

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210026

基于立体十字阵的闪电定位方法*

杨喆萱¹ 杨旭² 李江洲³

(1.南京信息工程大学大气科学学院 南京 210044; 2.南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044;
3.南京信息工程大学长望学院 南京 210044)

摘要:为获取闪电产生雷声源的相对位置信息,利用空间几何方位估计算法,建立由7个传声器组成的立体十字阵,提出一种闪电定位方法,实现基于阵列的全方位闪电探测。首先,根据雷声源到各传声器的距离,推导得出雷声源的坐标计算公式。其中,Z轴的一对传声器用以确定坐标 z 向参数的正负。然后,基于间接测量误差理论,对阵元间距、雷声源的角度及距离,与定位精度的关系进行研究与分析。仿真结果表明,本文方法测得雷声源的坐标误差率约为0.01%,角度误差率约为0.005%。这在取得较好定位效果的同时,有效解决现有工作运算量偏大、定位精度偏低的问题。

关键词: 闪电;声源;定位;十字阵;方位估计

中图分类号: TH765 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

A lightning localization method based on three-dimensional cross array

Yang Zhexuan¹ Yang Xu² Li Jiangzhou³

(1. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
3. Changwang School of Honors, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to obtain the relative position information of thunder source generated by lightning, a three-dimensional cross array composed of seven microphones is established by using spatial geometric azimuth estimation algorithm. On this account, a lightning localization method is proposed to realize array-based omnidirectional lightning detection. Firstly, according to the distances from the thunder source to each microphone, the coordinate calculation formula of the thunder source is deduced. Among them, a pair of microphones along the Z axis are adopted to determine the positive and negative of the parameters in the z direction of the coordinate. Then, based on the theory of indirect measurement error, the relationship between element spacing, angle and distance of thunder source and localization accuracy is studied and analyzed. Simulation results show that the coordinate error rate of thunder source measured by this method is about 0.01%, and the angle error rate is about 0.005%. This not only achieves good localization effects, but also effectively solves the problems of large amount of calculation and low accuracy of the existing works.

Keywords: lightning; sound source; localization; cross array; azimuth estimation

0 引言

闪电探测对现实生活的防雷减灾具有重要的实际意义^[1-2]。传统闪电探测主要靠人工观测获取相关信息。近年来,人们对声源所携带信息的探索越来越多。声源探测技术已广泛应用于工业、农业、军事等领域^[3-4]。用于特定场景以达到某些目的的需求逐渐增加,加快了这一技术的

发展。闪电产生的雷声源是真实存在的,如何引入声源探测技术,将其用于实时闪电位置获取,已然成为新的研究热点。

主动式和被动式作为声源定位技术的主要形式,各有优缺点^[5-6]。较强的隐蔽性和抗干扰性,是被动式的两大优点,这是主动式所不具备的。要想实现声源定位,传声器阵列和与之匹配的算法是必须的^[7-9]。因此,对阵列与算法的

收稿日期:2022-05-19

* 基金项目:国家大学生创新训练计划项目(202110300042)、江苏省大学生创新训练项目(202110300051Z)、江苏省重点研发计划项目(BE2018719)资助

改进优化尤为重要。

现如今,人工智能、数据挖掘等新兴技术日渐成熟,极大拓宽了声源定位的应用场景^[10-13]。为了研究感音神经性听力损失(SNHL)患者的听觉运动定位,文献[10]在 15 例轻度 SNHL 患者和 16 例中度 SNHL 患者中测定了确定方位运动方向的最短时间。结果发现,SNHL 听觉运动定位时间特征的恶化主要与高频听力动态范围的减少有关。为解决传统空间声音再现的主观感知易受听者位置限制的问题,文献[13]研究了实际波场合成系统中声源的主观位置感知,发现距离对位置感知的影响不大,且纯音和窄带噪声没有太大区别。

除了应用场景方面,研究人员在声源定位性能提升上也取得了一系列成果^[14-17]。文献[14]开发了一种具有良好信号解调能力和宽声源定位范围的微型仿生麦克风,其两翼在摇摆模式本征频率处具有不同大小波瓣的双向拾音模式,且在弯曲模式本征频率处具有全方位响应。这在可穿戴设备和救援机器人等实际应用中具有广阔的前景。戴金洲等^[15]设计了一种基于传声器阵列的机动车鸣笛抓拍系统。该系统不但实现了实时定位违法鸣笛车辆,而且利用所提系统校准系统,从抓紧有效率、捕获率等方面提高了定位精度。室内定位和现场道路定位实验均取得了较好的效果。

