有三种情况产生较大误差：一是雷电落点在距离测站较远的省际边界地带，主要出现在怀化西部的新晃、南部的通道、永州南部的江华等离测站较远区域，其误差均在3 km以上，以新晃最大达12

km；二是雷电落点在相邻测站的基延线上，如安化—张家界、永州—郴州、衡阳—永州、常德—岳阳等均有明显基延线误差出现，误差值均大于10 km，个别达50 km以上；三是雷电落点在二个相邻测站的基线附近，主要出现在常德—岳阳、安化—张家界、永州—郴州之间，误差多为10~30 km。

4.3 混合误差分布

用二站混合数据以误差相距2 km作等值线(图7)。二站混合误差明显比二站振幅小，多数误差小于2 km。测站周边100 km范围误差值多小于1 km。在测站基线附近，误差值小于2 km，较大误差值出现在离基线20~50 km的两侧或更远区域。误差较大的区域主要为安化—张家界基延线上，最大误差达14.5 km。

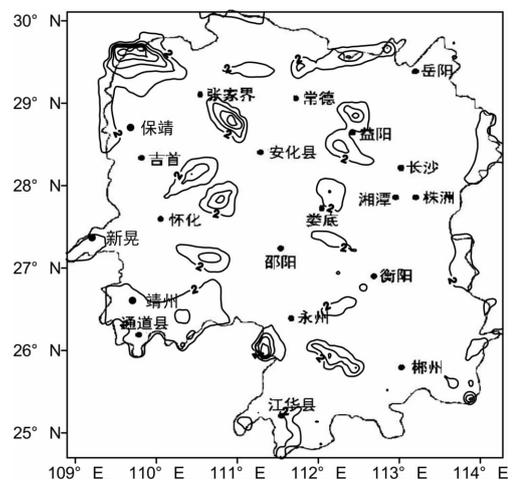


图7 湖南IMPACT雷电落点误差分布图

5 二站误差数据筛选

5.1 测距与雷电的关系

取2018年湖南省内10站二站定位所测数据，以每个测站为中心计算所有雷电到最近测站的距离，以2 km为步长统计距测站周边圆圈的年雷电

密度和雷电强度(图 8)。雷电平均密度 0.8 次/km², 在距测站 2 km 内有个高值, 随后急速下降至 6 km 处趋于平稳下降, 至 50 km 始雷电密度小于 0.1 次/km², 60 km 始雷电密度小于 0.05 次/km², 72km 后雷电密度降至 0.02 次/km²。这说明离测站越远, 探测效率越低, 探测到的雷电数据越少。雷电强度有三个距离段, 0 ~ 80 km 为稳定略有上升距离段, 80 ~ 130 km 为快速上升距离段, 130 ~ 200 km 为不稳定上升距离段。整体看: 密度、强度曲线整体呈现负相关趋势, 离最近测站超过 80 km 时, 雷电密度、强度的稳定性均快速降低, 数据不太适合作为分析资料。

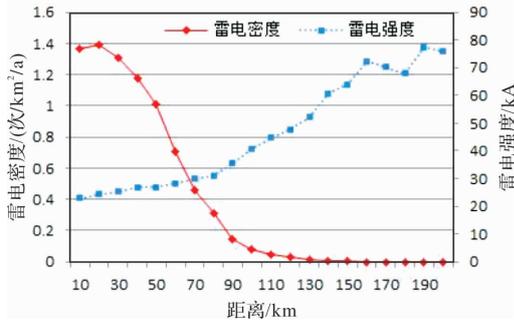


图 8 2018 年湖南二站定位方式雷电密度、强度随测站距离分布图

5.2 筛选节点确定

根据误差计算公式, 误差的大小主要取决于雷电落点与最近二测站形成的夹角及距离, 而雷电落点与测站布点及测站间距离密切相关。统计省内二站振幅与二站混合数据, 计算雷电落点所产生的距离误差, 分析误差与雷电落点与最近测站距离的关系(图 9)。雷电落点误差与雷电落点距最近测站的距离, 其总体趋势成正比。二站振幅平均误差 3.9 km, 二站混合平均 1.4 km, 二站振幅是二站混合误差的 2.8 倍。在离测站 20 km 内, 混合定位产生的误差很小, 不到 300 m; 但二站振幅在 2 km 以上误差就超过 400 m, 在 6 km 时就达到 2 km。二站振幅数据在在 60 ~ 70 km 有直角误差小峰值波动出现, 主要因雷电落点到二站距离均较大引起。若以 3 km 为误差期望值, 则二站混合数据在 160 km 内可用, 而二站振幅数据仅在 15 km 内可用。若期望值定为 4 km, 则二站混合数据全部可用, 二站振幅 60 km 内可用, 60 km 外数据不可用。文中 MDF 误差选用最大值, 出现的可能性较小, 所以误差期望值可定为网格边长的二倍。

