Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

### 文章编号: 2095-4980(2025)06-0610-05

# 时间反转雷电辐射源定位的加速实现

杜双江,石立华\*,邱 实,李 云,赵迎诚

(陆军工程大学 电磁环境效应与光电工程国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘 要:为解决频域时间反转算法在雷电辐射源成像计算过程中计算量大、耗时长的问题, 提出一系列时间反转算法的优化加速方法。首先,引入图形处理单元(GPU)并行计算,并进一步拓 展为双卡GPU集群计算,同时采用CPU与GPU的多线程并发编程方法,覆盖彼此相互等待所带来 的时耗;其次,将最大能量搜索算法及相位差筛选算法等程序编写至GPU上,实现并行搜索及计 算相位差值;最后,将数据采集传输模块、GPU处理模块以及定位成像模块整合,实现雷电数据 从采集到定位成像的一体化功能。针对一段500 ms的雷电甚高频(VHF)数据,实测只耗时18 min, 比以往基于CPU单线处理进程快约703倍,而有效定位点数仅减少9.3%。

**关键词:** 雷电定位; 时间反转; 快速算法; GPU并行 中图分类号: TN011 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11805/TKYDA2023347

# Accelerated implementation of locating lightning radiation sources based on time reversal technique

DU Shuangjiang, SHI Lihua<sup>\*</sup>, QIU Shi, LI Yun, ZHAO Yingcheng (National Key Laboratory on Electromagnetic Environmental Effects and Electro-Optical Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** To address the issue of high computational load and long processing time in the imaging calculation process of lightning radiation sources using time-reversal algorithms in the frequency domain, a series of optimized acceleration methods for time-reversal algorithms are proposed. Firstly, the introduction of Graphics Processing Unit(GPU) parallel computing is further expanded to dual-GPU cluster computing, while adopting multi-threading concurrent programming methods of Central Processing Unit(CPU) and GPU to cover the time consumption caused by mutual waiting; secondly, the maximum energy search algorithm and phase difference filtering algorithm and other programs are written to the GPU to achieve parallel search and calculation of phase difference values; finally, the data acquisition and transmission module, GPU processing module, and positioning imaging module are integrated to achieve the integrated function from data collection to positioning imaging of lightning data. For a 500 ms segment of Very High Frequency(VHF) lightning data, the actual measurement only takes 18 minutes, which is about 703 times faster than the previous CPU single-line processing process, and the number of effective positioning points is only reduced by 9.3%.

Keywords: lightning localization; time reversal technique; fast algorithm; GPU parallel

近年来,时间反转算法在雷电定位领域有了充分的研究和发展,从最初的Mora等<sup>[1]</sup>首次将时间反转算法用 于雷电定位,到WANG等<sup>[2-3]</sup>系统地阐述了时域时间反转以及频域时间反转在宽带甚高频(VHF)雷电定位中的应

收稿日期: 2023-11-07; 修回日期: 2024-01-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977219; 42105077)

\*通信作者:石立华 email:lihuashi@aliyun.com

**引用格式:** 杜双江,石立华,邱实,等.时间反转雷电辐射源定位的加速实现[J].太赫兹科学与电子信息学报,2025,23(6):610-614. DOI:10.11805/ TKYDA2023347.

Citation format DU Shuangjiang, SHI Lihua, QIU Shi, et al. Accelerated implementation of locating lightning radiation sources based on time reversal technique[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(6):610-614. DOI:10.11805/TKYDA2023347.