上述工作为声源定位的发展做出了诸多贡献。但是,目前将声源定位用于闪电定位的工作较少,同时考虑到现有定位算法运算量偏大、实时性较差、定位精度较低,这些对闪电定位的实现提出了较高要求。为此,本文结合了方位估计算法,构建一种七元的立体阵列模型,以实时获取闪电产生的雷声源坐标。期间,探究了雷声源角度、距离、阵元个数、阵元间距等主要参数与定位的相互关系,并利用间接测量误差理论,定性定量分析了影响定位精度及误差产生的原因。最后,通过一系列仿真实验,验证了所提方法的有效性。

1 七元立体十字阵闪电定位方法

选择合理的传声器阵列模型,辅以尺寸合适的阵元间距,加上较好匹配度的闪电定位算法,能有效降低计算的复杂度,提高实时性。

建立的七元立体十字阵如图 1 所示。

图 1 中,设闪电产生的雷声源 S 传播速度为 c ,其空间位置为 (x, y, z) 。 R 为雷声源到阵列所在坐标系原点 U_0 的距离。阵元间距为 p 。雷声源传播到传声器 $U_0(0, 0, 0)$ 、 $U_1(p, 0, 0)$ 、 $U_2(0, p, 0)$ 、 $U_3(-p, 0, 0)$ 、 $U_4(0, -p, 0)$ 、 $U_5(0, 0, p)$ 、 $U_6(0, 0, -p)$ 的时间分别为 $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ 。基于测得时间,根据图 1 所示模型设定 5 组相对时延值,分别为 $t_{10} = t_1 - t_0, t_{20} = t_2 - t_0, t_{30} = t_3 - t_0, t_{40} = t_4 - t_0, t_{65} = t_6 - t_5$ 。雷声源的水平偏角和仰角分别为 A_1, A_2 。其中,雷声源在 XOY 平面上方对应 A_2 的值为正(即

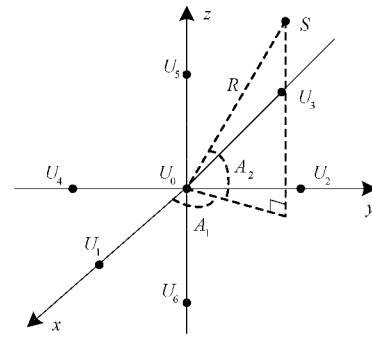


图 1 七元立体十字阵列模型

$t_{65} > 0$),反之则对应 A_2 的值为负(即 $t_{65} < 0$)。

基于方位估计理论^[3,7,18],只需在求得所有相对时延值 $t_{10} \sim t_{65}$ 后进行常规的线性计算,即可获得雷声源坐标信息。

根据图 1,表示出 S 到 U_i 的距离公式,其中 $i = 0, 1, \dots, 4$:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \\ (x - p)^2 + y^2 + z^2 = (R + ct_{10})^2 \\ x^2 + (y - p)^2 + z^2 = (R + ct_{20})^2 \\ (x + p)^2 + y^2 + z^2 = (R + ct_{30})^2 \\ x^2 + (y + p)^2 + z^2 = (R + ct_{40})^2 \end{cases} \quad (1)$$

通过抵消 x, y, z 的平方项,得到:

$$\begin{cases} 2px(t_{10} + t_{30}) = (p^2 - c^2 t_{10}^2)t_{30} - (p^2 - c^2 t_{30}^2)t_{10} \\ 4px(t_{20} + t_{40}) = (2p^2 - c^2 t_{20}^2 - c^2 t_{40}^2)(t_{30} - t_{10}) + c^2(t_{30}^2 - t_{10}^2)(t_{20} + t_{40}) \\ 2py(t_{20} + t_{40}) = (p^2 - c^2 t_{20}^2)t_{40} - (p^2 - c^2 t_{40}^2)t_{20} \\ 4py(t_{10} + t_{30}) = (2p^2 - c^2 t_{10}^2 - c^2 t_{30}^2)(t_{40} - t_{20}) + c^2(t_{40}^2 - t_{20}^2)(t_{10} + t_{30}) \end{cases} \quad (2)$$

