

四川省闪电定位系统升级前后对比评估

田野^{1,2}, 庞文静^{1*}, 陈泽方¹, 赖悦², 王璐², 谢娜娜², 刘显萌²

1. 中国气象局气象探测工程技术研究中心, 北京 100081

2. 北京市气象探测中心, 北京 100089

摘要: 针对四川省新建的 78 套 DDW1 闪电定位仪和原有 19 套 ADTD 闪电定位仪的 2022 年观测数据, 本文对比分析了两种型号闪电定位仪及探测系统的探测性能差异。研究结果如下: 1. 以海拔 1000 m 为界, 地形显著影响闪电定位网布局: 山区站间距变化大、均匀性不足, 而平原则更紧凑均衡。2. DDW1 和 ADTD 系统的地闪定位结果与雷达回波吻合度较高。3. 除甘孜站外, 两系统 16 个同址站点的触发阈值一致性好。15 个同址站点在 GPS 误差放大因子和噪声通过率上的一致性较高。然而, 有 5 个同址站点存在晶振偏差值一致性的问题。4. 在四川省大部分地区, DDW1 系统的地闪密度约为 ADTD 系统的两倍, 但仍然存在对四川省西部雷暴的探测能力不足的问题。ADTD 探测的正、负回击电流峰值分别介于 20~30 kA 和 -30~-20 kA; 而 DDW1 则相应分别为 10~20 kA 和 -20~-10 kA。DDW1 的正、负回击峰值电流强度均约为相应匹配 ADTD 的 1.04 倍。5. 整体来看, 同址两种设备的归一化回击电场、南北峰值磁场、东西峰值磁场和方位角的一致性较差, 而回击时间和后过零点时间的一致性中等。6. DDW1 和 ADTD 系统的地闪定位结果时间分布和子站探测的回击时间分布规律相似, 均呈近似双峰分布, 双峰值位于夜间, 单谷值位于中午。7. ADTD 子站和 DDW1 子站的回击捕获率均不理想。今后应研究和开发复杂地形下的传播时间修正算法和设备的计量校准技术, 并应用到国家雷电观测网中。本研究成果为后续国家雷电观测网设备建设、运行和观测资料的应用等提供科学依据。

关键词: 国家雷电观测网; DDW1 闪电定位系统; 闪电定位; 一致性; 自评估

文章编号: 2024008A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2412.24008

收稿日期 2024-01-11 **网络预出版日期**

作者简介 田野, 男, 1988 年出生, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事闪电定位系统运维和定位资料分析与应用研究。E-mail: 605342613@qq.com

通讯作者 pwjaoc@cma.gov.cn

资助项目 中国气象局气象探测中心优质计划 (YZJH24-13), 国家自然科学基金项目 (42205091)

Funded by High-Quality Plan of the China Meteorological Administration Meteorological Observation Center (Grant YZJH24-13), National Natural Science Foundation of China (Grant 42275036)

Comparative evaluation of the lightning location system in Sichuan

Province before and after the upgrade

Tian Ye^{1,2}, Pang Wenjing^{1*}, Chen Zefang¹, Lai Yue², Wang Lu², Xie Nana², Liu Xianmeng²

1. CMA Research Centre on Meteorological Observation Engineering Technology, Beijing

100081

2. Beijing Meteorological Observation Center, Beijing 100089

Abstract This article presents a comparative analysis of the detection performance differences between two types of lightning location systems, namely the newly built DDW1 and the original ADTD in Sichuan Province, based on the 2022 observation data of 78 DDW1 sensors and 19 ADTD sensors. The research findings are as follows: 1. Using an altitude threshold of 1000 m, topography significantly affects lightning detection network configurations: station spacing in mountainous regions varies greatly and lacks uniformity, whereas networks in plains are more compact and evenly distributed. 2. The cloud-to-ground flash positioning results of both the DDW1 and ADTD systems are found to be consistent with radar echoes. 3. With the exception of the Ganzi station, the trigger thresholds of the 16 co-located stations for both systems exhibit consistency. Furthermore, the 15 co-located stations demonstrate high consistency in terms of GPS error amplification factor and noise passing rate. However, there are 5 co-located sites that exhibit inconsistencies in crystal oscillator deviation values. 4. In most areas of Sichuan Province, the cloud-to-ground lightning density of the DDW1 system is approximately twice that of the ADTD system. However, there are still detection limitations for thunderstorms in western Sichuan Province. The positive and negative return stroke current peaks detected by the ADTD system range between 20~30 kA and -30~-20 kA respectively, while the corresponding peak values of the DDW1 system are 10~20 kA and -20~-10 kA respectively. The positive and negative return stroke peak current intensities of the DDW1 system are approximately 1.04 times that of the corresponding ADTD system. 5. Overall, the consistency of the normalized return stroke electric field, north-south peak magnetic field, east-west peak magnetic field and azimuth angle of the DDW1 and ADTD sensors at the same site is poor, while the consistency of the return stroke time and post-zero-crossing time is moderate. 6. The time distribution of cloud-to-ground flash positioning results for both the DDW1 and ADTD systems follows a similar pattern to the time distribution of return strokes detected by stations. They exhibit

an approximate bimodal distribution, with peak activity observed during nighttime and a decrease during noon. 7. The capture rates of return strokes for both DDW1 and ADTD stations are found to be suboptimal. In the future, it is recommended to develop propagation time correction algorithms suitable for complex terrains and apply equipment measurement calibration technology to the National Lightning Detection Network (CNLDN). The research findings serve as a scientific basis for the subsequent construction, operation and application of CNLDN's observation data.

Keywords: National Lightning Detection Network; DDW1 Lightning location system; lightning positioning; consistency; self-evaluation

1.引言:

地基闪电定位系统作为一种重要的闪电放电监测工具,不仅提供了关于雷暴活动、天气预警和科学研究所需的数据和信息,而且在减少雷击灾害风险、提高天气预报准确性以及深化对大气电学和气候系统的理解方面发挥着重要作用(赵焯等, 2023; 孙婵和徐国强, 2019; 阎金磊等, 2024; 孙凌等, 2019; 王芳等, 2017)。在过去, 国家雷电观测网的设备仅限于地闪监测, 且在定位精度和探测效率等方面存在改进的空间(王志超等, 2018; 冯民学等, 2015; 张华明等, 2020)。为此, 中国气象局气象探测中心于 2020 年对国家雷电观测网进行了逐步升级, 采用新研发的 DDW1 型号设备替代 ADTD 型设备。

截止目前, 国家雷电观测网已拥有 241 个 DDW1 站点和 263 个 ADTD 站点。在四川省, 17 个站点同时安装了 DDW1 型设备并保留了 ADTD 型设备, 实现了两种设备的同步运行观测。这一升级不仅扩大了观测网络规模, 而且对提升定位精度和探测效率具有积极的影响。本文旨在通过对比分析新建 DDW1 型设备和原有 ADTD 型设备的观测数据, 深入探讨两者在雷电定位方面的性能差异, 为进一步完善国家雷电观测网提供科学依据。

国内外许多甚低频地基闪电定位网均经历了升级过程, 并对升级后的效果进行了评估。以北京多频段闪电定位网 (BLNET) 为例, 该网在 2015 年进行了硬件、站网布局和定位算法的升级, 新增了脉冲类型识别和峰值电流估算功能, 实现了闪电辐射源脉冲的三维实时定位和放电通道精细化定位(王宇等, 2015; Yuan et al, 2020; 王东方等, 2020)。Azadifar et al. (2016) 报道了 2013 年欧洲联合闪电定位网在考虑地面传播效应后, 其定位精度明显提高。美国国家闪电探测网络在硬件和算法两方面经历了多次升级, 并被多次评估 (Idone et al., 1998a, 1998b; Cummins and Murphy, 2009; Murphy et al., 2021)。Diendorfer (2016) 指出奥地利雷电探测信息系统对每个站点进行了与方位角和距离相关的传播时间修正算法的升级, 使得系统对回击的定位误差优于 100 m。Bourscheidt et al. (2012) 提到巴西闪电定位网从 1999 年至 2009 年经历了设备和站点数量的升级, 包含了多种 Vaisala 的探头 (LPATS, IMPACT, LS7000 和 LS8000), 且系统探测的最低电流强度从 1999 年的 18 kA 到 2009 年的 6 kA, 表明了探头灵敏度的提升。马来西亚电力系统地闪定位网分别于 2001 年和 2009 年经历了两次探头和中央处理器

的升级 (Wooi et al., 2016)。Zhang et al. (2016) 利用 2012-2014 年的人工引雷资料评估了升级后的粤港澳大湾区闪电定位系统的地闪探测性能,发现升级后系统的探测效率和定位精度均明显提高,但地闪峰值电流被低估。Zhu et al. (2022) 称 Earth Networks Total Lightning Network (ENTLN)在 2021 年 12 月发布了新的处理器 (P2021),包括:新分类算法、新传播模型和区域数据处理技术。利用佛罗里达州的自然闪电和人工引雷数据评估了新处理器的性能。P2021 与 P2015 相比,自然闪电的回击识别成功率从 91%提高到 94%,人工引雷回击识别成功率从 86%提高到 88%。中值定位误差从 215 m 提高到 92 m。全球范围内,ENTLN 对脉冲的捕获率提高了 50%。

然而,前述研究主要聚焦在系统升级后的表现,缺乏对同时运行观测相同雷暴过程的对比。在四川省,17 个站点同址的两种型号设备在站点数和位置均未发生变化的情况下,同步运行观测了一整年的数据。这一独特的设计使得本研究在分析设备升级效果时具备得天独厚的条件。

系统升级后的运行情况和效果是我们关注的重点,同时也是支撑闪电定位资料应用的基石。因此,本文通过对比分析深入研究了四川省 DDW1 型和 ADTD 型闪电定位仪及其探测系统在地闪定位结果、触发阈值、时间分布、回击电流强度、电场和磁场一致性以及回击捕获率等方面的差异。这些性能差异的全面了解将为进一步完善四川省雷电监测系统提供科学依据,提高定位精度和探测效率。同时,本研究也将为国内其他雷电定位网升级提供经验和借鉴。

2.设备和系统介绍:

ADTD 型设备和 DDW1 型设备的探测频段均为 1~400 kHz。ADTD 采用模拟电路处理接收到的地闪信号,随后国家数据处理中心使用时差和测向混合定位算法计算 2 站以上同步观测结果 (Xu 等人, 2022)。与 ADTD 定位系统不同的是,DDW1 定位系统能够实时处理全波形数据,并基于特定的定位算法对云闪和地闪进行定位 (徐黄飞等, 2023)。李庆申等人 (2020) 通过从化引雷试验数据对广东省组网的 DDW1 系统进行了性能评估,结果显示该系统对地闪和回击的探测效率分别为 100%和 63%,平均定位误差约为 464 m,电流反演误差为 11.49%。

四川省新建的 78 套 DDW1 型闪电定位仪和国家雷电观测网中四川省 19 套 ADTD 闪电定位仪的分布如图 1 所示。其中，有 17 个站点既配备了 DDW1 型设备，又保留了 ADTD 型设备。