用方法理论。在众多文献以及研究中<sup>[4-9]</sup>,该方法均表现出较好的定位性能,其在定位准确度,尤其是对弱辐射源的探测能力以及对闪电通道发展的精细化刻画能力上,均比基于干涉仪法<sup>[10]</sup>和到达时间法(Time Of Arrival, TOA)<sup>[11]</sup>等更优越。但时间反转算法是一种基于空间遍历搜索的算法,计算量大,耗时长,特别是对于宽带信号,当信号频点增多以及对空间网格进行细粒度划分后,计算量更是成倍增加,非常不适用于实际雷电定位系统中<sup>[12]</sup>。

为解决此问题,本文以频域时间反转为研究对象,根据该算法的特点,引入图形处理单元(GPU)并行计算对 其进行加速<sup>[13]</sup>,并进一步研究了并发编程以及双卡 GPU集群计算,为后续 GPU 的进一步升级和扩展铺设了基础。此外,本文采用基于相位差筛选及信号-干扰能量比(Signal-Interference Energy Ratio,SIER)筛选策略,进一 步加速时间反转的定位进程。为使时间反转算法能够有效地运用到实际系统中,本文研究并实现了时间反转算 法的硬件部署,通过将不同的硬件设备进行连接调试,初步实现了一套能够从数据采集到定位成像的硬件系统。 通过实测数据定位,该系统仅耗时 18 min,比以往基于 CPU 计算的算法快了约 703 倍,同时其成像质量较高,有 效定位点数较以往仅减少 9.3%。

### 1 系统与原理

# 1.1 硬件组成

定位系统的实物图如图1所示。数据采集模块为8通道数字采集卡,每个通道采样率均为250 Mbps,数据深度为16 bit,有效频段为30~100 MHz,同时具有预触发功能。采集卡的数据采集、存储、传输等功能由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)进行控制,前端通过同轴线与VHF天线相连接。采集卡上搭载有容量为4 GB的FIFO(First Input First Output)缓存器,其末端通过PCIe gen3×16总线与GPU服务器进行连接,向GPU服务器实时传输采集的数据。



Fig.1 Hardware diagram of time reversal localization system 图 1 时间反转定位系统的硬件实物图

GPU服务器搭载2块NVIDIA RTX 3090ti GPU卡。CPU主板为Intel CoreX i9-10980XE,该模块为整个系统的核心,负责对接收到的VHF数据进行处理及并行定位计算。服务器末端通过接口与显示器相连,将定位结果以动态成像的方式显示在大屏上。

## 1.2 并行框架

提出的双卡GPU集群计算框架如图2所示。

第1步:引入GPU并行计算。GPU上有着数量远超CPU的流处理器,也称算数逻辑单元(Arithmetic and Logic Unit, ALU)。对于海量的重复性的且无前后因果关系的运算任务,可将其分配至GPU的ALU上进行并行计算,避免CPU上的循环计算,从而极大地减少计算耗时。对于频域时间反演计算,本文将不同空间方位点以及不同频点的能量计算任务部署在一个二维的CUDA(Compute Unified Device Architecture)核上并行计算。同时,在最大能量值搜索步骤上,采用GPU递归法并行求取最大值。

第2步:设计并发编程。在程序计算过程中,CPU和GPU是可以同时进行、互不干扰的。以往的频域时间 反演是先在CPU上进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),将其转变为频域信号,而后传输至GPU 进行并行计算,待其定位完一个滑窗的频域数据后,CPU再开始下一个滑窗信号的FFT运算。该运算过程中, 因CPU与GPU程序相互等待,带来了额外耗时。为此,本文使用多线程的并发编程技巧,设置2个线程(thread)。 线程1负责控制CPU进行FFT运算,并将运算结果不断存放至一个队列中(queue);线程2则控制GPU不断从队列 中取出已计算好的数据进行并行计算。如此,CPU和GPU所分配的计算任务便可同时运行,进一步节省了计算 时间。



Fig.2 The schematic of double-card GPU clustering computing 图 2 双卡 GPU集群计算示意图

第3步:对 GPU 进行扩展。采用多块 GPU 进行集群计算,在本硬件设备中,由于条件限制,仅使用2块 GPU卡。根据 GPU 数量的不同,将一段数据等分成若干份,而后同时开启对应数量的进程,每个进程独立地进行第1步、第2步的计算操作,最后将计算结果进行汇总。

