曾颖婷,顾佳莹,张若筠,等.2024.基于不同测站布局的闪电定位误差分析[J].暴雨灾害,43(6):741-748. ZENG Yingting, GU Jiaying, ZHANG Ruoyun, et al. 2024. Analysis of lightning localization errors based on different station layouts [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6): 741-748 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-216

基于不同测站布局的闪电定位误差分析

曾颖婷[1,2],顾佳莹[3],张若筠[1],杨庆波[4],曾金全[5]

(1. 福建省气象服务中心,福州 350007;2.中国气象局雷电重点开放实验室,北京 100081;3. 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/气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,南京 210044; 4. 福建省德化九仙山气象站,德化 362500;5. 福建省气象灾害防御技术中心,福州 350007)

摘　要:为了探讨闪电探测站布局对闪电定位精度的影响,基于福建省九仙山自然闪电观测试验基地的磁场波形观测资料,选取探测站网内外不同方位和不同距离的10次地闪回击,以10站(或9站)同步的定位结果为基准,利用到达时间差法(Time of Arrival, TOA),对比分析了任意5—8站不同测站组合情况下的定位结果差异性,并探讨定位差异性的可能原因。结果表明:闪电定位与测站数量和测站布局密切相关,同样的测站数量,不同测站布局的定位结果存在较大差异,而随着测站数量的增加,由测站布局不同所带来的差异性逐渐减小。相同的测站数量和布局,对不同方位距离闪电的定位偏差也存在明显不同。在测站网外围区域的闪电定位偏差明显大于网内,网外闪电定位结果往往呈现"带状分布",距离测站网越远,这种"带状分布"的偏差分布越明显,这是由于双曲线交汇形成的狭长空间区域所致。

关键词:闪电定位;定位精度;测站组合;时差定位

中图法分类号: P412.4　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2022-216

Analysis of lightning localization errors based on different station layouts

ZENG Yingting[1,2], GU Jiaying[3], ZHANG Ruoyun[1], YANG Qinbo[4], ZENG Jinquan[5]

(1. *Fujian Meteorological Service Center, Fuzhou* 350007; 2.*Key Laboratory of Lightning*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081; 3. *Nanjing University of Information Science and Technology/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster/ Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/ Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing* 210044; 4. *Fujian Jiuxianshan Meteorological Station, Dehua* 362500; 5. *Fujian Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Fuzhou* 350007)

Abstract: To explore the influence of the lightning detection station layout on lightning location accuracy, the magnetic field waveform observation data from the natural lightning observation test base at Jiuxian Mountain in Fujian Province were used and ten return strokes of cloud-to-ground flashes from different orientations and distances both inside and outside of the detection network were selected. Using the time of arrival (TOA) method and the positioning results by 10 (or 9) stations as the references, we compared and analyzed the discrepancies of location results under different combinations of 5 to 8 stations. The possible reasons for the discrepancies in the location results were also explored. The results show that lightning location is closely related to the number of stations and the layout of the stations. For the same number of stations, large differences in the location results can be found for different station layouts, but with the increase in the number of stations, the differences caused by different station layouts gradually decrease. For the location with the same number and layout of stations, there are also significant differences in the localization deviations for lightning from different orientations and distances. The deviation of lightning localization outside of the network is significantly larger than that inside the network. The positions of lightning outside the network often show a "band-like distribution", and the farther the lightning is away from the network, the more obvious the deviation of this "band-like distribution" is. This is due to the narrow spatial region formed by the intersection of hyperbolas.

Key words: lightning location; location accuracy; station configuration; time of arrival

收稿日期: 2022-10-31;**定稿日期:**2024-01-24

资助项目: 国家电网公司总部科技项目(5500-202221143A-1-1-ZN);中国气象局雷电重点开放实验室开放课题(2023KELL-B007)

第一作者: 曾颖婷,主要从事气候变化影响评估研究。E-mail: 113236039@qq.com

通信作者: 曾金全,主要从事雷电监测预警及应用技术研究。E-mail: 58803572@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

引 言

闪电是一种发生在大气中的自然放电现象，其伴随的强电磁辐射和高电压易造成财产损失和人员伤亡等重大灾害(曾金全等，2016，2017；卢舟等，2018；王志斌等，2022)，尤其是微电子技术的普遍应用后，闪电造成的损失愈加严重(刘洋等，2014；蔡永祥等，2022；鞠晓雨等，2022)。为了有效避免或减少雷电灾害带来的损失，提升闪电的精准监测能力十分重要。目前气象部门主要通过闪电定位站网的建设开展地基闪电监测预警业务，然而由于监测设备差异、安装环境不同以及覆盖范围所限，尤其是站网基线、布局形式和山地起伏变化等因素，都可能对闪电监测定位精度造成极大的影响。因此，深入研究闪电监测技术，优化站网影响要素，不断提高闪电定位准确性，对提升雷电预警、灾害风险评估及调查鉴定等防灾减灾能力尤为重要。

