

VLF/LF高精度三维闪电定位系统的建立与应用

曹敦波

民航新疆空中交通管理局空管中心气象中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年6月3日; 录用日期: 2024年7月11日; 发布日期: 2024年7月18日

摘要

为了加强对乌鲁木齐机场雷暴天气的监测和预警, VLF/LF高精度三维闪电定位系统分别布设在乌鲁木齐机场雷达站、阿什里、柴窝铺、呼图壁和阜康五个测站, 这样就可以重点保证对发生在该区域内的闪电位置等关键信号进行实时捕捉。本文介绍了该闪电定位系统的探测原理和方法、系统功能, 然后结合实际运行情况, 选取了一次雷暴天气过程中闪电定位仪探测的闪电活动分析。分析结果表明三维雷电探测系统的定位精度和探测效率较好, 弥补了机场多普勒天气雷达对强对流天气过程的实时监控和预警的不足。

关键词

三维闪电, 探测, 强对流

VLF/LF High Precision 3D Lightning Positioning System Establishment and Application

Dunbo Cao

Meteorological Center, Air Traffic Control Center, Xinjiang Air Traffic Administration Bureau of Civil Aviation, Urumqi Xinjiang

Received: Jun. 3rd, 2024; accepted: Jul. 11th, 2024; published: Jul. 18th, 2024

Abstract

In order to strengthen the monitoring and early warning of thunderstorm weather in Urumqi

文章引用: 曹敦波. VLF/LF 高精度三维闪电定位系统的建立与应用[J]. 自然科学, 2024, 12(4): 712-718.
DOI: 10.12677/ojns.2024.124081

Airport, the VLF/LF high-precision three-dimensional lightning positioning system, with the central station in Urumqi Airport radar station, and the other four stations in Ashli, Chaiwopu, Hutubi and Fukang, can focus on ensuring the real-time capture of lightning location and other key signals in this area. This paper introduces the detection principle, method and system function of the lightning positioning system, and then analyzes the lightning activity detected by the lightning locator in the course of a thunderstorm. The analysis results show that the positioning accuracy and detection efficiency of the three-dimensional lightning detection system are good, which makes up the deficiency of the real-time monitoring and early warning of the severe convection weather process of the airport Doppler weather radar.

Keywords

Three-Dimensional Lightning, Detection, Severe Convection

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雷电灾害是“联合国国际减灾十年”公布的最严重的十种自然灾害之一，极大影响并威胁着人们的生产生活和生命财产安全[1]。全世界每秒钟约有 46 次雷电发生，我国每分钟发生 70 余次雷电。雷电发生的随机性以及成灾的迅速性和影响广，已经受到了电力、气象等部门的关注。目前，我们对雷电监测预警的需求也是越来越大[2]。那么如何确定闪电发生位置和发展趋势，对雷电机理的认识和研究有着重要意义。

二维雷电探测网经过了几十年的发展，在民航安全运行保障方面已经做出了一定的贡献，但随着民航业务的快速发展，以及飞机起飞/降落频次的快速增加，已有的二维探测网由于探测能力低、定位精度较差、只能提供闪电的落地点位置、数据信息量小等诸多原因，无法更高精度地提升对短临灾害性天气监测以及预警预报能力[3][4]。最常用的气象探测设备多普勒天气雷达，其雷达资料也是只能反应云的一些特征，比如雷暴云的特征是回波强、云顶高等。通常，对陆地雷暴而言，云顶高度一般在 10 km 左右；海洋雷暴的对流深度可能更高，甚至达到 20 km。值得注意的是，雷暴产品只能反映的是哪一种天气过程，至于这种天气过程是否有闪电发生、发生多少闪电、在什么位置始发等等问题，作为雷达资料是无法回答这个问题的[5]。

VLF/LF (甚低频/低频)高精度三维闪电定位系统不仅涵盖了已有的二维雷电定位功能，而且具有更多的优点，同时克服了多站组网大数据高速采集过程的 GPS 同步问题，探测能力很强，能够对 300 km 范围内，超过 5 KA 的闪电的探测能力是 100%，为民航气象保障做更好更先进的气象保障。