## 1.3 数据筛选策略

上文从硬件基础、算法设计方面对频域时间反演计算进行了加速。本节阐述了2种基于时间反转算法定位的 理论优化方法,并将其部署在GPU硬件系统中。

文献[12]中提出了一种相位差筛选方法,如式(1)所示:

$$\begin{cases} D(i) = \frac{1}{M \times N} \sum_{j=1}^{N} \sum_{m=2}^{M} \cos\left(\Delta \alpha_{i,j,m}\right) \\ \Delta \alpha_{i,j,m} = \left| \alpha \left( S_1(f_j) e^{j2\pi f_j \tau_1(i)} \right) - \alpha \left( S_m(f_j) e^{j2\pi f_j \tau_m(i)} \right) \right| \end{cases}$$
(1)

式中:a()表示对频点求相位; $\Delta a$ 为2个相位值的差值; $S_m$ 为第m个信道中信号的频域表达式; $f_j$ 为第j个频点值; $\tau_m$ 为第m个信道中信号的时间延迟。

对于辐射源方向附近的方向点位上,其反向回传信号的频点间的相位差在理论上会小于其余无关方位上的 相位差,因此可以设置一个阈值对无关方位点进行筛选。在求取不同方位点上频点之间的相位差时,也引入 GPU并行计算方法。

文献[12]中提出的信号-干扰能量比(SIER)筛选方法,如式(2)所示:

$$R_{\rm SIE} = \frac{\sum_{i}^{N} \left\| f_i \right\|}{\sum_{i}^{M} \left\| f_j \right\|}$$
(2)

式中f<sub>i</sub>与f<sub>i</sub>分别为选定的信号频段与干扰噪声频段。

通过计算2个频段的比值并选定合适的阈值,判断滑窗中的数据片段中是否包含有辐射源,从而对其进行初步的筛选。本硬件系统中,信号-干扰能量比阈值的确定方法是在没有雷电发生的平时状态下,通过采集若干段环境背景的噪声信号并求取其比值的平均值,将此平均值作为本系统的信号-干扰能量比筛选的阈值。

#### 2 实测数据定位结果

通过在一组实测的雷电 VHF 数据上进行定位成像,检验系统的定位能力。由于实际多方面因素限制,该定

位系统采用了本实验团队以往记录的一段人工引雷 VHF 数据(编号 Trig230553)替代系统的实地采集数据。该数据 由 MARCOS<sup>[14]</sup> 7 阵元 VHF 天线所采集,长度为 500 ms,采样率为 500 Mbps。

将以上VHF数据分别使用基于CPU计算的频域时间反演算法和基于本硬件系统的算法进行定位。每个滑动窗口取256个采样点,滑窗重叠率为0.75。使用的信号频段为30~88 MHz,干扰噪声频段为88~100 MHz。在进行时间反转硬件系统定位时,SIER取值为1.0,相位差阈值取值为0。

对初步定位的结果采用伪点去除方法。设置连续性比(Coherence Ratio, CR)为0.3,能量比(Energy Ratio, ER)<sup>[3]</sup>为1.1。两种方法的定位结果见图3。由图3可知,两种方法均十分精细地刻画出闪电通道的发展过程。其中CPU定位方法共定位到76768个有效点,硬件系统共定位到69661个有效点,同比减少不到9.3%。CPU计算耗时213.2 h,时间反转硬件系统用时仅18.2 min,相较而言速度提升了703倍。



Fig.3 Localization results comparison of artificial triggered lightning VHF data Trig230553 图3 人工引雷 Trig230553 VHF 定位结果对比

# 3 结论

本文介绍了一种时间反转定位硬件系统,通过采用双卡 GPU 集群计算以及多种优化筛选策略,在不明显损 失定位精细度的情况下,极大地提高了频域时间反转算法在雷电 VHF 辐射源定位中的速度。该硬件系统能够实 现从数据采集至定位结果成像的一体化过程。在实测的 VHF 数据中,定位性能表现优越,相较传统 CPU 算法, 速度提升 703 倍,为时间反转算法在实际的雷电定位系统中的运用创造了条件。