随着科学技术不断发展，尤其是遥感技术、高速大容量数据采集技术及高精度GPS时钟授时技术的快速发展，在闪电光亮度、电磁场、声波等方面的探测研究实现了不断的突破 (郄秀书等，2013；曾庆锋等，2018；余蓉等，2021)。基于这些技术发展，许多国内外研究团队在不同区域或平台建立了多种覆盖不同范围的地基闪电探测系统(Dowden et al.，2008；Cummins et al.，2009；Said et al.，2010；Wang et al.，2016)，通过多站组网的方式，实现对地闪回击的探测。同时，为了提高闪电探测效率和精准度，加强对闪电的有效监测预警，减少或避免雷电灾害带来的损失，国内外学者在闪电定位测站布局及相关技术研究方面做了大量工作。刘邕等(2019)通过建立闪电定位系统的定位误差仿真模型，探讨了测站数量、基线长度等因素对定位精度的影响；卢舟等(2018)采用几何精度因子对比了几种不同组网方式对闪电定位精度的影响；张广元等(2022)利用Matlab进行精度仿真，探讨了中心站位置、基线长度等因素对闪电定位精度的影响；梁华等(2007)通过理论仿真对闪电定位误差进行了评估，为闪电定位测站的组网布局提供了选址依据。

然而，上述研究多是利用计算机仿真算法，采用虚拟参量和模拟环境的方式进行的评估分析，研究结果的适用性存在一定的局限性。雷电电磁波在近地面传播过程中受土壤色散、土壤电导率以及高低起伏的不规则地形等因素影响较大(邹斌等，2021)，特别是福建山区地形复杂，实际定位结果往往易受探测设备、下垫面等环境影响。根据真实环境及自然闪电个例，有针对性地研究测站布局和测站数量对定位精度的影响很有必要。因此，本文利用福建省九仙山自然闪电观测试验基地建立的10站同步三维闪电监测网，选取位于测站网内和网外围的10次不同方位、不同距离范围的地闪回击，定量分析测站的不同数量和不同组合对地闪回击定位结果的差异，以期对闪电探测业务站网的优化布局提供决策参考。

1 资料与方法

1.1 闪电数据来源

本文利用的闪电波形观测数据来源于九仙山自然闪电观测试验基地的多站同步磁场波形数据。该系统由10个测站的磁场探测站组成，分别为延平站、三明站、仙游站、大田站、九仙山站、漳平站、安溪站、德化站、尤溪站、福州站，整个探测网覆盖区域的东西约为200 km、南北约为150 km。每个站配备两个正交磁场天线、一个信号采集系统和一个GPS接收机，所有站均由GPS同步，精度为50 ns，具体分布如图1所示。基于多站同步的闪电瞬态磁场变化波形，采用时间差(Time of Arrival，TOA)定位技术，可以实现对闪电辐射源的定位。

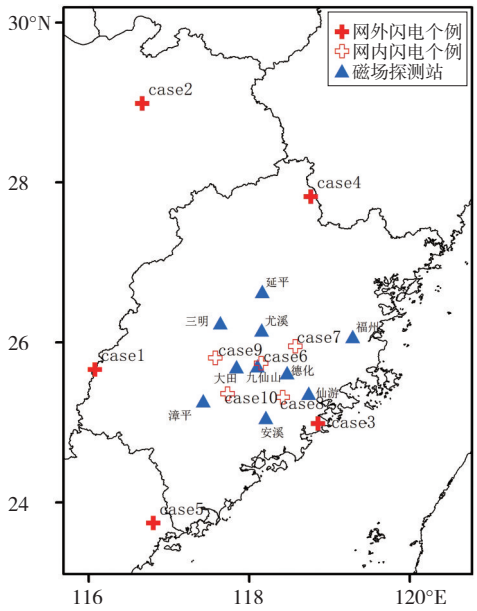


图1 九仙山自然闪电观测试验基地测站及10个地闪回击位置示意图

Fig. 1 The distribution of the lightning detection network at the natural lightning observation test base at Jiuxian Mountain and the locations of ten lightning return strokes analyzed in this study

为了分析测站数量和配置对网内外闪电定位质量的影响，本文分别选取了探测网内、外各5个不同方位、不同距离的地闪回击个例，具体位置如图1所示，个例1—10的发生时间分别为2021年8月28日18点57分51秒(北京时，下同)、2021年8月27日10时06分19秒、2021年7月30日03时33分52秒、2021年8月

27日17日00时17分13秒、2021年7月29日18时58分45秒、2022年8月7日12时14分37秒、2022年8月7日13时27分3秒、2022年8月7日12时40分56秒、2022年8月7日13时46分54秒、2022年8月7日12时29分17秒。

1.2 闪电定位算法

本研究采用时差法(TOA)进行闪电定位，闪电激发的磁场脉冲信号到达不同测站的时间是不同的，利用电磁信号到达不同测站的时间差进行闪电三维辐射源定位(万协成等，2021)，以获得闪电发生的时间、位置和强度等信息。闪电脉冲信号到达每个测站满足如下方程

$$t_i = t + \frac{1}{c}\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \tag{1}$$

式中，(x, y, z, t)为闪电发生的位置和时间，(x_i, y_i, z_i)为第i个观测站的地理位置，t_i为信号到达第i个观测点的时间(i=1,2,…,N，其中N为观测点数量)，c为光速。求解上述方程，首先需要获得同源脉冲到达不同测站的时间差，目前求解同源脉冲到达不同测站时间差的方法主要有互相关法、逐峰法和10%阈值法。互相关法是对各测站接收到的同一个脉冲信号做互相关计算，得出互相关函数在时间窗口内取得最大值时两个信号脉冲的时间差。而逐峰法和10%阈值法是以脉冲峰值和峰值的10%到达时刻分别作为信号到达的判据。