2. 探测原理和方法

VLF/LF (甚低频/低频)高精度三维闪电定位系统由高增益、调频式雷电电/磁脉冲信号传感器实现对闪电激发的不同频段脉冲信号的实时捕获。然后，通过实验手段和各种电磁仿真技术，剔除复杂地形地貌和场地环境带来的电磁干扰。最后，将“波形相关”和“寻峰匹配”等关键定位技术相融合，并结合多频段磁信号和电信号在定位技术中的各自优势，实现对不同距离、不同类型闪电在三维空间发生发展的轨迹运动描绘。

站点分别布设在乌鲁木齐机场雷达站,阿什里、柴窝铺、呼图壁和阜康。每两个测站间的距离分布在 60 到 110 km 之间,对于计算精度有足够的保障。测站之间的地形相对平坦,可以避免复杂地形对信号传输产生的负面影响。另外,设备的安装严格遵守安装规范,并通过反复测试实现无人值守自动完成观测和数据的传输,保证足够的稳定性和可靠性。具体 5 个测站的布局如图 1 所示。

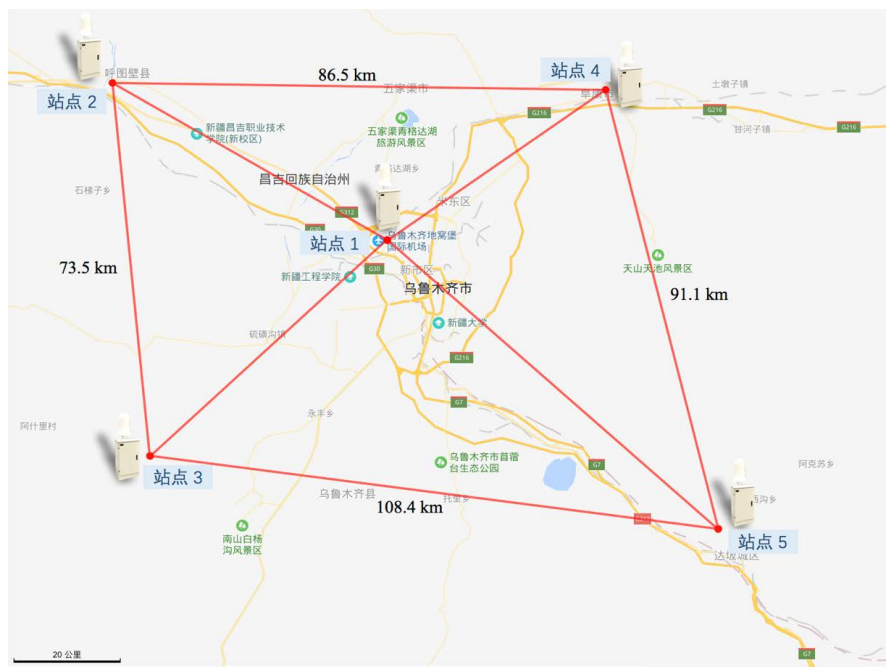


Figure 1. System station layout
图 1. 系统台站布局

雷电的放电过程是由一系列的电磁脉冲组成,通过布设在地面测站联网观测,实现了对一次闪电的 N 个脉冲进行准确定位,描绘了闪电的发生发展轨迹。该系统可能够刻画出精细的闪电通道的精细结构,如图 2 所示。

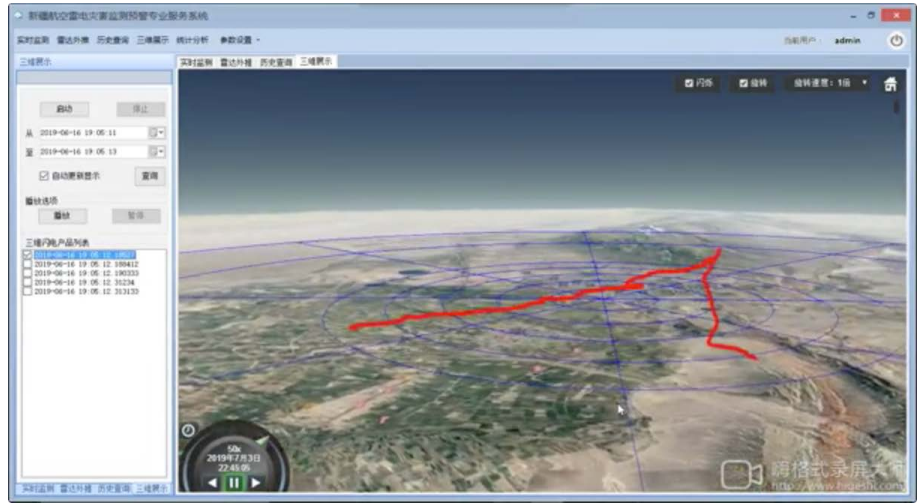


Figure 2. A case study of the 3D trajectory detection results of lightning channel development
图 2. 闪电通道发展的三维轨迹探测结果个例展示