6 建议

(1) 图形绘制建议。为了探索二站数据的使用性, 在空间图形绘制时可以使用关注插值半径的克里金插值法(Kriging), 优化克里金插值方法的运行效率。通过自定义的插值参数、变异函数模型和插值半径, 使雷电数据区划模型的选取更为自由和精确。在此基础上, 利用 ArcGIS 中的自然断点法(Jenks), 增加采样点数这样的参数, 提高

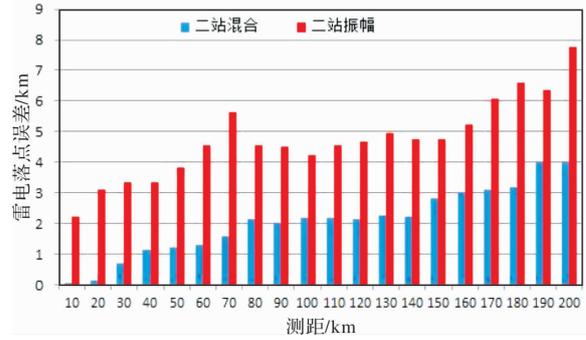


图 9 误差与测距关系示意图

分级和分类间隔识别的效率。

(2) 湖南 LLS 站点的布点建议。目前, 湖南省气象局运行的闪电定位系统 LLS(型号 ADTD)共有 10 个探测站, 分别位于长沙、常德、岳阳、张家界、怀化、永州、邵阳、衡阳、郴州 9 个市级气象局和安化县气象局。测站相距在 80 ~ 200 km 之间, 最小为邵阳到永州相距 76 km, 最大为怀化到永州为 207 km。根据上述分析, 落点误差较大区域在湖南西北部的桑植、西南部的通道和南部的江华及附近县区, 而这些地域也正是雷电探测效率的低值区。根据文中误差计算原理和方法, 在这些区域的适当位置(如: 保靖、靖州、江华)增设测站, 则可有效降低雷电落点误差并提高探测效率。

7 结论

依据定位原理, 通过分析雷电落点误差产生的原因, 给出了雷电误差计算的数学模型和方法, 通过对湖南闪电数据的分析比较, 得出如下结论。

(1) LLS 监测到的雷电数据存在误差, 主要产生于二站振幅和二站混合定位方式; 三、四站定位方式误差较小。

(2) 落点误差形成的原因主要是定位方式和测站分布。

(3) 在有效探测范围内, 二站振幅误差高于二站混合误差, 前者为后者的 2.8 倍。

(4) 二站振幅和二站混合的共同点是均存在基线误差。不同点是二站振幅存在基线误差, 数值较大或不确定; 而二站混合不存在基线误差, 值很小且可算。

(5) 湖南雷电落点误差较大区域在湖南西北部的桑植、西南部的通道和南部的江华及附近县区, 建议解决的办法是在这些区域的适当位置(如: 保靖、靖州、江永)增设测站。

(6) 研究方法可应用于雷电风险区划、评估、预警、站点布置等方面, 有利于预警预报精度的提高和雷电风险指示性的提升。

参考文献:

[1] 崔逊, 高金阁, 樊荣. WWLLN 与江苏省 ADTD 闪电定位系统数据的对比分析[J]. 大气科学学报, 2016(2): 270

- 279.
- [2] 顾宇丹, 虞敏林, 文旻, 等. 上海市两套闪电定位系统探测能力对比分析[J]. 气象与环境科学, 2018(3): 126-131.
- [3] 赵伟, 姜瑜君, 童杭伟, 等. 浙江省两套闪电定位系统闪电数据对比[J]. 应用气象学报, 2015(3): 354-363.
- [4] 吴剑强, 许洪泽, 赵国萍, 等. 闪电定位系统异常前后资料的对比分析及其t检验[J]. 气象与环境科学, 2011(2): 69-74.
- [5] 陈裕强, 林伟旺, 谢汉全, 等. 两套闪电定位系统对揭阳市雷电监测结果的对比分析[J]. 气象研究与应用, 2009(1): 73-75.
- [6] 刘岩, 李征, 程向阳, 等. LD-II和ADTD型闪电定位资料的对比分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2015(4): 380-384.
- [7] 孙明, 杨仲江, 钟颖颖, 等. 两种闪电资料的对比分析[J]. 电瓷避雷器, 2014(6): 109-104.
- [8] 刘凤姣, 薛明, 薛德锋, 等. 基于闪电数据的雷电风险优化研究模型与应用[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 48-53.
- [9] 曾庆锋, 张其林, 赖鑫, 等. 深圳市闪电定位资料误差分析及其优化[J]. 气象科技, 2015(3): 530-537.
- [10] 彭国平. 基于闪电定位数据的地闪密度筛选[J]. 气象科技, 2017(5): 876-883.
- [11] 代声发, 黄启俊, 马启明. 基于粒子群算法的闪电定位网优化布站[J]. 武汉大学学报(理学版), 2017, 63(6): 506-512.
- [12] 刘凤姣, 孟志强, 杨加艳, 等. 雷灾防御中基于多种土壤电阻率测量方法的土壤结构反演研究[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 31-35.
- [13] RODGER C J, BRUNDELL J B, DOWDEN R L. Location accuracy of VLF world-wide lightning location (WWLL) network: post-algorithm upgrade[J]. *Annales Geophysicae*, 2005, 152: 277-290.
- [14] RODGER C J, BRUNDELL J. B, DOWDEN R L, Thomson N R. Location accuracy of long distance VLF lightning location network[J]. *Annales Geophysicae*, 2004, 145: 747-758.
- [15] RICHARD L Dowden, JAMES B Brundell, CRAIG J Rodger. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002(7): 817-830.
- [16] 程向阳, 陶寅, 邹建军, 等. QX/T 405-2017 雷电灾害风险区划技术指南[S]. 北京: 气象出版社, 2017.
- [17] 王学良, 秦建新, 余蓉, 等. T/CMSA0012-2019 爆炸和火灾危险场所雷电监测预警技术要求[S]. 北京: 气象出版社, 2019.

Research on Error Analysis and Screening Method of Lightning Drop Point Based on Location Method

WAN Xiecheng¹, TANG Yao¹, XUE Ming², LIU Yanqing³, LIU Fengjiao¹ and XUE Defeng⁴

(1. *Meteorological Disaster Prevention Technology Center of Hunan Province, Hunan Provincial Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Changsha 410007, China;*

2. *Jingzhou Meteorological Bureau, Huaihua 418400, China;* 3. *Xiangxiang Meteorological Bureau, Xiangtan 411100, China;* 4. *Huaihua Meteorological Bureau, Huaihua 418000, China*)

Abstract: The lightning location detected by the lightning location system is determined according to the principle of the location mode. The lightning location mode includes the time difference location and magnetic orientation location. Different positioning modes can produce different positioning errors. In order to reduce the distribution error caused by the positioning method and improve the reliability and generality of lightning data, according to the lightning positioning principle, the possible position error of different positioning methods is analyzed, and the calculation model and method of lightning drop point error are given. The results show that the positioning accuracy of time difference is higher than that of magnetic orientation. The four positioning methods are ranked according to their advantages and disadvantages in order: three-station mixing, four-station algorithm, two-station mixing and two-station amplitude; The data of the two stations account for a large proportion and the error is large, so the error correction must be made to the data of the two stations. The fall-point error mainly comes from the amplitude of the two stations. There is some error in the two-station mixing, but the amplitude is smaller than that of the two-station mixing. Within the effective detection range, the amplitude error of the two stations is higher than the mixing error of the two stations, and the former is 2.8 times of the latter. The common point of the two stations amplitude and mixing is the existence of base line error. The amplitude of the two stations has baseline error, and the value is large or uncertain. The amplitude of the two stations has baseline error, and the value is large or uncertain. In Hunan, the lightning drop point errors are mainly distributed in Hengyang-Chenzhou, Jianghua-Zhangjiajie jiyan line and Huaihua xinhuang, channel and other places. It is concluded that the addition of measuring stations in Baojing in the west of Hunan, Jingzhou in the southwest and Jiangyong in the south (or nearby counties) can greatly reduce the error of lightning detection in Hunan and improve the detection efficiency in the region. This error correction method can be applied to lightning risk zoning, assessment, early warning, site layout, etc. It is beneficial to improve the accuracy of early warning and forecast and the indicator of lightning risk.

Key words: lightning disaster; lightning location; detection principle; positioning method; error analysis