由于闪电电磁脉冲信号到达不同测站的时间不同，则可以确定闪电位于一支双曲面上(焦点分别为两个测站)。以此类推，当有三个及以上测站收到闪电电磁脉冲信号时，则至少有两支双曲面交汇在一起，而真实闪电位置处于双曲面交汇的三维空间区域内。具体求解方法如下：(1) 利用从5个及以上观测子站获取的t_i可以得到5个及以上如式(1)的方程，得到4个及以上的达到时间差，组成非线性方程组，再使用Chan算法(Chan et al.，1994)产生方程的初解；(2) 应用Levenberg-Marquardt方法(Wang et al.，2016)最小化拟合优度参数χ^2获得闪电位置的最优解。求解得到的闪电脉冲辐射源发生位置和时间(x, y, z, t)应当满足各观测子站间的到达时间差$\Delta t_i^{\mathrm{obs}}$测量值和方程(1)给出的到达时间差$\Delta t_i^{\mathrm{fit}}$之间差异最小。

$$\chi^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N-1}\left(\Delta t_j^{\mathrm{fit}} - \Delta t_j^{\mathrm{obs}}\right)^2}{(N-4)\sigma^2} \tag{2}$$

其中，N–4为自由度，表示冗余观测子站数；σ为各观测子站的时间测量精度，根据实验定标及实际观测结果，本探测网站的时间测量精度为50 ns。

2 定位结果分析

为了分析参与站的数量和配置对闪电定位结果的影响，选取了10个不同方向的闪电回击个例，回击点位置以同步探测到闪电的测站数最多的同步波形的定位结果作为基准参考点，对比分析不同测站数量和不同布局组合的定位结果与参考点的差异，两者定位点之间的偏差距离即为定位误差。在评估不同测站组合的定位结果时，为了便于表述和说明，本文将双曲面交汇的区域投影到平面，对定位效果进行分析。

2.1 落点定位分析

文中10个闪电回击个例，有4个(个例1、3、4、5)被10个测站接收到，其余6次闪电回击被9个测站同步接收。利用逐峰法获得闪电信号到达每个测站的绝对时间，以其中一个测站为中心站，则会形成9支(或8支)双曲线交汇，如图2所示。由图可知，其双曲线交汇区域均较为紧密，基本上交于一点(如图中的红色符号×)，且观测网内闪电的双曲线交汇较网外个例相交的更为明显。这说明10个(或9个)同步测站的定位结果相对可靠，将该结果作为相应闪电个例的参考位置。

2.2 不同测站数量和配置下的定位误差分析

为了研究不同测站组合对闪电定位结果的影响，以10个(或9个)测站的定位结果为基准，分析研究了5~8站的不同测站数量和不同组合布局的定位差异性。考虑不同数量测站下的所有组合情况，其中，10个测站中任意8个测站的组合共45组，10个测站中任意7个测站的组合120组；10个测站中任意6个测站的组合210组；10个测站中任意5个测站的组合252组。

图3给出各个地闪回击的5~8站的所有测站组合生成的定位点的空间分布。可以看出，位于网内的5个闪电(个例5—10)的各组合定位结果较为接近，所有定位趋于一个点。而网外闪电的定位偏差明显大于网内，不同测站组合得到的定位结果呈现“带状分布”特征，并且与探测网的距离越远，这种特征越明显，其中个例2距离探测网最远，它的定位偏差最大，呈现出的“带状”区域范围最大；个例3距离探测网较近，呈现出的“带状”区域范围也相对较小。说明闪电发生在探测网外围时，距离探测网越远，闪电定位的偏差受测站数量及组合的影响越明显。

进一步对不同测站数量组合的所有定位结果与其参考位置的定位偏差进行统计分析，将发生在网外的个例(1—5)偏差小于0.5 km、1 km、3 km和5 km的占比以及发生在网内的闪电(个例5—10)偏差小于0.1 km、