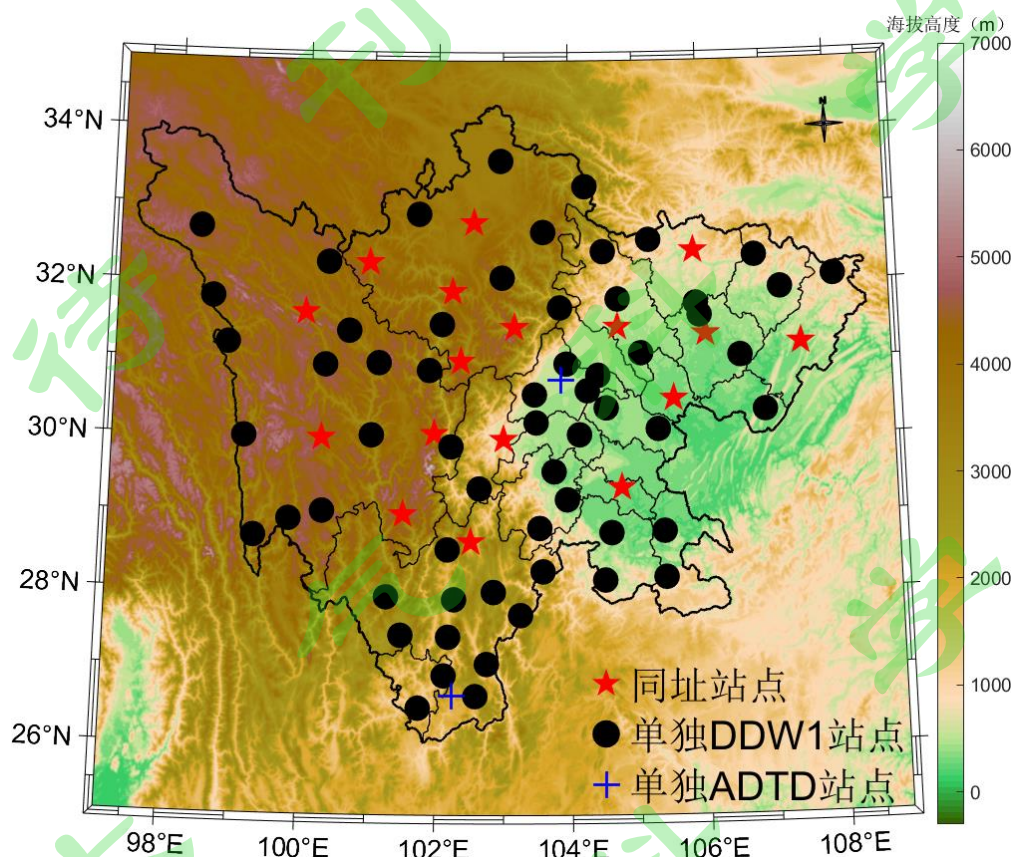


图 1 DDW1 和 ADTD 系统子站分布图

Figure 1. Distribution of Substations in the DDW1 and ADTD Systems

按海拔高度 1000 m 为界，将这些站点分类为山区站点和平原站点。表 1 展示了两套闪电定位系统（DDW1 与 ADTD）在四川省高海拔山区和平原地区的站网覆盖范围及站间距特征。分析结果表明，DDW1 系统在山区部署了 44 个站点，覆盖面积较大，达到 $30.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，且平均站网间距为 291.3 km，间距范围从 30.6 km 到 549.8 km，跨度较大。这表明在复杂地形条件下，尽管 DDW1 能够实现较广区域的观测覆盖，但其网络布局的均匀性尚有不足。相比之下，ADTD 系统在山区仅部署了 11 个站点，覆盖面积较小，为 $11.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，但其平均站网间距略小，为 257.3 km，且最小间距显著增加至 91.3 km。这可能表明 ADTD 在山区环境下的站点布局更加集中，但覆盖范围相对较小。

在平原区域，两种系统的覆盖面积和站网间距总体均低于山区。这与平原地区地形较为开阔、站点布设相对均衡，减少了监测盲区密切相关。具体而言，DDW1 在平原区部署了 34 个站点，平均站间距为 230.7 km，较山区有所减小，且最小间距仅为 0.2 km，显示出其在平原区的站点密集度显著提高，有助于在低海拔区域实现更精细的闪电定位能力。而 ADTD 在平原区的覆盖面积（ $6.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ）与平均间距（222.9 km）较其在山区的数值显著下降，最大间距也有所减少。这意味着 ADTD 在平原地带能够更加紧凑、均匀地分布站点，从而较山区提升闪电探测的完整性与精度。

表 1 DDW1 和 ADTD 在四川省高海拔山区和平原地区的站网覆盖范围及站间距特征
Table 1 Network Coverage and Station Spacing Characteristics of DDW1 and ADTD in High-altitude Mountainous and Plain Regions of Sichuan Province

站网位置	站网类别	站点数	覆盖面积(10^4 km^2)	平均间距(km)	最小间距(km)	最大间距(km)
山区站	DDW1	44	30.9	291.3	30.6	549.8
	ADTD	11	11.8	257.3	91.3	537.8
平原站	DDW1	34	14.3	230.7	0.2	533.6
	ADTD	8	6.7	222.9	104.5	453.1

本文使用的 DDW1 结果由四川省内 78 个站点组网定位得到。而 ADTD 的定位数据由国家雷电观测网得到，其数据可能包含了周边临近省份站点参与的少量定位结果。鉴于 ADTD 仅具备地闪观测功能，而 DDW1 不仅能观测地闪还能观测部分云闪，因此同址不同型号设备数据的对比仅限于地闪观测结果。本研究进行的一致性对比分析采用了 2022 年 6 月 16 日至 9 月 15 日的闪电数据。

3. 对比方法

主要对比分析 2022 年汛期四川省新建 DDW1 观测系统和国家雷电观测网中四川省的探测结果，包括状态、回击、定位等观测数据。鉴于站网布局和设备会对系统的探测性能产生影响，本文的对比分析将包含两个层次，即探测网和设备。

3.1 与雷达个例资料的对比

基于四川省天气雷达对特定区域的强对流天气的观测结果，本文将某时刻雷达组合反射率因子与该时刻前后 3 分钟内两系统的闪电定位结果进行叠加，以验证和对比两系统雷电定位数据的真实性和准确性，从而了解系统在实际强对流天气过程中的表现。

3.2 同址不同型号设备数据的对比

WMO (2018) 指出雷电是重要的气候要素之一, 应建设长序列历史数据集。然而, 设备型号更换可能影响历史资料序列的均一性, 因此, 需要对同址同时刻的 DDW1 和 ADTD 设备的资料一致性进行研究。主要从状态数据一致性、定位数据一致性和回击数据一致性三个方面分析一致性变化情况。这有助于评估设备升级对历史数据集的影响, 并为长序列雷电资料的可靠性提供科学依据。

3.2.1 状态数据一致性

比较两种设备在同一秒输出的状态数据, 包括触发阈值、通过率、晶振偏差、误差因子和 GPS 误差放大因子等要素的差异, 本文将分别对比分析不同要素值的绝对偏差的平均值和标准差。

本文主要关注的是两个设备测量结果的偏差大小, 而非偏差方向。使用绝对偏差作为比较基础, 可以排除数值正负的影响, 提供一个统一的衡量标准。这不仅使不同测量结果之间的比较更加公正和一致, 特别是在进行统计分析时, 能够真实地反映两个设备之间的一致性。因此, 计算绝对偏差是一种有效的评估方法, 能够准确表达两台设备在运行过程中可能存在的差异, 为设备调整、维护和质量控制提供有价值的信息。这种方法确保了分析结果的准确性和实用性。

触发阈值表示设备采集的最小信号幅度。通过率, 全称为当前阈值通过率, 指每秒大于阈值的脉冲计数。根据业务经验, 通过率小于 300 是正常的, 超过则可能表明存在干扰。晶振偏差是指 1 秒内 10M 恒温晶振的实际震荡次数与标准震荡次数的偏差。定位结果中的误差因子分为两种: 时差测向算法误差因子和纯时差法误差因子。时差测向算法误差因子指的是 4 站时差测向定位结果相对于 3 站时差测向定位结果的优化距离, 单位为米。由于 3 站时差测向定位没有优化过程, 其误差因子为 0。纯时差法误差因子指的是定位结果与设备测量回击/脉冲数据之间的误差, 无单位。

GPS 误差放大因子是 GPS/北斗授时模块的输出参数之一, 该参数表示授时模块的定位准确度和授时精准度, 用于反映组件运行状态。当该值在 0 到 20 的阈值范围内时, 表示 GPS/北斗授时模块运行正常; 若超出此范围, 则表明运行异常。误差因子不是实际误差, 而是用来描述误差大小的参数。误差因子不能为 0, 若为 0 表示优化失败或者未进行优化。

以触发阈值为例，其绝对偏差定义为同一时刻两种设备匹配的触发阈值之差的绝对值，表示为：

$$TH_k = |TH_k^{DDW1} - TH_k^{ADTD}| \quad (1)$$

其中， TH_k^{DDW1} 为第 k 站点的 DDW1 设备匹配的触发阈值； TH_k^{ADTD} 为第 k 站点的 ADTD 设备匹配的触发阈值。相关的算术平均值计算方法如下：

$$\overline{TH}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n TH_{ki} \quad (2)$$

其中，n为匹配的触发阈值个数； TH_{ki} 为第 k 站点的第 i 次匹配触发阈值的偏差。

相关的标准偏差的计算方法见式（3）：

$$TH_k = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (TH_{ki} - \overline{TH}_k)^2} \quad (3)$$

由于 DDW1 和 ADTD 设备判定 GPS 误差放大因子的指标不同，本文将对二者 GPS 误差放大因子正确率。具体计算方法如下：

$$GPSEF_{kDDW1}(\%) = \frac{N_k^{DDW1_cor}}{N_k^{DDW1}} \times 100\% \quad (4)$$

$$GPSEF_{kADTD}(\%) = \frac{N_k^{ADTD_cor}}{N_k^{ADTD}} \times 100\% \quad (5)$$

其中， $N_k^{DDW1_cor}$ 和 $N_k^{ADTD_cor}$ 分别为第 k 站点匹配的 DDW1 设备和 ADTD 设备的 GPS 误差放大因子正确个数； N_k^{DDW1} 和 N_k^{ADTD} 分别为第 k 站点匹配的 DDW1 设备和 ADTD 设备的 GPS 误差放大因子总数。

因此，误差因子的绝对偏差为同一时刻两种设备匹配的 GPS 误差放大因子正确率之差的绝对值：

$$GPSEF_k = |GPSEF_k^{DDW1} - GPSEF_k^{ADTD}| \quad (6)$$

通过对这些状态数据的一致性分析，可以更深入地了解两种设备在运行过程中的性能表现。

3.2.2 定位数据一致性

在定位数据的一致性分析中，本文选取在相同的 0.5 ms 和 10 km 范围内两种设备组网定位得到的所有回击结果作为匹配样本，不区分首次回回击和继后回击，该时空范围与张悦等（2021）所用范围一致。具体的选取方法如下：首先，利用类型识别结果从 DDW1 系统中挑选出标记为地闪回击的记录；然后，对于挑选出的 DDW1 记录，逐一从 ADTD 系统中寻找符合上述条件的匹配记录；最后，若有多重匹配结果，则选取时间差最优的结果作为最终匹配项。