当采取的传感器探测频段不同，那么我们得到的脉冲也不同。比如频段越高，点越多；点越多，描绘的雷电三维通道结构约精细。但是，如果频段越高，硬件传感器探测半径越小，那么受到的场地误差的影响也越大。结合地貌数据合成可视化三维图像，可直观看到不同高度不同方位的辐射源分布特点，具体定位原理示意图 3 所示。



Figure 3. Detection modes of 5 built system stations
图 3. 已建设的 5 个系统台站探测模式

下图 4 展示了系统对一次闪电事件的定位原理图。其中，黑色的圆柱表示探测站布局，由于闪电距离测站远近不同，则相应的到达时间不同，目前能获取的这种时间差的精度在纳秒量级。

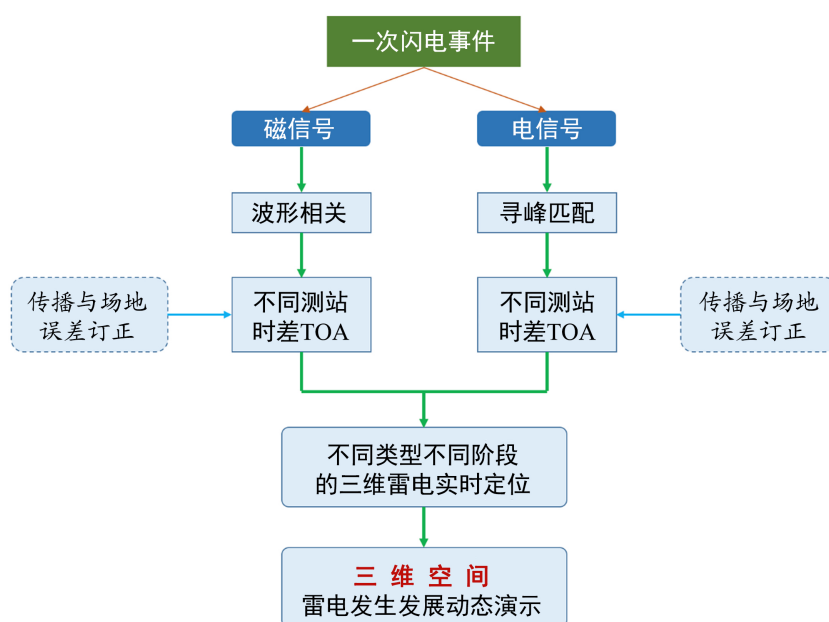


Figure 4. Overview of hardware and software algorithms of the system
图 4. 系统的硬件与软件算法构成概况

在围绕乌鲁木齐机场周围约 70~80 km 范围的五个观测点分布布设一个观测站,主要用来实时探测该区域内雷电发生发展的时间、地点、强度和三维结构特征等关键参量,具体测站布局的中心站在乌鲁木齐机场雷达站,其他四个测站分别在阿什里、柴窝铺、呼图壁和阜康,这样就可以重点保证对发生在该区域内的闪电位置等关键信号进行实时捕捉。

3. 系统功能

系统结合资料外推算法与数值预报算法,解决了多参数融合应用的技术难题,通过综合利用多普勒雷达、大气电场、雷电定位以及地面气象资料等,实现了 0~2 小时以内、每 6 分钟滚动预报未来雷电发生的概率、趋势、频数和强度,不仅涵盖了已有的二维雷电定位功能,而且具有更多的优点,具体如下:

- 1) 探测效率高, 300 km 范围、超过 5 kA 强度雷电的探测能力 100%。
- 2) 实时采集、记录和传输雷电信号全波形,克服了传统二维雷电阈值法的缺陷,提高了定位精度,平均定位精度 250 m 左右。
- 3) 利用变网格二维 FDTD 技术,解决了真实地形地貌孤立山体(群)对雷电电磁信号的遮挡和衰减,减小了雷电定位误差和强度估算精度,强度估算精度可达 96%以上。
- 4) 实时提供闪电发生发展的三维通道结构,能够真实地再现闪电事件,这对雷电灾害事故鉴定提供了强有力的支撑。
- 5) 实时提供闪电的释放的准静电场能量,这对实时鉴别雷电事故是至关重要的,如引起雷击火的主要参量是闪电释放的准静电场能量,不是雷电流峰值。
- 6) 借助三维 GIS 可视化技术,能够非常真实的再现闪电发生发展的三维特性,提供了雷电探测技术的科学趣味性。

4. 应用

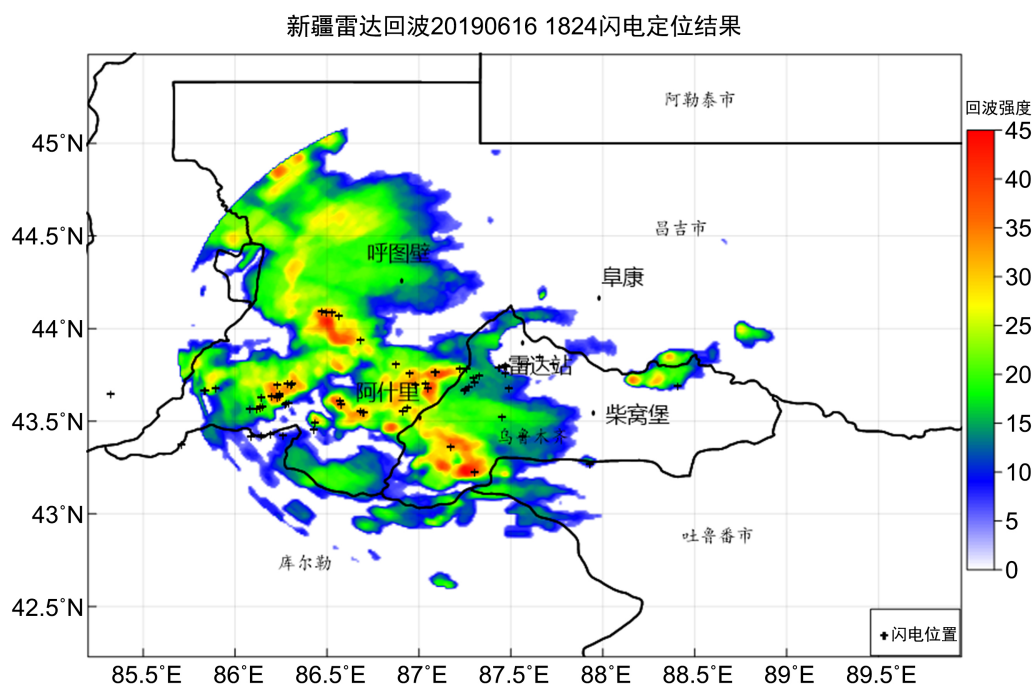


Figure 5. Superposition of radar echoes and lightning positions on June 16, 2019

图 5. 2019 年 06 月 16 日雷达回波与闪电位置叠加

经过 2019 年的全年此雷电探测网工作稳定, 数据传输也正常。闪电发生时, 常常会伴有强对流的发生。在不同的云层形成的闪电, 雷达回波表现出相对应的不同特征。我们对雷暴雷达回波强度图进行分析, 就得到闪电发生相对应的位置。雷达回波强度与三位定位闪电位置的叠加会发现, 三维定位闪电精度比较理想, 更能发现一些雷达探测不到的闪电, 见图 5 所示。

从以上雷电发生区域和雷达组合反射率回波叠加看出, 可以得出如下结论: 雷电主要发生在回波强度大于 30 dBz 的区域, 这样强的回波意味着云内的液态水含量是很足的。我们分析发现, 在强回波区域对应的云顶高度往往是超过了 10 km, 那么该区域就是强对流中心。

依据雷电起电的机制, 如要发生强起电过程, 使电荷发生分离就必须存在足够数量、大小的冰晶粒子以及足以使粒子上升到一定高度的上升气流。而云内有足够的水汽含量, 同时对流也足够强的话, 为闪电的发生提供了可能。如果雷达回波强度的叠加来看, 多数的雷电发生在强回波区, 佐证了统精度是理想的。