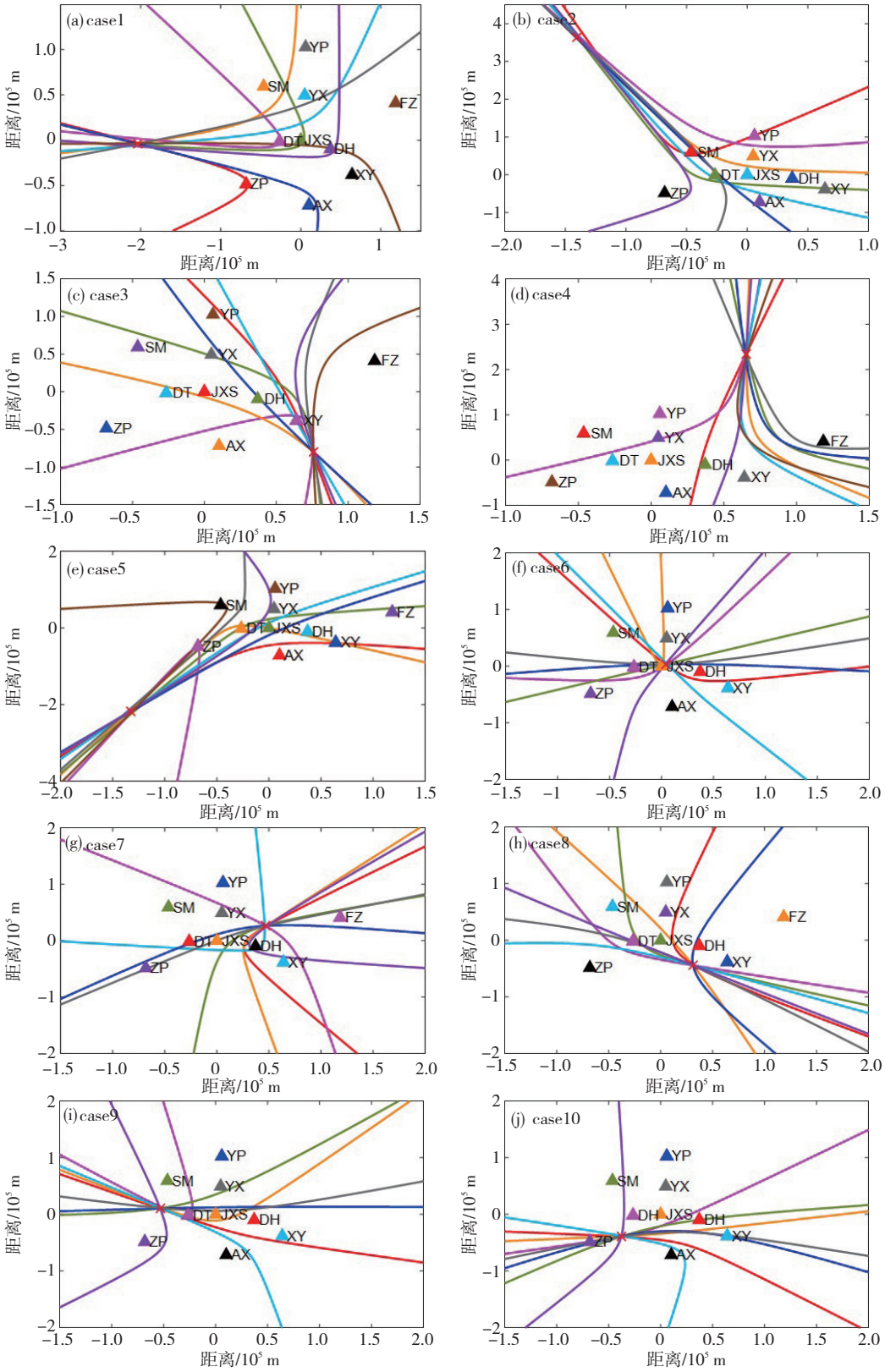


图2 利用时间差定位得到的个例1—10 (a—j)的参考位置 (红色加号“×”为定出的闪电位置,不同颜色的双曲线对应的是到达相应颜色站点与中心站(▲)的时间差,测站位置分别为延平–YP,三明–SM,尤溪–YX,DT–大田,JXS–九仙山,ZP–漳平,AX–安溪,DH–德化,XY–仙游,FZ–福州,下同)

Fig.2 For the 10 reference locations obtained by using the time difference, the "×" sign represents the location of the lightning, and (a–j) corresponds to the result of case 1 to case 10 (The hyperbolas of different colors correspond to the arrival time differences between the center station (▲) and the station of same color as the hyperbola, station locations YP–Yanping, SM–Sanming, YX–Youxi, DT–Datian, JXS–Jiuxianshan, ZP–Zhangping, AX–Anxi, DH–Dehua, XY–Xianyou, FZ–Fuzhou)

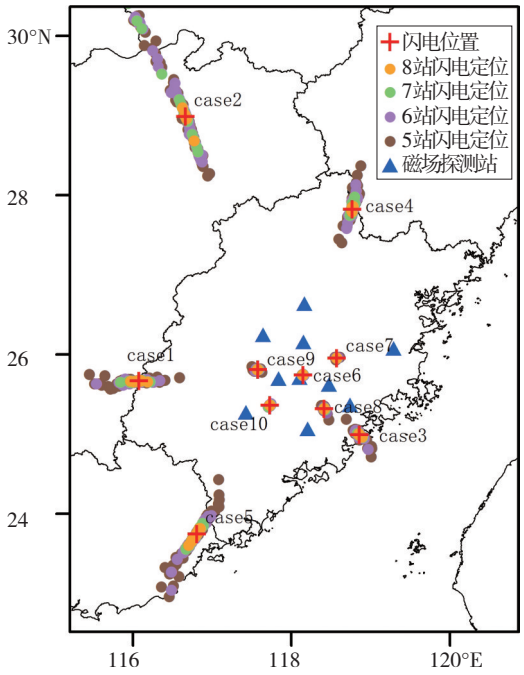


图3 不同测站布局定位出的闪电位置的分布特征
(不同颜色表示不同组合)

Fig. 3 The distribution characteristics of the lightning locations located by different station layouts (different colors indicate different combinations)