本文主要从以下几个方面进行分析：

- 定位数量比：DDW1 系统与 ADTD 系统匹配的定位个数之比。
- 定位配对率：两种系统配对定位结果占各自总定位结果之比，包含两个系统的匹配结果。
- 相对探测效率：DDW1 系统定位个数较 ADTD 系统定位个数的相对增量，不涉及两个系统的匹配结果。
- 时间绝对偏差：两种系统匹配的定位结果的时间之差的绝对值。
- 距离绝对偏差：两种系统匹配的定位结果的位置之差的绝对值。
- 电流绝对偏差：两种系统匹配的定位结果的峰值电流强度之差的绝对值。
- 极性相同率：两种系统匹配的定位结果的电流强度具有相同极性的个数占匹配总数之比。
- 参与站点数绝对偏差：两种系统匹配的定位结果间参与定位计算的站点数之差。
- 时空分布差异：两个系统地闪定位结果的时间和空间分布差异。
- 电流分布差异：两个系统测得的地闪峰值电流强度的分布差异。

下面介绍这些指标的计算方法。

定位数量比表示为：

$$Rate(\%) = \frac{N_{DDW1}}{N_{ADTD}} \times 100\% \quad (7)$$

其中， N_{DDW1} 为 DDW1 型定位网的定位个数； N_{ADTD} 为 ADTD 型定位网的定位个数。

定位配对率表示为：

$$match\ rate_{DDW1}(\%) = \frac{N_{match}}{N_{DDW1}} \times 100\% \quad (8)$$

$$match\ rate_{ADTD}(\%) = \frac{N_{match}}{N_{ADTD}} \times 100\% \quad (9)$$

其中， $match\ rate_{DDW1}$ 为 DDW1 的定位配对率， $match\ rate_{ADTD}$ 为 ADTD 的定位配对率， N_{match} 为配对的定位个数。

相对探测效率的计算公式为：

$$DE(\%) = \frac{N_{DDW1} - N_{ADTD}}{N_{ADTD}} \times 100\% \quad (10)$$

电流绝对偏差的计算公式为：

$$I = ||I_{DDW1}| - |I_{ADTD}|| \quad (11)$$

其中, I_{DDW1} 为匹配的 DDW1 型定位网输出的定位结果的峰值电流强度; I_{ADTD} 为匹配的 ADTD 型定位网输出的定位结果的峰值电流强度。

极性相同率表示为:

$$Rate_Po = \frac{M}{N_{match}} \times 100\% \quad (12)$$

其中, M 为匹配的定位结果中具有相同电流极性的个数, N_{match} 为匹配的定位结果的总数。

参与站点数偏差表示为:

$$NS = NS_{DDW1} - NS_{ADTD} \quad (13)$$

其中, NS_{DDW1} 为参与定位计算匹配的 DDW1 型定位网定位结果的站点数目; POS_{ADTD} 为参与定位计算匹配的 ADTD 型定位网定位结果的站点数目。

3.2.3 回击数据一致性

本文选取在相同的 $20\ \mu s$ 内同一站点的两种设备探测到的闪电回击数据作为样本进行统计, 采用的方法与定位数据一致性的选取方法相同。回击数据一致性主要分析指标包括:

- 回击数量比: 一年内同一个站点两种设备探测到回击个数之比。
- 回击配对率: 两种设备配对的回击探测结果占各自总回击探测结果之比。
- 相对回击探测效率: 同一站点 DDW1 设备探测的回击个数较 ADTD 设备探测的回击个数的相对增量。
- 回击时间平均绝对偏差: 同一站点两种设备匹配的回击时间差的绝对值。
- 回击峰值电场平均绝对偏差: 同一站点两种设备匹配的回击的归一化绝对峰值电场强度之差的绝对值。
- 回击南北、东西峰值磁场平均绝对偏差: 同一站点两种设备匹配的回击的归一化绝对南北、东西峰值磁场强度之差的绝对值。
- 回击方位角平均绝对偏差: 同一站点两种设备匹配的回击的方位角之差的绝对值。
- 峰点时间平均绝对偏差: 同一站点两种设备匹配的回击波形的峰值时间之差的绝对值。
- 后过零点时间平均绝对偏差: 同一站点两种设备匹配的回击波形的后过零点时间之差的绝对值。

● 极性相同率：同一站点两种设备匹配的回击电场、南北峰值磁场和东西峰值磁场具有相同极性的个数分别占匹配总数之比。

● 时空分布差异：两种设备探测的闪电回击结果的时间和空间分布差异。由于 DDW1 和 ADTD 的电场和磁场探测的量程不同，因此在对比时需要将两者的电场和磁场观测数据分别进行最大值归一化。

回击数量比表示为：

$$Rate_{CG,k}(\%) = \frac{N_{CG,k}^{DDW1}}{N_{CG,k}^{ADTD}} \times 100\% \quad (14)$$

其中， $N_{CG,k}^{DDW1}$ 为第 k 站点的 DDW1 设备在一年内探测到的回击数； $N_{CG,k}^{ADTD}$ 为第 k 站点的 ADTD 设备在一年内探测到的回击数。

回击配对率表示为：

$$match\ rate_{det_k}^{DDW1}(\%) = \frac{N_k^{match}}{N_k^{DDW1}} \times 100\% \quad (15)$$

$$match\ rate_{det_k}^{ADTD}(\%) = \frac{N_k^{match}}{N_k^{ADTD}} \times 100\% \quad (16)$$

其中， N_k^{match} 为第 k 站点两种设备匹配的回击数据量， N_k^{DDW1} 为第 k 站点 DDW1 设备探测的回击数据量， N_k^{ADTD} 为 k 站点 ADTD 设备探测的回击数据量。

相对回击探测效率表示为：

$$DE_{CG}(\%) = \frac{N_{CG,k}^{DDW1} - N_{CG,k}^{ADTD}}{N_{CG,k}^{ADTD}} \times 100\% \quad (17)$$

式 (24) 给出了本文采用的电磁场归一化方法：

$$x^* = \frac{x - \min}{\max - \min} \quad (18)$$

其中， $\max$ 为样本数据的最大值， $\min$ 为样本数据的最小值。

回击峰值电场、回击南北峰值磁场和回击东西峰值磁场的绝对偏差计算公式为：

$$EB_{CG,k} = \left| |EB_{CG,k}^{DDW1}| - |EB_{CG,k}^{ADTD}| \right| \quad (19)$$

其中， $EB_{CG,k}$ 为第 k 站点匹配的回击峰值电场或南北峰值磁场的绝对偏差， $EB_{CG,k}^{DDW1}$ 为匹配的第 k 站点 DDW1 设备探测到的回击峰值电场或南北峰值磁场强度； $EB_{CG,k}^{ADTD}$ 为匹配的第 k 站点 ADTD 设备探测到的回击峰值电场或南北峰值磁场强度。

极性相同率表示为：

$$Rate_P_{k_r} = \frac{M_{k_r}}{N_k^{match}} \times 100\% \quad (20)$$

其中, $Rate_P_{k_r}$ 为第 k 站点 r 参量的极性相同率, r 参量可分别取回击电场、南北峰值磁场和东西峰值磁场, M_{k_r} 为第 k 站点匹配的 r 参量极性相同的个数。

3.3 自评估

鉴于 ADTD 设备和 DDW1 设备均不输出闪电波形原始数据, 因此对四川省雷电观测网的自评估主要集中在子站层面, 评估各子站的回击捕获率。由于两种雷电观测网的布局存在差异, 因此自评估结果仅为各自网内的评估结果, 无法进行网间的对比。

子站回击捕获率: 分别选取四川省 DDW1 和 ADTD 雷电观测网的多站定位数据 (≥ 5 站), 且回击峰值电流强度 ≥ 10 kA, 认为其接近真实的雷电发生情况 (Srivastava et al., 2017)。筛选这些定位结果半径 200 km 范围内的各子站的回击观测数据, 检验各子站的 DDW1 设备和 ADTD 设备在定位时刻前后 1 ms 内是否观测到了相应的回击。使用该方法评估 2022 年网内所有子站的回击捕获率 N_{CG_detec} 。

回击捕获率 N_{CG_detec} 的计算方法如下:

$$R_{CG_detec} = \frac{N_{CG_detec}}{N_{CG_loc}} \times 100\% \quad (21)$$

其中, N_{CG_loc} 为某子站 200 km 范围内定位到的地闪回击数; N_{CG_detec} 为同一子站相应时刻探测到的地闪回击数。

4. 对比结果分析

4.1 与雷达个例资料对比结果

选取四川省 2022 年部分雷雨大风天气, 将各时刻 S 波段天气雷达的组合反射率因子与该时刻前后 3 分钟内的 DDW1 和 ADTD 的闪电定位结果叠加, 如图 2 所示。在图 2 (a) 中, 展示了广元市 6 月 22 日 06:25 时刻的雷雨天气, 过程较强, 大部分地闪定位结果与强对流回波吻合较好, 只有少量 DDW1 地闪定位结果位于雷达回波之外。绵阳市 6 月 27 日的天气过程较弱, 18:15 时刻仅有一次 DDW1 云闪定位结果位于雷达探测范围之外, 如图 2 (b) 所示。对于宜宾市 7 月 27 日 00:03 时刻的雷雨天气过程, 大部分 DDW1 和 ADTD 定位结果集中在雷暴云的强对流部分 (>35 dBZ), 一些 ADTD 地闪定位结果位于雷达回波之外, 如

图 2 (c) 所示。从图 2 (d) 可以看出，在德阳市 7 月 31 日 17:58 时刻的雷雨天气过程中，两种系统的地闪定位结果均与雷达回波重合较好，仅有两次 DDW1 云闪探测结果位于雷达探测范围之外。总体来看，两个系统的绝大部分地闪定位结果与雷达回波吻合度较高，能够较好地反映强对流系统的发展和变化，然而，同时也存在少量虚假地闪定位结果。