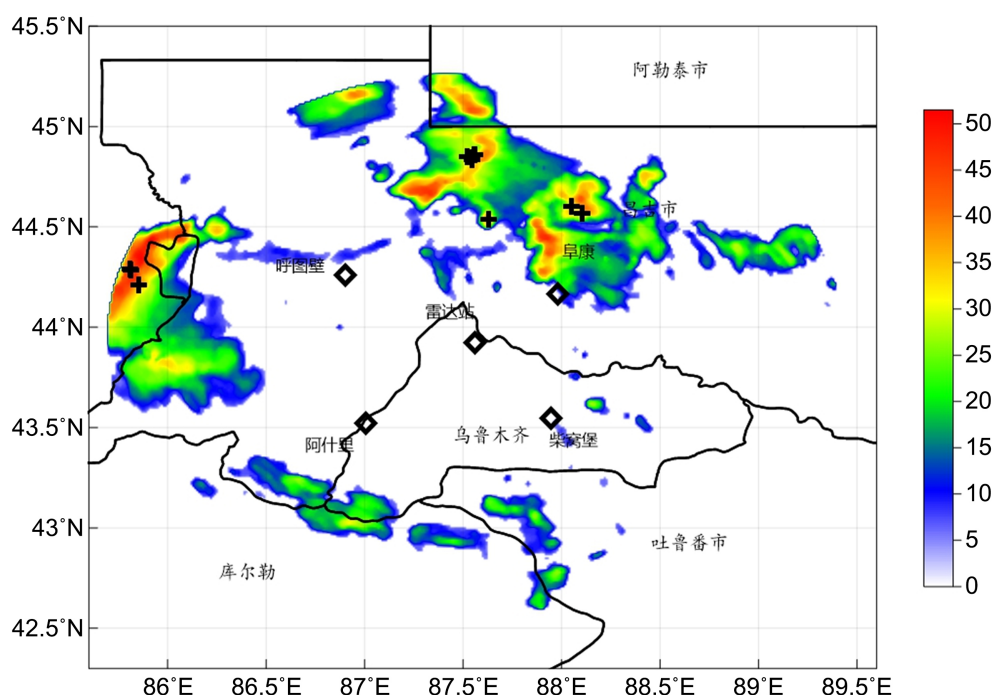


Figure 6. Radar echoes and lightning positions superimposed on July 10, 2019

图 6. 2019 年 07 月 10 日雷达回波与闪电位置叠加

对 7 月 10 号的雷达回波与闪电定位叠加图, 如图 6 分析, 我们就发现闪电发生于强雷达回波区域, 雷达回波强度是 35 dBz 左右, 根据上文的分析发现, 此区域内极易产生雷暴云, 所以闪电易于产生。

5. 结束语

VLF/LF 高精度三维闪电定位系统不仅涵盖了已有的二维雷电定位功能, 而且具有更多的优点, 克服了多站组网大数据高速采集过程的 GPS 同步问题, 能够对 300 km 范围内, 超过 5 KA 的闪电的探测能力是 100%, 分析结果表明三维雷电探测系统的定位精度和探测效率较好, 弥补了机场多普勒天气雷达对强对流天气过程的实时监控和预警存在不足, 为民航气象保障做更好更先进的气象保障。该系统是较新的探测设备, 维护保障方法和产品应用需要进一步的熟悉和掌握, 设备维护人员应大胆地探索和使用。

参考文献

- [1] 虞苏青, 周枫. ADTD 型闪电定位仪故障分析与处理[J]. 贵州气象, 2011, 35(6): 44-46.
- [2] 姜勇. 新型自动气象站技术保障原理及应用[J]. 气象水文海洋仪器, 2020, 37(1): 45-52.
- [3] 宋中玲, 张静. 新型自动气象站传感器工作原理及测试方法研究[J]. 自动化仪表, 2018, 39(7): 78-81.
- [4] 张朝明. 基于格雷码编码的 EL15-2C 型风向传感器维护方法及分析探讨[J]. 自动化技术与应用, 2021, 40(7): 112-115.
- [5] 赵勇, 李京, 张猛, 等. 一种气象站多类采集器测量辅助装置[P]. 中国专利, ZL202120189124.4. 2021-08-03.