0.2 km、0.5 km、1 km的数量占比分别进行了统计，结果如图4所示。总体上看，闪电定位偏差与测站数量和测站布局密切相关。随着测站数量的增加，定位结果的差异逐渐减小；相同的测站数量和布局，对不同方位闪电的定位偏差也存在明显不同。

对于发生在探测网内部的闪电，当测站数量为5站时，5个个例的定位偏差小于1 km的占比在50%以上，若要求定位偏差在500 m以内且占比在50%以上，则需要6个测站进行同步定位。当测站数量为7站时，5个个例的定位偏差小于500 m的占比均在70%以上，而偏差小于1 km的占比达90%以上。当测站数量为8站时，发生在网内的个例定位精度都能达到500 m以内。对于发生在网外的闪电个例，距离最远的个例2的定位偏差最大，5站定位偏差均大于1 km。对于网外个例1、4和5，若要求其定位偏差在3 km以内且占比在50%以上，则需要至少6个站点同步定位；而对于个例2需要采用8站定位才接近50%；个例3由于靠近探测网，5站同步定位，即可满足偏差在3km以内占比达到半数以上的结果。由此可知闪电落点距离探测网越远，需要越多数量的站点进行同步定位，才能满足一定的定位精度。

2.3 最大和最小偏差距离下的五站组合情况

同样的测站数量，不同的布局组合得出的定位结果也存在很大差异。表1给出了探测网中任意5个测站的不同组合对10个闪电个例定位后，其结果和参考位置的最大和最小偏差距离。对网外闪电的定位差异范围达0.07~643.23 km，平均偏差为21.79 km；位于网内闪电的定位差异范围为0.02~16.68 km，平均偏差为0.99 km。

为了探究不同测站组合的定位结果呈现差异的

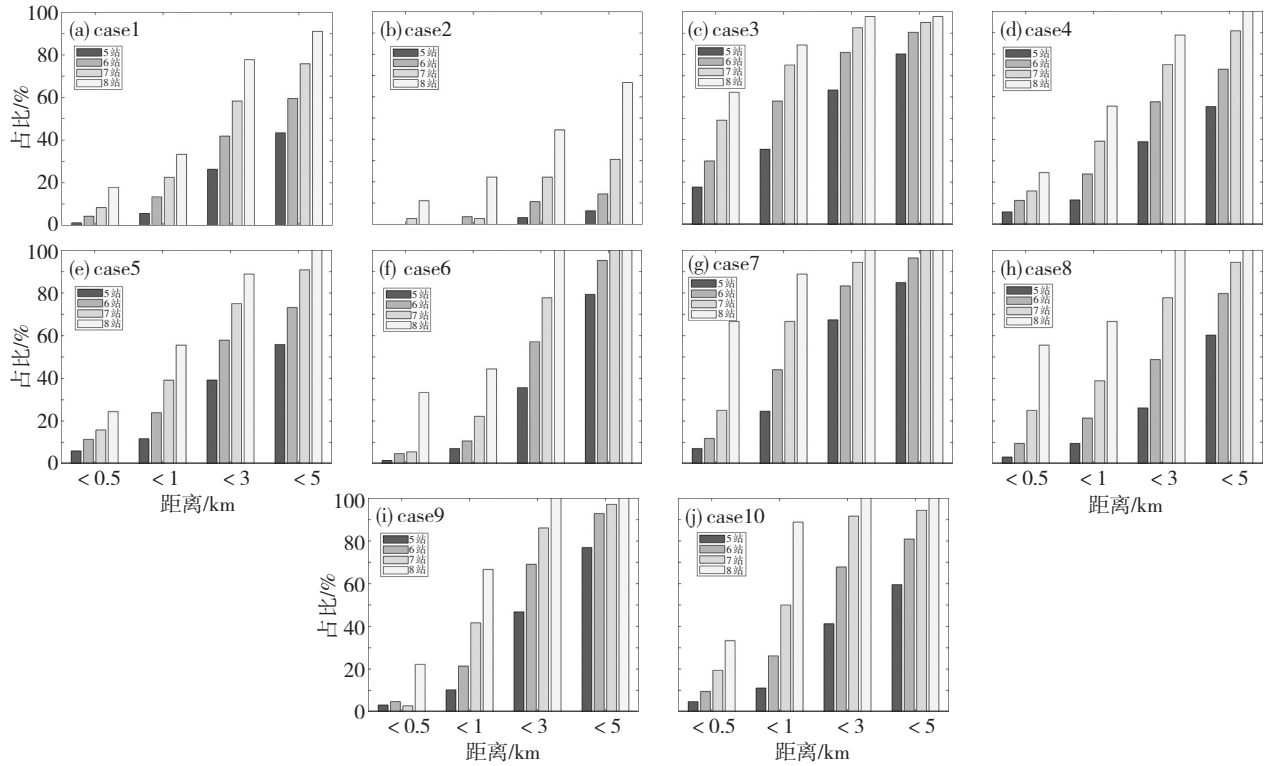


图4 不同测站数量组合情况下的个例1—10 (a—j)定位结果与参考位置的偏差距离占比

Fig. 4 Percentage of deviations between the reference position and the location results from different number of stations for (a–j) cases 1–10

表1 五站不同组合情况下的最大和最小偏差距离

Table 1 Maximum and minimum discrepancies of the locations for different combinations of five stations