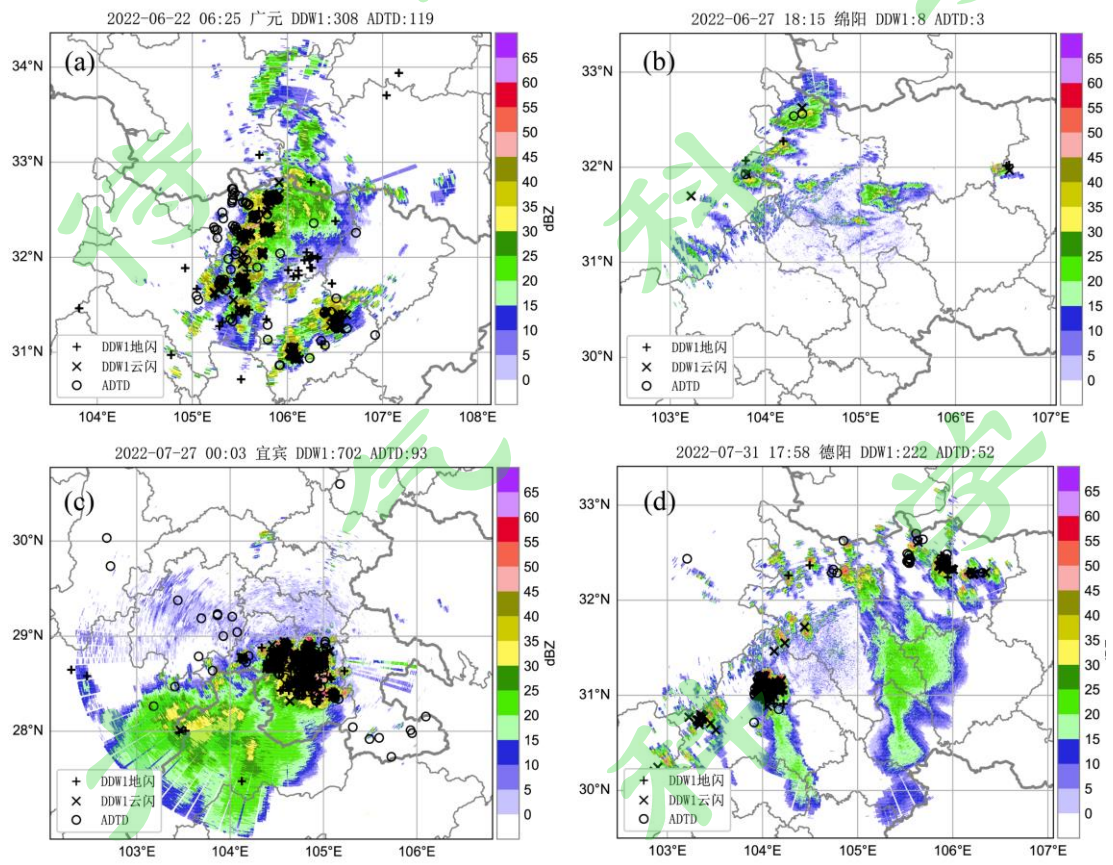


图 2 四川省 2022 年部分雷雨大风天气的雷达回波与 DDW1 和 ADTD 地闪定位结果的叠加情况 a)6 月 22 日 06:25 广元市, b)6 月 27 日 18:15 绵阳市, c)7 月 27 日 00:03 宜宾市, d)7 月 31 日 17:58 德阳市 (ADTD 地闪定位结果用空心圆表示, “+” 表示 DDW1 地闪定位结果, “x” 表示 DDW1 云闪定位结果。)

Figure 2. Overlay of Radar Echoes and Cloud-to-Ground Lightning Location Results from DDW1 and ADTD Systems During Some Thunderstorm Events in Sichuan Province in 2022

a) June 22, 07:14, Guangyuan City, b) June 27, 18:15, Mianyang City, c) July 27, 00:03, Yibin City, d) July 31, 17:58, Deyang City.

(The ADTD cloud-to-ground lightning location results are represented by hollow circles, the “+” symbol indicates the DDW1 cloud-to-ground lightning location results, and the “x” symbol

denotes the DDW1 intra-cloud lightning location results.)

4.2 同址不同型号设备数据的对比结果

4.2.1 状态数据一致性分析结果

图 3 展示了 17 个同址站点的四种状态数据一致性的统计结果。在图 3 (a) 中, 除甘孜站外, 其他站点的匹配触发阈值的绝对偏差的算术平均值和标准差都为 0, 表明这些站点在对比时间段内具有完全一致的触发阈值。甘孜站的匹配触发阈值的绝对偏差的算术平均值和标准差分别为 5.98 mV、23.72 mV 和 100 mV。检查后发现, 甘孜站的 DDW1 设备的触发阈值异常率 (6.0%) 较 ADTD 设备 (0%) 高。可能是受到背景噪声源的干扰, 建议检查甘孜站的背景噪声源, 尽量降低干扰。图 3 (b) 显示出, 大部分同址站点的噪声通过率绝对偏差的算术平均值和标准差均很小, 表明它们之间的差异较小。然而, 康定站和南部站的标准差均超过 50 次/s, 说明这两个站点设备的噪声量存在较大的差异。经检查原始数据, 发现康定站 DDW1 设备和 ADTD 设备通过率 (噪声) 的异常率分别为 0% 和 98.7%, 南部站的相关异常率分别为 0% 和 99.1%。因此, 康定站和南部站 ADTD 设备的噪声通过率异常比率均较高, 升级后的 DDW1 设备在抗噪声干扰方面表现更强。图 3 (c) 给出了同址两种设备 GPS 误差放大因子正确率的绝对偏差结果。大部分同址站点的 GPS 误差放大因子正确率绝对偏差小于 0.0008, 整体上一致性较高。然而, 甘孜和九龙站点的正确率偏差较大, 分别约为 0.011 和 0.008。检查原始数据, 发现这两站的 DDW1 设备的 GPS 误差放大因子正确率分别为 0.989 和 0.992, 而 ADTD 的相关指标均为 0.999。因此, 有必要提高甘孜和九龙站点 DDW1 设备的 GPS 误差放大因子正确率。从图 3 (d) 可以看出, 理塘、自贡、越西、遂宁和红原站的晶振偏差值的绝对偏差的算术平均值较高, 分别为 3.37 Hz、1.37 Hz、0.93 Hz、1.57 Hz 和 1.59 Hz。表明这 5 个站点的晶振偏差值的一致性较差, 特别是理塘站。其他同址站点则不超过 0.28, 表明它们的晶振偏差值的一致性较好。所有站点的晶振偏差值的标准差相差不大, 最大值为 0.55, 说明同址站点晶振偏差值的波动相对稳定。DDW1 和 ADTD 型闪电定位仪每分钟生成设备状态数据, 用于表征当前设备的运行状态。通过该数据可以直接判断设备的运行情况。当时间、工作状态、GPS 状态、晶振偏差异常时, 说明设备运行异常。当阈值与业务要求不符时, 说明设备触发阈值设置异常。当通过率异常时,

说明设备内部电磁兼容性或站点电磁环境异常。

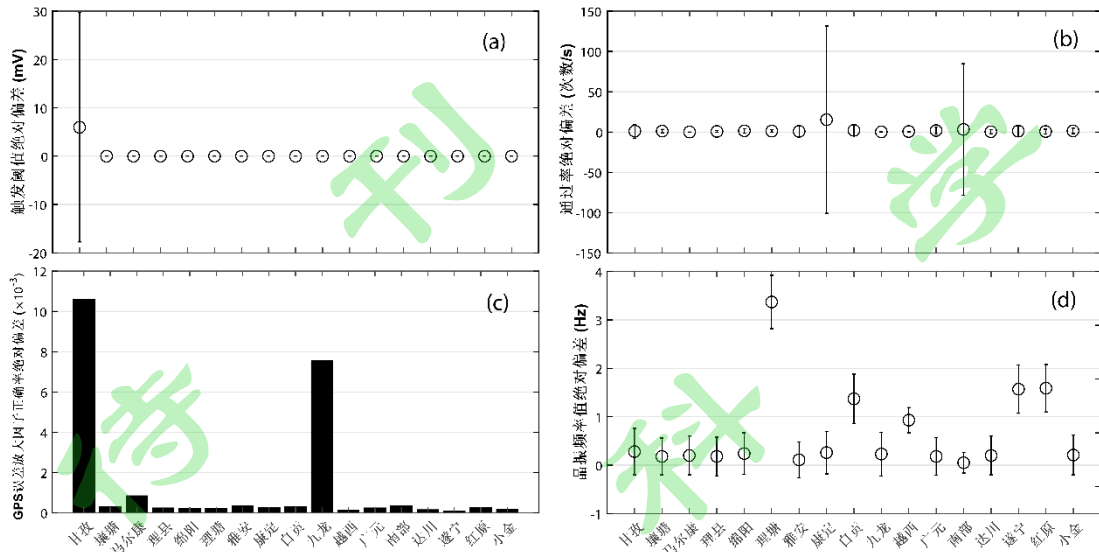


图 3 DDW1 和 ADTD 系统匹配的多种状态数据一致性分析结果, a) 触发阈值, b) 噪声通过率, c) GPS 误差放大因子, d) 晶振偏差值
(空心圆为算术平均值, 竖线为标准差上下范围)

Figure 3. Consistency Analysis Results of Various Matched State Data Between DDW1 and ADTD Systems

a) Trigger Threshold, b) Noise Pass Rate, c) GPS Error Amplification Factor, d) Crystal Oscillator Deviation.

(Open circles represent arithmetic means, and vertical lines represent the range of standard deviations.)

4.2.2 定位结果一致性分析结果

由于仅使用 17 个站点组网得到的 DDW1 定位数据较为有限, 因此本文选择对全部 78 个站点组网的定位结果进行分析。经统计, 2022 年 6 月 16 日至 9 月 15 日四川省 DDW1 型定位网的定位个数 N_{DDW1} 为 604298, ADTD 型定位网的定位个数 N_{ADTD} 为 313305。因此, 两系统的定位数量比为 192.9%。两种系统共有 65364 次定位结果匹配成功, 其中 DDW1 和 ADTD 的定位配对率分别为 10.8% 和 20.9%。进一步计算得到相对探测效率为 92.9%, 即匹配后的 DDW1 系统定位结果数量较 ADTD 系统增加了约 93%。在匹配的定位结果中, 具有相同电流极性的个数 M 为 62981, 极性相同率为 96.4%。

表 2 展示了两个系统匹配的地闪定位结果在时间、距离、电流以及参与站点

数方面的绝对偏差统计结果。匹配定位结果的时间绝对偏差标准差较大，约为算术平均值的 3 倍，表明存在一些数值差异较大的情况，反映了一致性较差。相比之下，匹配的距离和电流绝对偏差较小且较为稳定。匹配的参与定位计算站点数偏差的算术平均值为 5.12，表明 DDW1 系统组网参与的站点数多于 ADTD 系统组网参与的站点数，这与两系统的站网密度差异相关。

表 2 匹配的地闪定位的一致性统计结果

Table 2. Consistency Statistics of Matched Cloud-to-Ground Lightning Location Results

参量	算术平均值	标准差
时间绝对偏差	8.78 μ s	23.40 μ s
距离绝对偏差	2.18 km	2.06 km
电流绝对偏差	7.72 kA	9.12 kA
参与站点数偏差	5.12	1.84