#### 参考文献:

- DOGAN M C, MENDEL J M. Applications of cumulants to array processing. I. aperture extension and array calibration[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995,43(5):1200-1216. DOI:10.1109/78.382404.
- [2] WANG Tao, QIU Shi, SHI Lihua, et al. Broadband VHF localization of lightning radiation sources by EMTR[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017,59(6):1949–1957. DOI:10.1109/TEMC.2017.2651142.
- [3] WANG Tao, SHI Lihua, QIU Shi, et al. Multiple-antenna observation and EMTR processing of lightning VHF radiations[J]. IEEE Access, 2018(6):26558-26566. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2833115.
- [4] LUGRIN G,PARRA N M,RACHIDI F,et al. On the location of lightning discharges using time reversal of electromagnetic fields[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014,56(1):149–158. DOI:10.1109/TEMC.2013.2266932.
- [5] CHEN Zefang, ZHANG Yang, ZHENG Dong, 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. DOI:10.1029/2019JD030401.
- [6] KARAMI H, AZADIFAR M, Mostajabi A, et al. Numerical and experimental validation of electromagnetic time reversal for geolocation of lightning strikes[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020,62(5):2156-2163. DOI:10.1109/ TEMC.2019.2957531.

- [7] LI Fengquan, SUN Zhuling, LIU Mingyuan, 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. DOI: 10.3390/rs13224658.
- [8] MOSTAJABI A,KARAMI H,AZADIFAR M,et al. Single-sensor source localization using electromagnetic time reversal and deep transfer learning:application to lightning[J]. Scientific Reports, 2019,9(1):17372. DOI:10.1038/s41598-019-53934-4.
- [9] LIU Yicheng, SHI Lihua, LI Yun, et al. Estimation of return stroke velocity by time-reversal reconstruction of channel feature points[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022,127(20):e2022JD037058. DOI:10.1029/2022JD037058.
- [10] STOCK M G, AKITA M, KREHBIEL P R, et al. Continuous broadband digital interferometry of lightning using a generalized cross-correlation algorithm[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(6): 3134-3165. DOI: 10.1002/2013 JD020217.
- [11] LIU Bo, SHI Lihua, QIU Shi, et al. Three-dimensional lightning positioning in low-frequency band using time reversal in frequency domain[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(3): 774-784. DOI: 10.1109/TEMC. 2019. 2920302.
- [12] DU Shuangjiang, SHI Lihua, LIU Yicheng, et al. Accelerate the time-reversal computing of lightning location using GPU and phase-difference filter[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2023, 65(2): 496-506. DOI: 10.1109/TEMC. 2022.3226470
- [13] 张彦彬,丁晟,高雁,等. 基于 CPU+GPU 混合架构的实时成像系统设计与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(1): 146-151. (ZHANG Yanbin, DING Sheng, GAO Yan, et al. Design and implementation of a real-time imaging system based on CPU+GPU hybrid architecture[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(1): 146-151.) DOI:10.11805/TKYDA201901.0146.
- [14] 李书磊,邱实,石立华,等. 基于正交传播算子的闪电宽带甚高频辐射源定位方法研究[J]. 物理学报, 2019,68(16):279-287.
  (LI Shulei, QIU Shi, SHI Lihua, et al. Broadband very high frequency localization of lightning radiation sources based on orthogonal propagator method[J]. Acta Physica Sinica, 2019,68(16):279-287.) DOI:10.7498/aps.68.20190522.

### 作者简介:

**杜双江**(1996-),男,在读博士研究生,主要研究方向为雷电探测与防护、智能信号处理.email:shuang jiangdu@163.com.

石立华(1969-),男,博士,教授,主要研究方向为 时域信号测量与处理. **邱** 实(1984-),男,博士,副教授,主要研究方向 为雷电物理预测量技术、雷电电磁环境效应.

**李**云(1990-),男,博士,副教授,主要研究方向 为雷电探测与防护、理论与计算电磁学.

**赵迎诚(1997-)**,男,在读博士研究生,主要研究方向为雷电探测与防护、理论与计算电磁学.