设 $M = \sum_{i=1}^4 t_{i0}, N = \sum_{i=1}^4 t_{i0}^2, E = t_{30} - t_{10}, F = t_{40} - t_{20}$, 由式(2)得到:

$$\begin{cases} x' = \frac{E(4p^2 - c^2 N)}{4pM} \\ y' = \frac{F(4p^2 - c^2 N)}{4pM} \end{cases} \quad (3)$$

其中,雷声源坐标参数正演值 x, y 的反演值分别是 x', y' 。

由式(1)可得:

$$R' = \frac{4p^2 - c^2 N}{2Mc} \quad (4)$$

其中,雷声源到坐标系原点距离 R 的反演值是 R' 。

由图 1 得到如下关系:

$$\begin{cases} x' = R' \cos A_2' \cos A_1' \\ y' = R' \cos A_2' \sin A_1' \\ z' = R' \sin A_2' \end{cases} \quad (5)$$

其中,雷声源 z 向坐标参数,即正值 z 的反演值是 z' 。 A_1', A_2' 分别为正值 A_1, A_2 的反演值。

利用式(5)得到:

$$\begin{cases} A_1' = \begin{cases} \arctan(\frac{y'}{x'}), & x' > 0 \\ 180 + \arctan(\frac{y'}{x'}), & x' < 0 \end{cases} \\ A_2' = \begin{cases} \arccos \frac{x'}{R' \cos A_1'}, & t_{65} > 0 \\ -\arccos \frac{x'}{R' \cos A_1'}, & t_{65} < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)得到 A_2' 后,根据式(5)可求出 z' 。至此,得到了雷声源的直角坐标 (x', y', z') 和球坐标 (R', A_1', A_2') 。

2 闪电定位方法精度分析

理论上,各时延的统计误差特征相同,因此假设时延估计误差的标准差均为 ξ_T ,且各自独立。

2.1 雷声源水平偏角误差分析

由 ξ_T 引起的水平偏角 A_1 的估计误差为^[3,7,12]:

$$\xi_{A_1 T} = \frac{\sqrt{2} c \xi_T}{2 p \cos A_2} \quad (7)$$

通过仿真,得到了 $p = 3$ m, 仰角 A_2 分别为 $20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ 时, $\xi_{A_1 T}$ 与 ξ_T 的关系曲线,如图 2 所示。

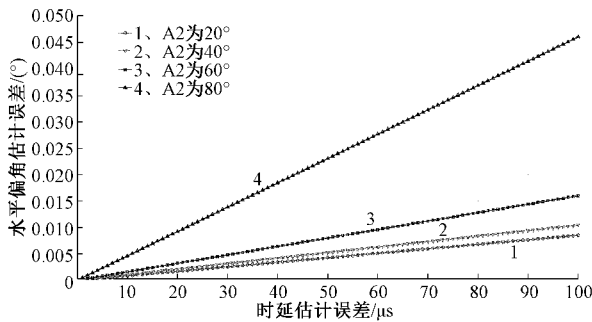


图 2 $\xi_{A_1 T}$ 与 ξ_T 的关系

图 2 中,当 A_2 一定时, $\xi_{A_1 T}$ 随误差 ξ_T 的增加而线性增加。这一变化随 A_2 的增大而愈加明显,特别是 A_2 为 80° 时,最大 $\xi_{A_1 T}$ 增加至 0.046° 。能够显示出误差 ξ_T 对 $\xi_{A_1 T}$ 的影响变大的过程。

2.2 雷声源仰角误差分析

由 ξ_T 引起的仰角 A_2 的估计误差为^[3,7,12]:

$$\xi_{A_2 T} = \frac{\sqrt{2} c \xi_T}{2 p \sin A_2} \quad (8)$$

通过仿真,得到了 $p = 3$ m、仰角 A_2 分别为 $20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ 时, $\xi_{A_2 T}$ 与 ξ_T 的关系曲线,如图 3 所示。

图 3 中,当 A_2 固定时, $\xi_{A_2 T}$ 随 ξ_T 增加而线性增加。这

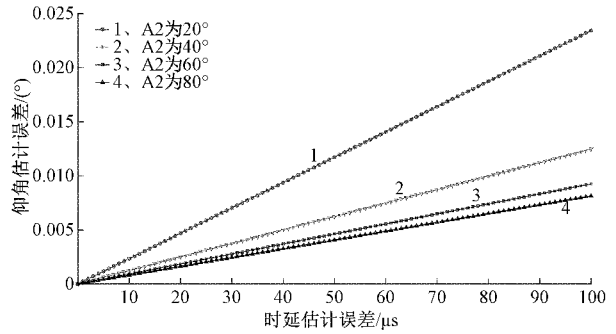


图 3 $\xi_{A_2 T}$ 与 ξ_T 的关系

一变化随 A_2 的减小而愈加明显,特别是 A_2 为 20° 时, $\xi_{A_2 T}$ 最大增加至 0.023° 。与图 2 所得结论类似,图 3 能够显示出误差 ξ_T 对 $\xi_{A_2 T}$ 的影响变大的过程。