图 4 展示了 2022 年 6 月 16 日至 9 月 15 日 ADTD 和 DDW1 系统的所有地闪定位结果随时间的变化情况（非匹配结果）。可看出，两者的分布呈相似的双峰形态，峰值通常出现在夜间，而谷值则在正午前后。DDW1 定位结果的波峰分别出现在 0:00-1:00 和 17:00-18:00，峰值均为 4.2×10^4 次/h。而 ADTD 定位结果的波峰分别出现在 3:00-4:00 和 17:00-18:00，峰值分别为 2.2×10^4 次/h 和 1.8×10^4 次/h。在各相应时间段内，DDW1 系统对地闪的探测结果约为 ADTD 的两倍，表明 DDW1 系统在地闪探测方面的能力有所增强。

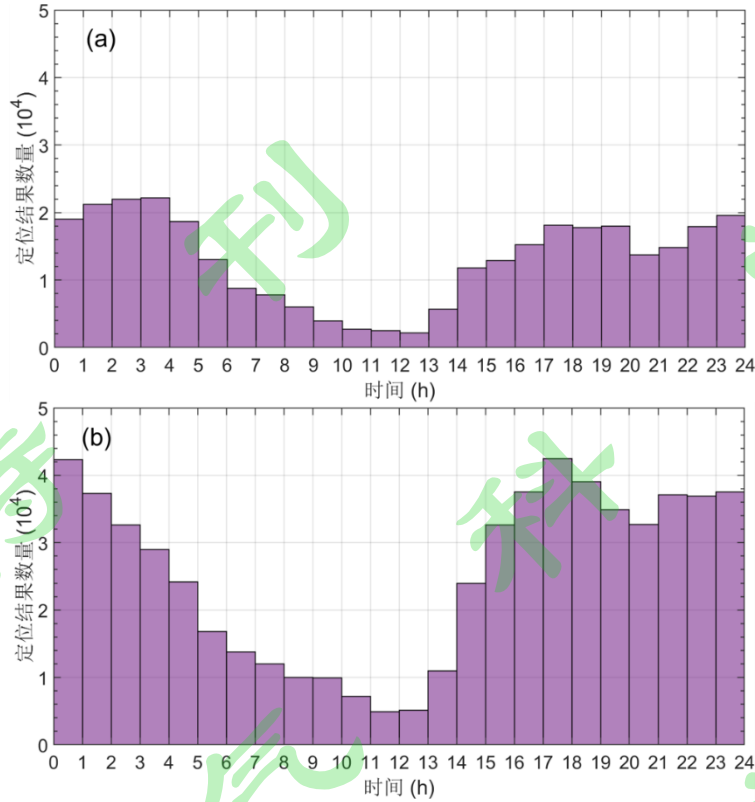


图 4 ADTD (a) 和 DDW1 (b) 系统地闪定位结果随时间的变化

Figure 4. Temporal Variation of Cloud-to-Ground Lightning Location Results in ADTD (a) and DDW1 (b) Systems

根据数理统计方法, 本文采用网格法进行地闪密度的计算, 其中网格大小为 $20\text{ km}\times 20\text{ km}$ 。图 5 展示了 ADTD 系统和 DDW1 系统在 2022 年 6 月 16 日至 9 月 15 日定位到的地闪密度分布图 (非匹配结果)。可看出, 两种系统定位到的地闪主要分布在四川省的中、东部地区, 这与卜俊伟和张琨 (2022) 中的地闪密度分布相似。ADTD 系统定位到的最高地闪密度为 $4.6\text{ 次}/\text{km}^2$, 而 DDW1 定位到的最高地闪密度为 $10.8\text{ 次}/\text{km}^2$, 主要集中在四川省中部地区。此外, DDW1 系统在四川省东部地区和南部地区的地闪密度也显著高于 ADTD 系统。因此, 综合来看, DDW1 系统 (78 个站点) 比 ADTD 系统 (19 个站点) 对四川省大部分地区地闪的探测能力有所增强。

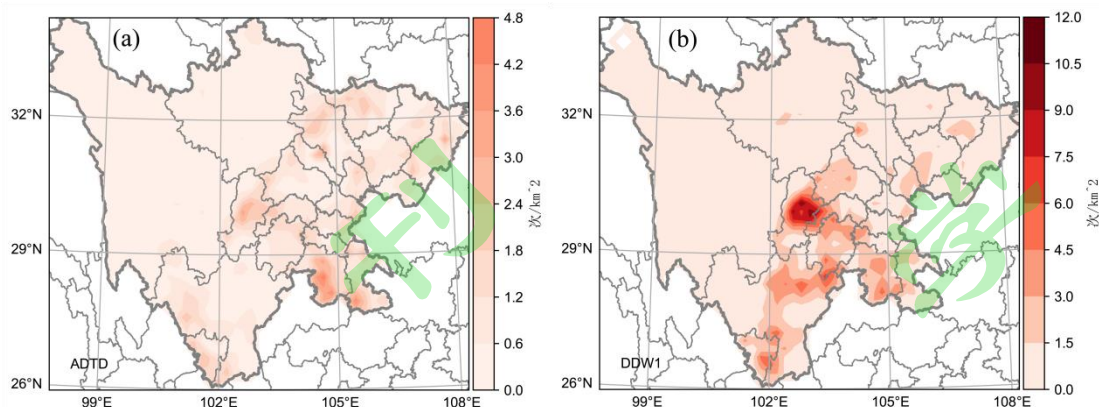


图 5 2022 年 6 月 16 日至 9 月 15 日 ADTD (a) 和 DDW1 (b) 系统探测的地闪定位结果的密度分布

Figure 5. Density Distribution of Cloud-to-Ground Lightning Location Results Detected by ADTD (a) and DDW1 (b) Systems from June 16 to September 15, 2022

根据 2002 年《中华人民共和国气候图集》的四川省年均雷暴日分布图推算, 该省年雷暴日约为 50 至 100+天, 其中, 西部地区的年雷暴日约为 70 至 100+天, 相对于东部地区更多。然而, 两种系统在西部地区的定位数据较少, 反映出在该地区的探测能力相对较低。考虑到站网的分布, 尽管 DDW1 在西部拥有更多的站点, 但该地区的地闪密度分布并未显著增大, 特别是在山区。这表明 DDW1 设备在山地地形的影响下容易受到限制, 导致其对西部山区的探测效率较低。因此, 设备制造商应该对 DDW1 在山区的探测能力进行进一步改进和提升。

图 6 展示了 2022 年 6 月 16 日至 9 月 15 日 ADTD 和 DDW1 系统定位得到的地闪峰值电流强度分布结果 (非匹配结果)。两个系统对地闪的正负极性电流均呈现近似的单峰偏态分布。ADTD 系统地闪的正极性电流峰值位于 20~30 kA 区间, 0~10 kA 和 >100 kA 区间的数量均比较少, 平均电流强度为 44.9 kA。负极性电流峰值位于 -30~-20 kA 区间, -10~-0 kA 和 >-150 kA 区间的数量也较少, 平均电流强度为 -40.3 kA。不同于 ADTD 系统, DDW1 系统正、负极性电流峰值分别位于 10~20 kA 区间和 -20~-10 kA 区间。平均电流强度分别为 19.3 kA 和 -23.7 kA。值得注意的是, ADTD 系统反演得到的最大正负地闪强度均接近 800 kA, 而 DDW1 系统的最大值约为 210 kA。经咨询厂家, 了解到 DDW1 系统会剔除强度大于 500 kA 的地闪, 并且根据人工引雷评估结果调整了电流反演公式中的系数, 而 ADTD 系统则没有相关处理。厂家利用自建的 DDW1 试验网的长期历史

数据进行分析 and 对比，发现 500kA 以上地闪定位数据质量较差，因此剔除这些数据。这一决策基于数据质量控制的考量，旨在确保结果的可靠性和准确性。相比之下，ADTD 设备是更早期的型号，其质控方法较为初级，因其开发时相关质控技术尚未完善。尽管如此，ADTD 目前仍作为业务设备在使用。根据业务设备的操作规定，其原始数据需要被完整保留。

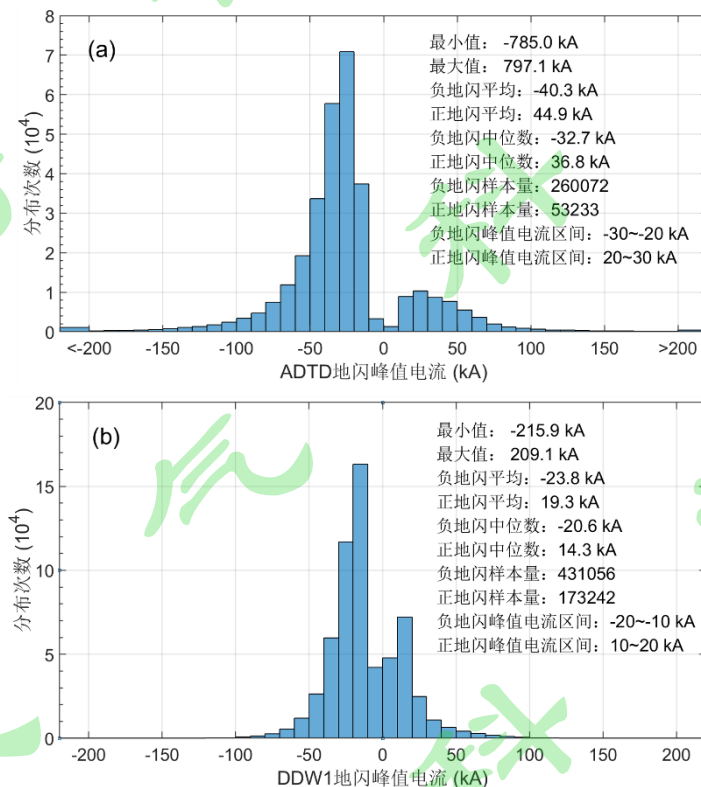


图 6 ADTD (a) 和 DDW1 (b) 地闪峰值电流强度分布图

Figure 6. Peak Current Intensity Distribution of Cloud-to-Ground Lightning Detected by ADTD (a) and DDW1 (b) Systems

本文的目的在于比较 DDW1 与 ADTD 业务设备在数据处理和质控方法上的差异。正由于 DDW1 采用了先进的质控技术，而 ADTD 未能应用这些方法，两者在数据质量和可用性上呈现明显的不同。这种对比有助于我们更深入理解两种设备的性能和适用范围，从而为未来的技术升级和改进提供参考。

将两个系统匹配的地闪回击的电流峰值进行拟合后发现，DDW1 系统的正、负回击峰值电流强度均约为 ADTD 的 1.04 倍，拟合优度分别为 0.86 和 0.83，如图 7 所示。