个例	类型	最大偏差		最小偏差	
		偏差距离/km	同步测站名称	偏差距离/km	同步测站名称
1	网内闪电	63.49	大田、九仙山、尤溪、德化、安溪	0.44	三明、福州、九仙山、延平、尤溪
2	网内闪电	643.23	三明、延平、尤溪、德化、仙游	2.09	漳平、大田、九仙山、德化、仙游
3	网内闪电	34.49	延平、尤溪、九仙山、大田、安溪	0.07	福州、尤溪、延平、漳平、安溪
4	网内闪电	75.23	延平、尤溪、九仙山、大田、仙游	0.10	漳平、安溪、德化、仙游、福州
5	网内闪电	94.09	延平、三明、尤溪、大田、 漳平	0.75	延平、三明、九仙山、漳平、安溪
6	网外闪电	4.71	延平、尤溪、九仙山、德化、仙游	0.06	延平、大田、德化、漳平、安溪
7	网外闪电	4.05	三明、尤溪、大田、德化、漳平	0.02	三明、福州、大田、德化、漳平
8	网外闪电	16.68	延平、三明、尤溪、九仙山、德化	0.04	延平、福州、德化、仙游、漳平
9	网外闪电	8.31	尤溪、德化、仙游、漳平、安溪	0.02	大田、九仙山、德化、漳平、安溪
10	网外闪电	7.70	延平、尤溪、大田、德化、仙游	0.05	延平、尤溪、九仙山、漳平、安溪

原因，分别给出了个例2和个例7在5站不同组网情况下的最差定位结果(如图5a、c所示，即与参考位置的差异最大)，以及5站组网的最佳定位(如图5b、d所示，即与参考位置差异最小)的站点组合。从图中可见，个例2的定位效果最差的测站组合生成的双曲线交汇区域呈带状分布，在带状区域内利用最小二乘法寻优时，可能会使定位结果产生极大的偏差，使得最大定位偏差达643.23 km。相比较而言，在其5站定位结果

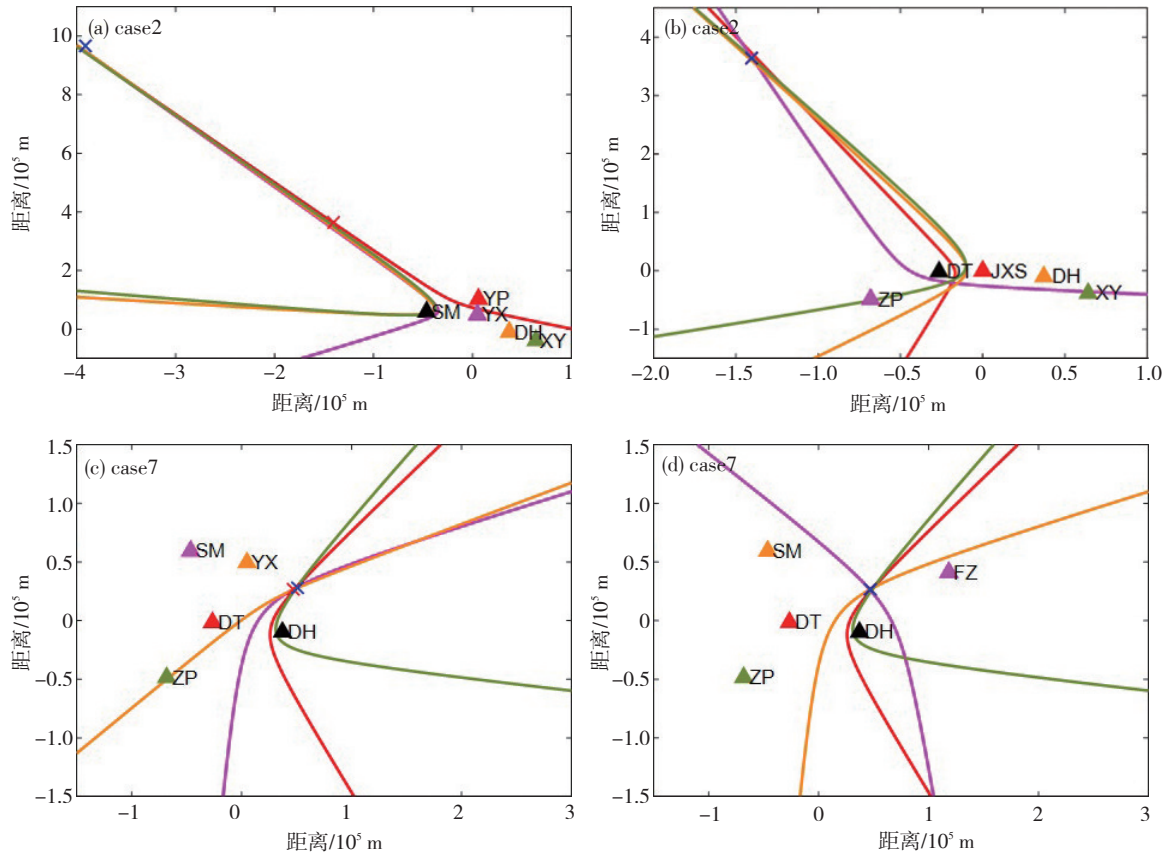


图5 配置5站组合情况下个例2 (a、b)与个例7 (c、d)偏差最大的组合(a、c)和最小的组合(b、d)