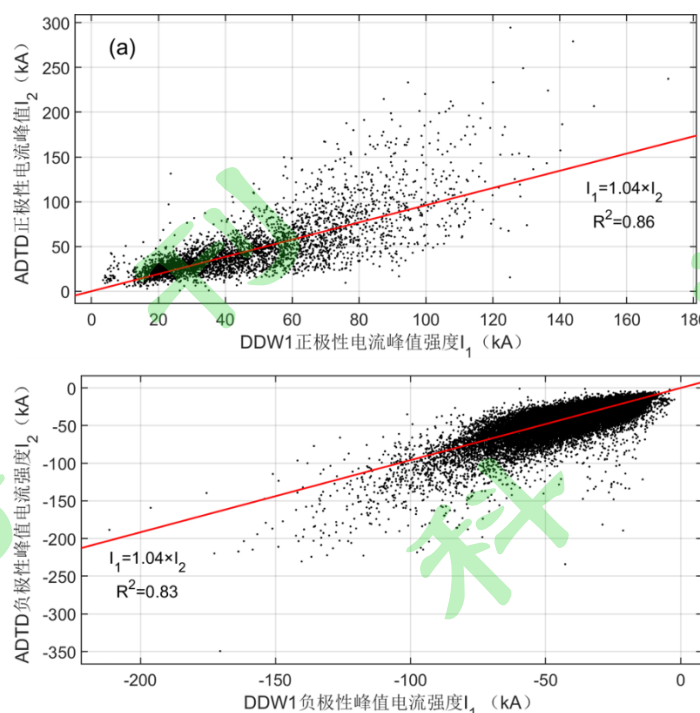


图 7 DDW1 和 ADTD 匹配地闪的峰值电流强度的对比

Figure 7. Comparison of Peak Current Intensity of Matched Cloud-to-Ground Lightning Detected by DDW1 and ADTD Systems

4.2.3 回击数据一致性分析结果

图 8(a)展示了同址 17 个站点两种设备匹配的回击时间绝对偏差统计结果。所有站点的绝对偏差算术平均值不超过 $8 \mu\text{s}$ ，与定位时间偏差均值接近，其中红原、理县、遂宁和雅安的标准差略微偏大，分别为 $5.8 \mu\text{s}$ 、 $7.0 \mu\text{s}$ 、 $4.6 \mu\text{s}$ 和 $5.0 \mu\text{s}$ ，其余站点相对稳定。图 8 (b) 给出了同址 17 个站点匹配的后过零点时间绝对偏差。可看出，大多数站点的偏差算术平均和标准差均小于 $30 \mu\text{s}$ 。然而，甘孜、九龙、南部和雅安站的标准差较大，分别为 $82.2 \mu\text{s}$ 、 $112.0 \mu\text{s}$ 、 $168.8 \mu\text{s}$ 和 $245.2 \mu\text{s}$ 。图 8 (c) 呈现了同址 17 个站点匹配的峰点时间绝对偏差。值得注意的是，南部站点的峰点时间绝对偏差的算术平均值和标准差最大，分别为 $15.7 \mu\text{s}$ 和 $247.9 \mu\text{s}$ 。小金和自贡站的标准差也较大，分别为 $41.1 \mu\text{s}$ 和 $31.0 \mu\text{s}$ 。为了更好地对比其他站点，去掉了南部、小金和自贡三个站点较大的标准差，结果如图 8 (d) 所示。从图中可以看到，九龙、小金和雅安站的偏差算术平均值高于 $5 \mu\text{s}$ ，分别为 $5.2 \mu\text{s}$ 、 $7.1 \mu\text{s}$ 和 $5.9 \mu\text{s}$ 。其他站的偏差算术平均值均低于 $5 \mu\text{s}$ 。尽管达川站的偏差算术平均值较低，但标准差较大，为 $16.5 \mu\text{s}$ 。此外，康定、理塘和壤塘站的标准差也相对较大，分别为 $10.8 \mu\text{s}$ 、 $7.4 \mu\text{s}$ 和 $6.9 \mu\text{s}$ 。相比之下，马尔康站

的算术平均值和标准差均最小，一致性相对最好。鉴于两个设备端对波形判别和
处理方法存在差异，导致两者时间指标出现一定差异，即系统偏差。同时，考虑
到复杂地形因素对峰点时间的时延影响，因此同址两设备回击时间绝对偏差的一
致性在可接受范围内。

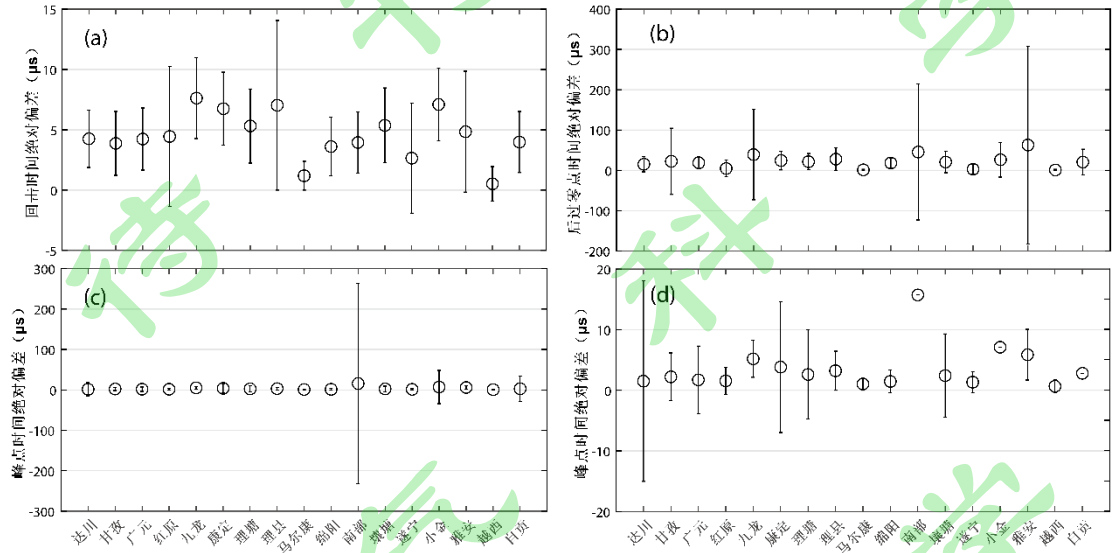


图 8 同址 17 个子站两种系统匹配的回击相关统计结果 (a) 回击时间绝对偏差, (b) 后过
零点时间, (c) 峰点时间, (d) 不考虑南部、小金和自贡的峰点时间

Figure 8. Correlated Statistical Results of Matched Return Strokes from Two Systems at 17
Collocated Substations

a) Absolute Deviation of Return Stroke Time, b) Post-Zero-Crossing Time, c) Peak Time, d) Peak
Time Excluding Nanbu, Xiaojin, and Zigong.

图 9 (a) 呈现了同址 17 个站点两种设备匹配的归一化回击电场绝对偏差统计结果。除雅安站外，其余站点的偏差算术平均值和标准差均未超过 0.4。整体而言，相对于归一化上限值 1，这仍然较大，表明同址两种设备的回击电场绝对偏差的一致性较差。雅安站的一致性最差，其算术平均值约为 0.7。通过检查雅安站的回击电场数据发现，在 ADTD 观测结果中有较多的饱和数据（强度值为 15），而相应时刻 DDW1 数据未饱和，导致差异较大。图 9 (b) 展示了同址 17 个站点匹配的回击方位角绝对偏差。可看出，方位角偏差算术平均值均比较大，大部分平均偏差介于 150-200°之间。其中，理县的标准差最大，一致性最差。而马尔康、遂宁和越西的方位角偏差算术平均值较小，低于 50°。尤其是越西的方位角偏差最小，为 15.5°。总体而言，两种设备的方位角一致性不理想，需要改

进对方位角的探测。通过将广东省 DDW1 观测网的定位结果和相关波形与广州从化的引雷资料对比检验，我们发现 DDW1 方位角处理算法存在问题。方位角信息对于 3 站同步定位结果有显著影响，今后应进一步分析并解决该问题，以提高定位结果的精度和可靠性。图 9 (c) 呈现了同址 17 个站点匹配的归一化南北峰值磁场绝对偏差统计结果。类似地，雅安站的一致性最差，该站点的偏差算术平均值为 0.6395。其他站点的偏差算术平均值均不超过 0.55。理县和雅安站偏差的标准差略大，分别为 0.6395 和 0.5418。其余站点的偏差标准差不超过 0.33。整体而言，相对于归一化上限值 1，依然较大，表明同址两种设备的南北峰值磁场绝对偏差的一致性较差。图 9 (d) 给出了同址 17 个站点匹配的东西峰值磁场绝对偏差统计结果。东西峰值磁场偏差的变化规律与南北峰值磁场几乎一致。总体而言，同址两种设备的磁场数据的一致性同样较差。因此，建议定期对 DDW1 和 ADTD 设备的磁场测量装置进行校准。

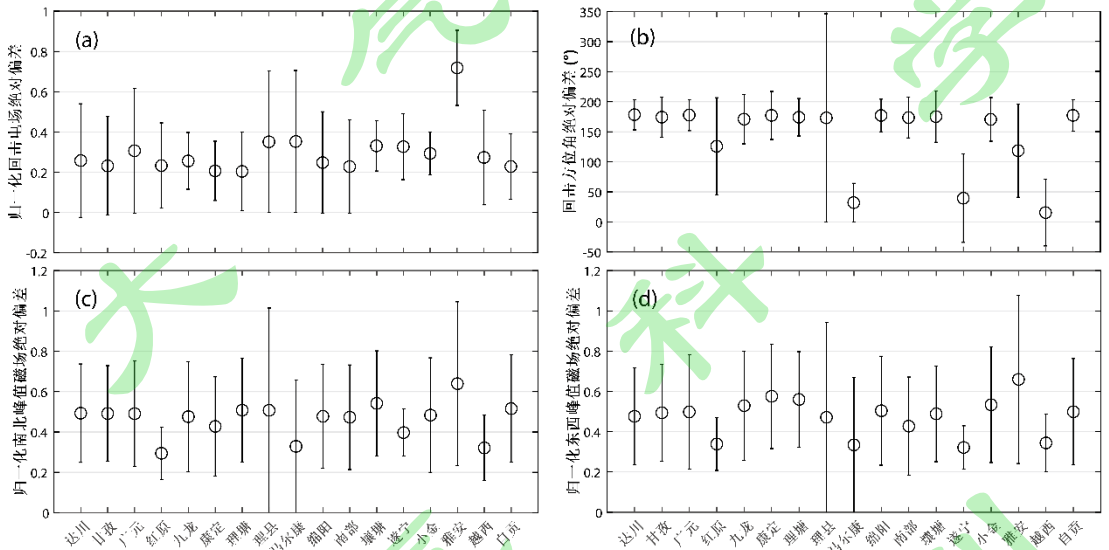


图 9 同址 17 个子站两种系统匹配的回击相关统计结果 (a) 归一化电场绝对偏差, (b) 方位角绝对偏差, (c) 归一化南北峰值磁场绝对偏差, (d) 归一化东西峰值磁场绝对偏差

Figure 9. Correlated Statistical Results of Matched Return Strokes from Two Systems at 17 Collocated Substations
a) Absolute Deviation of Normalized Electric Field, b) Absolute Deviation of Azimuth, c) Absolute Deviation of Normalized North-South Peak Magnetic Field, d) Absolute Deviation of Normalized East-West Peak Magnetic Field.