(“×”是10站定位结果，“×”是5站定位结果)

Fig.5 The configurations of 5 stations with (a, c) the largest deviation and (b, d) the smallest deviation for (a, b) case 2 and (c, d) case 7 (The " × " is the location result from the 10-station configuration and the " × " is the location result from the 5-station configuration)

最好的测站组合,双曲线交汇区域趋近于一点,5站定位结果偏差在2.09 km。个例7的各组合定位结果的最大、最小偏差介于0.02~4.05 km之间,该闪电5个测站组合的双曲线交汇区域更紧密,均更趋近于一个点,使得其产生的定位偏差也较小。因此,当闪电发生在测站网的外围,且测站数量偏少时,双曲线交汇区域易呈现"带状分布"的狭长特征,在这个区域利用最小二乘法迭代求解时,很容易产生较大偏差,导致定位结果呈现"带状分布"特征,且距离探测网越远时,这种"带状分布"特征越明显。通过对比可看出,定位偏差较大的5个测站布局特征表现为:一是测站布局呈现直线分布,二是测站间的基线距离相对较短。从定位效果较好的组网来看,要使5个测站的定位效果发挥较佳,其测站的布局应离散配置,大致呈对称的多边形分布,避免测站呈直线型分布,且基线间距宜相对较长。

3 结论与讨论

本文选取了九仙山自然闪电观测试验基地三维闪电监测网探测到的网内、外的不同方向和距离的10次不同地闪回击,定量化地分析测站的不同数量和不同组合对地闪回击定位误差。得出主要结论如下:

(1) 同样的测站数量,不同的布局组合得出的定位结果存在很大差异,对网外闪电的定位差异范围达0.07~643.23 km,平均偏差为21.79 km;对网内的定位差异范围为0.02~16.68 km,平均偏差为0.99 km。

(2) 随着测站数量的增加,平均定位偏差明显减小,同时测站数量越多,不同布局对定位的影响越小。测站数量越少,平均定位偏差越大;测站数量越多,平均定位偏差越小,数据越集中,奇异点也相对较少。

(3) 当闪电发生在测站网外,且测站同步数量较少时,由于双曲线交汇区域呈现扁平狭长区域,导致最小二乘法寻优找出的定位结果较易出现较大的偏差。

从定位效果较好的测站组合来看,要优化定位效果,测站布局应离散配置,大致呈对称的多边形分布,避免测站呈直线型分布,且在有效探测范围内适当增加基线长度。同时,地闪回击点的定位精度与测站数量和不同测站布局有密切关系,尤其是当闪击点位于探测站网外围区域时,定位结果呈"带状分布",偏差较大。因此,在实际测站建设过程中,应将关注的重点区域尽可能地放置在测站网内的核心区域,在有效探测范围内,最大程度的覆盖观测区域。本文基于磁场波形观测资料,分析了测站数目、站点组合对闪电定位精度的影响,未来还将结合地形因素,对闪电探测精度做进一步研究分析。

参考文献(References):

蔡永祥,罗少辉,唐文婷,等.2022. 1995—2020年青海省雷电灾害时空分布及其灾害特征分析[J].灾害学,37(1):92–95. Cai Y X, Luo S H, Tang W T, el al. 2022. Temporal and spatial distribution patterns of lightning hazard and its characteristics of Qinghai Province [J]. Journal of Catastrophology,37(1):92–95 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000–811X.2022.01.016

靳小兵,卜俊伟,陆茂,等.2011.四川省雷电探测网探测效率评估和改进方法研究[J].高原山地气象研究,31(4):65–68. Jin X B, Pu J W, Lu M, el al. 2011. Research of efficiency assessment and Improvement methods of Lightning detection network in Sichuan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,31(4):65–68 (in Chinese). doi:10.3969/jissn.1674–2184.2011.04.011

鞠晓雨,王凯,朱浩.2022. 2011—2021 年安徽省闪电时空分布特征分析[J].沙漠与绿洲气象,16(5):110–117. Ju X Y, Wang K, Zhu H. 2022. Spatial and temporal distribution characteristics of lightningin Anhui during 2011–2021 [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(5):110–117 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2022.05.015

梁华,张涛,姚延锋,等.2007.闪电定位误差评估与实例分析[J].干旱气象,25(4):56–61. Liang H, Zhang T, Yao Y F, el al. 2007. Evaluation of lighning orientation error and example analysis [J].Arid Meteorology,25(4):56–61 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006–7639.2007.04.011

刘洋,孙秀斌,卢舟,等.2014.基于测向测时差云闪定位精度分析及布局优化[J].成都信息工程学院学报,29(5):496–502. Liu Y, Sun X B, Lu Z, el al. 2014. Location accuracy analysis and layout optimization for intracloud lightning based on AOA jointed TDOA [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology,29(5): 496–502 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671–1742.2014.05.009

刘邕,银峰.2019.基于Chan算法的闪电定位系统布网误差分析研究[J].气象灾害防御,26(3):39–43. Liu Y, Yin F. 2019. Study on the network deployment error analysis of lightning localization system based on Chan algorithm [J]. Meteorological Disaster Prevention,26(3):39–43 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006–5229.2019.03.008