图 10 (a) 展示了四川省 ADTD 设备在 6 月 16 日至 9 月 15 日期间探测到的

所有回击随时间的分布。可看出，回击时变曲线呈单谷分布，3 点以后逐渐减少，谷值出现在 12-13 点，总数不超过 3 万次。之后逐渐增多。16:00-19:00 子站探测到的回击数量较多，超过 16 万次/小时。这一分布规律与陈小尘等（2022）中描述的基本相似。ADTD 所有子站探测到的回击总数为 2595290。图 10（b）展示了四川省 DDW1 设备在相同时间段内探测到的所有回击随时间的分布。其回击分布规律与 ADTD 子站回击分布规律相似，呈近似双峰分布。峰值出现在 7:00-8:00 和 19:00-20:00，谷值位于 11:00-13:00。DDW1 所有子站探测到的回击总数为 78816285，单站平均探测回击数约为 43787 次/小时。

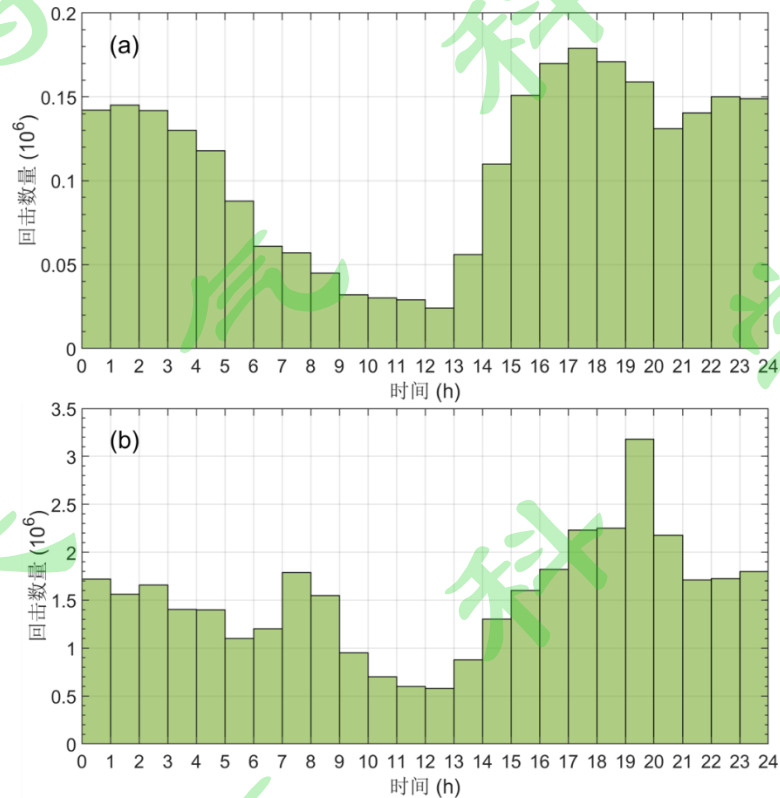


图 10 ADTD 子站(a)和 DDW1 子站(b)回击探测结果随时间的分布

Figure 10. Temporal Distribution of Return Stroke Detection Results from ADTD Substations (a) and DDW1 Substations (b)

4.3 自评估结果

2022 年 ADTD 定位结果中共筛选出 648507 个多站定位数据，满足同步站点数 ≥ 5 且峰值电流强度 ≥ 10 kA。图 11 展示了 19 个子站的回击捕获率。ADTD 子站的平均回击捕获率为 25.8%（约 1/4），最高为达川站（45.7%），最低为马尔康站（0%）。在距离马尔康站半径 200 km 范围内共有 21784 个多站定位结果，但该站 ADTD 设备仅探测到了其中的 2 次回击，因而回击捕获率近乎为 0%。进一

步检查原始数据发现，马尔康站运行异常。

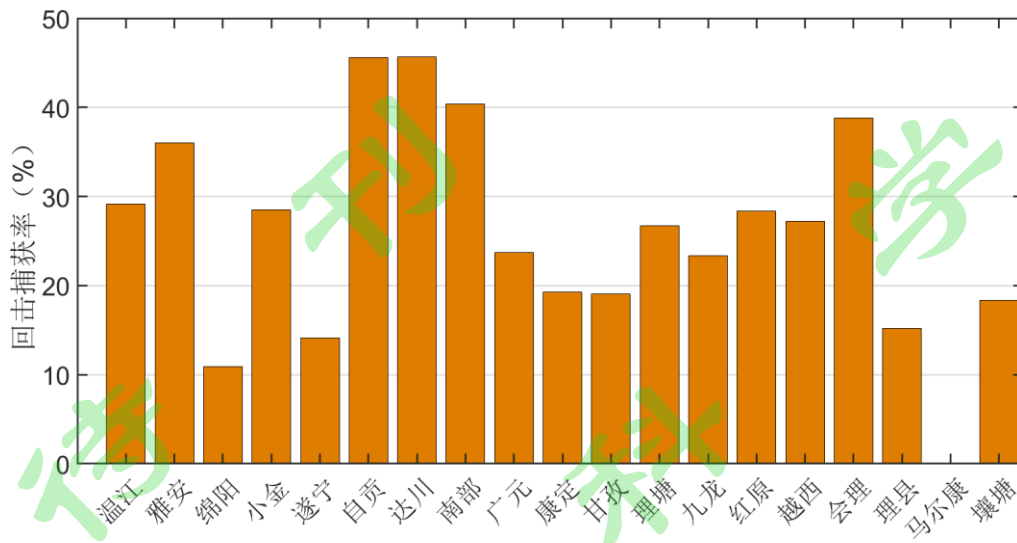


图 11 ADTD 子站的回击捕获率

Figure 11. Return Stroke Capture Rate of ADTD Substations

DDW1 系统共筛选出 7973788 个满足条件的多站定位数据，78 个 DDW1 子站的回击捕获率如图 12 所示。可看出，所有子站的回击捕获率均不超过 15%，最高为邻水站（11.92%），最低为雅安站（0.4%）。在距离雅安站半径 200 km 范围内共有 179159 个满足条件的多站定位结果，然而，该站 DDW1 设备仅探测到了其中的 716 次回击，导致回击捕获率为 0.4%。通过检查原始数据发现，与状态数据持续时间比，其回击数据持续时间较短，间隔较大，同样说明该站设备运行异常。此外，位于山区的西昌、米易与仁和站回击捕获率均低于 1%。

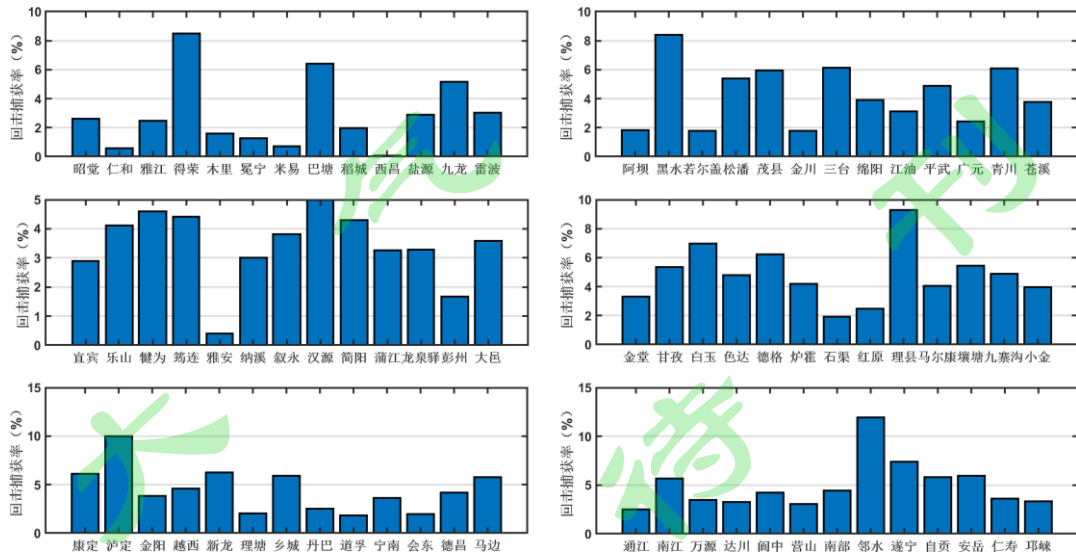


图 12 DDW1 子站的回击捕获率

Figure 12. Return Stroke Capture Rate of DDW1 Substations

位于川西高山高原区的德格和石渠站在定位中的参与次数是所有子站中最低的，均低于 1 万次。相反，犍为、马边、乐山、雷波、越西、自贡、汉源和宜宾站参与定位的次数最多，均超过 20 万次。然而，这些站点的回击捕获率仍较低，约为 5%。各个子站很可能受到当地电磁干扰的影响。由于 DDW1 设备的探测灵敏度相比 ADTD 设备更高，因此更容易受到较弱背景电磁噪声的干扰。未来，我们应重点提升设备的抗干扰能力，同时加强对电磁探测环境的维护，以确保观测数据的准确性和可靠性。整体来看，尽管 DDW1 子站对回击的捕获率低于 ADTD 子站，但正如前文所述，两个系统的自评估结果之间不能直接比较。它们仅仅描述了各自系统的子站对回击的探测能力。

地形和粗糙地表面会导致回击产生的低频/甚低频电磁波强度衰减，同时波形上升沿变得缓慢。随着传播距离的增加，波形的上升沿时间也会变长。这种波形畸变会导致回击探测和多站匹配的效果变差。目前，DDW1 和 ADTD 系统均未考虑这种影响。未来的研究应重点开发回击电磁波传播时间修正算法，以校正峰点到达时间，从而提高 DDW1 系统的回击定位能力。

5. 总结和讨论

本文对比分析了四川省 ADTD 系统和升级后 DDW1 系统在山区和平原地带的站网覆盖范围和站间距特征以及两个系统在 2022 年的观测数据。研究主要聚焦于与雷达观测资料对比、同址不同型号设备的数据一致性对比以及设备自评估这三个方面，从而得到以下结论：

1. 四川省地形条件对闪电定位站网的覆盖特征与空间分布具有显著影响。山区复杂的地形导致站点间距变化较大，各系统的覆盖特征与均匀性表现不一；而在平原地带，两种系统均能在较小区域内部署相对均匀的监测站网，展现出较优的闪电监测与定位性能。这些差异为后续优化站点布局和提升雷电探测精度提供了重要的参考依据。

2. 随着四川省新建 DDW1 设备数量的增加，相比 ADTD 系统，DDW1 系统在地闪数、回击数等方面的探测能力有明显提升，表现出对雷暴过程的持续观测、定位和追踪能力。此外，DDW1 设备的运行稳定性较为可靠。

3. 状态数据方面，除甘孜站外，两系统同址 16 个站点的匹配触发阈值展现出良好的一致性。15 个同址站点在 GPS 误差放大因子正确率和噪声通过率上的

一致性程度高。12 个同址站点在晶振偏差值上具有较好的一致性。定位结果方面，DDW1 和 ADTD 系统的地闪定位结果时间分布一致，呈现双峰分布，峰值出现在夜间，谷值位于正午前后。DDW1 系统在四川省大部分地区的地闪密度要高于 ADTD 系统，对正、负地闪的探测结果均高出约一倍，但仍存在对四川省西部雷暴的探测能力不足的问题。ADTD 探测的地闪的正、负极性电流峰值分别位于 20~30 kA 区间和-30~-20 kA；而 DDW1 则相应分别为 10~20 kA 区间和-20~-10 kA 区间。DDW1 的正、负回击峰值电流强度均约为相应匹配 ADTD 的 1.04 倍。回击数据方面，16 个同址两种设备的归一化回击电场、归一化南北峰值磁场和归一化东西峰值磁场偏差的算术平均值分别不超过 0.4、0.55 和 0.55，一致性较差。对于时间信息，同址两种设备间的回击时间的绝对偏差算术平均值不超过 8 μ s；14 个同址两种设备的峰点时间偏差的算术平均值均低于 5 μ s，后过零点时间偏差算术平均和标准差小于 30 μ s。此外，12 个同址两种设备的回击方位角的平均偏差介于 150-200°之间，一致性差。同样，DDW1 子站与 ADTD 子站的回击时间分布规律相似，均呈近似双峰分布，双峰值出现在夜晚，单谷值位于中午。自评估方面，ADTD 子站的平均回击捕获率为 25.8%（约 1/4），最高为达川站（45.7%）；78 个 DDW1 子站的回击捕获率均不超过 15%，最高为邻水站（11.92%）。

4. 存在三个主要问题：①山区探测能力不足，两种型号设备在山区的探测能力都有待提升，特别是 DDW1 设备。②数据一致性不足，两种型号设备的状态、定位和回击等数据的一致性方面存在问题。观测值间差异较大，因此在组网定位处理前需要对设备观测值进行检测和校准。此外，设备型号更换可能对密度分布、电流强度等资料的均一性产生影响，这应该在后续应用或服务中得到考虑，或者将均一性作为元数据信息提供给用户。③方位角探测精准度不足，为提升 2-3 站同步定位的精准度，需要改进对方位角的探测方法。这有助于提高地闪定位的准确性。

5. 主要建议包括：①今后应研究和开发复杂地形下回击脉冲传播时间修正算法和探测设备的计量校准技术方法，并应用到国家雷电观测网中。②加强两种设备的运维保障和电磁探测环境的维护。③设备制造商应提高设备的抗干扰能力和质量控制水平。这有助于提高回击数据的匹配效率，并减少错误数据污染定位计算。

参考文献:

- 陈小尘, 魏庆, 张伟. 2022. 雷电活动的时空分布特征分析[J]. 电子技术, 51(06): 246-247.
- Chen Xiaochen, Wei Qing, Zhang Wei. 2022. Analysis of Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Lightning Activity[J]. Electronic Technology (in Chinese), 51(06): 246-247.
- 冯民学, 周宇, 虞敏, 等. 2015. 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, 15(7): 79-84. Feng Minxue, Zhou Yu, Yu Min, et al. 2015. Evaluation of Jiangsu ADTD Lightning Location System Data in 2013[J]. Science Technology and Engineering (in Chinese), 15(7): 79-84.
- 李庆申, 陈宇涵, 张阳, 等. 2020. DDW1 闪电定位系统及性能评估[J]. 气象科技, 48(6): 788-794. Li Qingshen, Chen Yuhan, Zhang Yang, et al. 2020. DDW1 Lightning Location System and Performance Evaluation[J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 48(6): 788-794.
- 卜俊伟, 张琨. 2022. 四川省云地闪和三维闪电监测系统对比分析[J]. 农业灾害研究, 12(1): 81-83. Pu Junwei, Zhang kun. 2022. Comparative Analysis of Cloud-ground Lightning and Three-dimensional Lightning Monitoring System in Sichuan Province. Journal of Agricultural Catastrophology (in Chinese), 12(1): 81-83.
- 孙婵, 徐国强. 2019. 闪电定位和雷达观测资料在云分析中的应用及数值试验[J]. 大气科学, 43(1): 131-141. Sun Chan, Xu Guoqiang. 2019. Application of Lightning Location and Radar Data in Cloud Analysis System and Numerical Experiments[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(1): 131-141.
- 孙凌, 陈志雄, 徐燕, 等. 2019. 北京一次强飑线过程的闪电辐射源演变特征及其与对流区域和地面热力条件的关系[J]. 大气科学, 43(4): 759-772. Sun Ling, Chen Zhixiong, Xu Yan, et al. 2019. Evolution of Lightning Radiation Sources of a Strong Squall Line over Beijing Metropolitan Region and Its Relation to Convection Region and Surface Thermodynamic Condition[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(4): 759-772.
- 阎金磊, 赵阳, 脱宇峰, 等. 2024. 中国陆地闪电活动与气象要素关系的分析[J]. 大气科学. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2308.23048 Yan Jinlei, Zhao Yang, Tuo Yufeng et al. 2024. Study on the spatio-temporal distribution of land lightning and related meteorological factors

in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese). DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2308.23048

王东方, 孙竹玲, 袁善锋, 等. 2020. 北京多频段闪电三维定位网及一次雷暴过程的闪电时空演化特征[J]. 大气科学, 44(4): 851–864. Wang dongfang, Sun Zhuling, Yuan shanfeng et al. 2020. Beijing Broadband Lightning NETwork and the Spatiotemporal Evolution of Lightning Flashes during a Thunderstorm[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(4): 851–864.

王芳, 郅秀书, 崔雪东. 2017. 西北太平洋地区热带气旋闪电活动的气候学特征及其与气旋强度变化的关系[J]. 大气科学, 41(6): 1167-1176. Wang fang, Qie Xiushu, Cui Xuedong. 2017. Climatological Characteristics of Lightning Activity within Tropical Cyclones and Its Relationship to Cyclone Intensity Change over the Northwest Pacific[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(6): 1167-1176.

王宇, 郅秀书, 王东方, 等. 2015. 北京闪电综合探测网 (BLNET): 网络构成与初步定位结果 [J]. 大气科学, 39(3): 571-582. Wang Yu, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et al. 2015. Beijing Lightning NETwork (BLNET): Configuration and preliminary results of lightning location [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(3): 571–582.

王志超, 庞文静, 梁丽, 等. 2018. ADTD 闪电定位网在北京地区定位效率的自评估[J]. 气象科技, 46(4): 638-643, 664. Wang Zhichao, Pang Wenjing, Liang Li, et al. 2018. Self-Evaluation on Detection Efficiency of ADTD Lightning Location Network in Beijing[J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 46(4): 638-643, 664.

徐黄飞, 李建勇, 周嘉健, 等. 2023. 基于 DDW1 全闪三维闪电定位系统的闪电活动探测分析[J]. 热带气象学报, 39(4): 643-654. Xu Huangfei, Li jianyong, Zhou jiajian, et al. 2023. Detection and Analysis of Lightning Activities Based On DDW1 Total-Flash 3D Lightning Location System[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 39(4): 643-654.

赵焯, 徐国强, 黄守友, 等. 2023. FY-4A 卫星闪电资料与 ADTD 闪电资料在四川省冕宁暴雨中的对比分析及数值模拟[J]. 大气科学, 47(3): 769–785. Zhao Chuo, Xu Guoqiang, Huang shouyou, et al. 2023. Comparative Analysis and Numerical Simulation of Lightning Detection Data from FY-4A Satellite and ADTD for Rainstorm in Mianning, Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(3): 769–785.

张华明, 钱勇, 刘恒毅, 等. 2020. 山西省两套闪电定位系统地闪监测结果对比[J]. 干旱气象, 38(2): 346-352. Zhang Huaming, Qian Yong, Liu Hengyi, et al. 2020. Comparative Analysis of Detected Cloud-to-ground Lightning Data by Two Lightning Positioning Systems in Shanxi Province[J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 38(2): 346-352.

张悦, 吕伟涛, 陈绿文, 等. 2021. 粤港澳大湾区两套闪电定位系统地闪探测性能的对比分析[J]. 热带气象学报, 37(3): 409-418. Zhang Yue, Lyu Weitao, Chen Lyuwen, et al. 2021. Comparative Analysis of Cloud-to-Ground Lightning Detection By Two Lightning Location Systems in Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 37(3): 409-418.

Azadifar M, Rachidi F, Rubinstein M, et al. 2016. Evaluation of the performance characteristics of the European Lightning Detection Network EUCLID in the Alps region for upward negative flashes using direct measurements at the instrumented Sntis Tower[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 121(2):595-606. doi:10.1002/2015JD024259.

Bourscheidt V, Cummins K L, Pinto Jr O, et al. 2012. Methods to overcome lightning location system performance limitations on spatial and temporal analysis: Brazilian case[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 29(9): 1304-1311.

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 U.S. NLDN. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 51(3):499-518.

Diendorfer G. 2016. A review of 25 years of lightning research in Austria from 1991-2015[C]. World meeting on Lightning, Cartagena, Colombia.

Idone V P, Davis D A, Moore P K, et al. 1998a. Performance evaluation of the U.S. National Lightning Detection Network in eastern New York: 1. Detection efficiency[J].Journal of Geophysical Research Atmospheres, 103(D8):9045-9056. DOI:10.1029/98JD00154.

Idone V P, Davis D A, Moore P K, et al. 1998b. Performance evaluation of the U.S. National Lightning Detection Network in eastern New York 2. Location accuracy[J].Journal of Geophysical Research Atmospheres, 103(D8):9057-9069.DOI:10.1029/98JD00155.

Murphy M J, Cramer J A, Said R K. 2021. Recent history of upgrades to the US National Lightning Detection Network[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 38(3): 573-585.

- Srivastava A, Tian Y, Qie X, et al. 2017. Performance assessment of Beijing Lightning Network (BLNET) and comparison with other lightning location networks across Beijing[J]. Atmospheric Research, 197: 76-83.
- WMO. 2018. Guide to meteorological instruments and methods of observation, Volume I: Measurement of meteorological variables (WMO-No. 8) [M]. World Meteorological Organization, 734pp.
- Wooi C L, Abdul-Malek Z, Ahmad N A, et al. 2016. Cloud-to-Ground Lightning in Malaysia: A Review Study[J]. Applied Mechanics and Materials, 818: 140-145.
- Xu M, Qie X, Pang W, et al. 2022. Lightning climatology across the Chinese continent from 2010 to 2020[J]. Atmospheric Research, 275: 106251.
- Yuan S, Qie X, Jiang R, et al. 2020. Origin of an Uncommon Multiple-Stroke Positive Cloud-to-Ground Lightning Flash with Different Terminations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125, e2019JD032098.
- Zhang Y, Lu W, Chen L, et al. 2016. Performance characteristics of the lightning location system of Guangdong-Hongkong-Macau after the upgrade in 2012[C]. the 24th International lightning detection Conference, San Diego, California, USA.
- Zhu Y, Stock M, Lapierre J, et al. 2022. Upgrades of the Earth networks total lightning network in 2021[J]. Remote sensing, 14(9): 2209.