卢舟,刘钟中,朱泽伟,等.2018.湖南省闪电定位系统布局及维修方法研究[J].电子测量技术,41(12):100–104. Lu Z, Liu Z Z, Zhu Z W, el al. 2018. Study on layout and maintenance method of lightning location system in Hunan [J]. Electronic Measurement Technology,41(12):100–104 (in Chinese). doi:10.19651/j.cnki.emt.1801448

陆风,张晓虎,陈博洋,等.2017.风云四号气象卫星成像特性及其应用前景[J].海洋气象学报,37(2):1–12. Lu F, Zhang X H, Chen B Y, et al. 2017. FY–4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects [J]. Journal of Marine Meteorology,37(2):1–12 (in Chinese). doi:10.19513 /j.cnki.issn2096–3599.2017.02.001

郄秀书,张其林,袁铁,等.2013.雷电物理学[M].北京:科学出版社, Qie X S, Zhang Q L,Yuan T, et al. 2013. Physics of Lightning [M]. Beijing: Science Press (in Chinese)

万协成,唐瑶,薛明,等.2021.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,36(3):41–46. Wan X C, Tang Y, Xue M, et al. 2021. Research on error analysis and screening method of lightning drop point based on location method [J]. Journal of Catastrophology,36(3):41–46 (in Chinese). doi:10.3969 /j. issn. 1000–811X.2021.03.008

王烁.2018.云南地区闪电探测网布局设计及定位误差分析[D].南京信息

工程大学. Wang S. 2018. Layout design and location error analysis of lightning detection network in Yunan [D]. Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)

王志斌,肖艳姣,王珏,等.2022.基于卷积神经网和SVM雷电监测预警[J].自然灾害学报,31(1):219–225. Wang Z B, Xiao Y J, Wang J, et al. 2022. Lightning nowcasting and warning based on convolutional neural network and SVM [J]. Journal of Natural Disasters,31(1):219–225 (in Chinese). doi:10.13577/ j.jnd.2022.0121

余蓉,杜牧云,晏紫淙,等.2021.湖北省两套闪电定位网地闪数据的对比分析[J].暴雨灾害,40(6): 646–654. Yu R, Du M, Yan Z C, et al. 2021. Comparative analysis of cloud–ground flash data of two lightning location networks in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters,40(6): 646–654 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2021.06.009

曾金全,杨超,王颖波,等.2016.基于统计分布特征的闪电强度等级划分[J].暴雨灾害,35(6):585–589. Zeng J Q, Yang C, Wang Y B, et al. 2016. The classification of lightning current intensity based on statistical distribution characteristics [J].Torrential Rain and Disasters,35(6): 585–589 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2016.06.011

曾金全,朱彪,曾颖婷,等.2017.福建省多回击闪电特征参数的统计分析[J].暴雨灾害,36(6):573–578. Zeng J Q, Zhu B, Zeng Y T, et al. 2017. Statistical analysis of characteristic parameters for multi–return stroke of cloud–to–ground lightning in Fujian [J]. Torrential Rain and Disasters, 36(6):573–578 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2017.06.011

曾庆锋,力梅,兰红平,等.2018.闪电定位数据替代雷暴日人工观测初探[J].干旱气象,36(5):813–819. Zeng Q F, Li M, Lan H P, et al. 2018. Preliminary research on replacement of thunderstorm days of artificial observation with lightning position detection data [J]. Journal of Arid Meteorology,36(5):813–819 (in Chinese). doi:10.11755 /j.issn.1006–7639 (2018)–05–0813

张广元,董德保,宋佳军,等.2022.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,39(1):36–40. Zhang G Y, Dong D B, Song J J, el al. 2022. Analysis on detection accuracy of lightning location network in Anhui based on GDOP [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments,39(1):36–40 (in Chinese). doi:10.19441/j.cnki.issn1006–009x.2022.01.001

邹斌,崔海华,张其林,等.2021.海南地区山体地形对地闪回击定位精度的影响[J].科学技术与工程,21(28):11989–11998. Zou B, Cui H H, Zhang Q L, et al. 2021. Effect of ountainous terrain on lightning return strokes location accuracy in Hainan[J].Science Technology and Engineering,21(28):11989–11998 (in Chinese)

Chan Y T, Ho K C. 1994. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. IEEE Transactions on signal processing,42(8):1905–1915. doi:10.1109/78.301830

Cummins K L, Murphy M J. 2009. An overview of lightning locating systems: history, techniques, and data uses with an in–depth Look at the US NLDN [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 51(3):499–518. doi:10.1109/TEMC.2009.2023450

Dowden R R, Holzworth C, Rodger, et al. 2008. World–wide lightning location using VLF propagation in the Earth–ionosphere waveguide [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine,50(5):40–60. doi:10.1109/map.2008.4674710

Said R K, Inan U S, Cummins K L. 2010. Long–range lightning geolocation using a VLF radio atmospheric waveform bank [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,115(D23). doi:10.1029/2010JD013863

Wang Y, Qie X, Wang D, et al. 2016. Beijing lightning network (BLNET) and the observation on preliminary breakdown processes [J]. Atmospheric Research,171(5):121–132. doi:10.1016/j.atmosres.2015.12.012

（责任编辑　闵爱荣）