2.3 雷声源到阵元中心距离误差分析

距离 R 的估计误差为^[3,7,12]:

$$\xi_{RT} = \frac{Rc}{p^2 (4 - \cos^2 A_2)} \sqrt{p^2 + R^2} \xi_T \quad (9)$$

当 A_2 分别为 40° 和 80° , ξ_{RT} 分别为 0.1 m 和 0.2 m, R 为 200 m 时,仿真得到了图 4 所示 ξ_T 与 p 的关系。

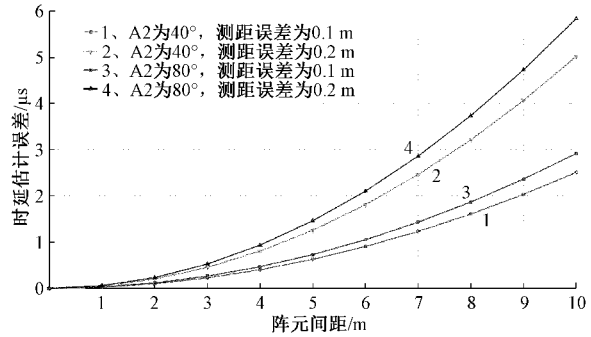


图 4 ξ_T 与 p 的关系

图 4 中,结合参数 ξ_{RT}, A_2 和 p ,能够发现固定 p 时的误差 ξ_{RT} 比 A_2 对误差的 ξ_T 影响大。进一步发现, ξ_{RT} 和 A_2 均较大时, p 的增大会引起误差 ξ_T 的指数性增长。这在 p 大于 8 m 后表现的更明显。因此,在实际环境中, p 不宜过大,以减小闪电定位误差。

3 实验结果与分析

根据图 1 所示立体十字阵,基于正演数据,设定 $c = 340$ m/s, $p = 2$ m。同时,选取 $(80, -60, 120), (-50, 0, -130)$ 作为正演雷声源坐标 (x, y, z) 。表 1、2 列出了反演结果。

表 1、2 中,相比于正演数据,由闪电定位方法所得雷声源反演坐标的误差率均低于 0.01% 。这一偏差几乎为 0 。另一方面,反演所得角度的误差率约 0.005% 。综上,本文所提方法的定位精度较高,能取得较好的效果。

表1 闪电定位反演结果

正演坐标/m	正演角度	反演坐标	反演角度
(80, -60, 120)	$A_1 = -36.869\ 9$ $A_2 = 50.194\ 4$	(79.995 2, -59.995 8, 120.005 3)	$A_1' = -36.869\ 6$ $A_2' = 50.197\ 5$
(-50, 0, -130)	$A_1 = 180$ $A_2 = -68.962\ 5$	(-49.995 5, 0, -130.001 7)	$A_1' = 180$ $A_2' = -68.964\ 5$

表2 闪电定位数据误差率

正演坐标/m	坐标误差率/%	角度误差率/%
(80, -60, 120)	(0.006, 0.007, 0.004 4)	0.002 4 0.005 2
(-50, 0, -130)	(0.009, 0, 0.001 3)	0 0.002 2

4 结 论

本文提出了一种基于七元立体十字阵的闪电雷声源定位方法。本文不仅定性定量分析了所提方法的测距测向精度,而且通过仿真实验验证了方法的有效性。特别是,基于方位估计算法进行闪电定位的计算量较小,能有效保证定位实时性。

闪电定位涉及到诸多因素,如何将相关方法应用到实际环境中进行定位,有待研究。此外,将实验转移到恶劣环境中进行性能测试仍需实践。若能结合闪电监测系统实时数据,进行闪电组网预警,有利于进一步提高预警率。

参考文献

- [1] 李力,陈星,李俊,等.三维闪电探测仪状态检测监控系统设计与实现[J].自动化与仪表,2022,37(2):1-6,24.
- [2] 徐伟,夏志祥,行鸿彦.基于集成经验模态分解和极端梯度提升的雷电预警方法[J].仪器仪表学报,2020,41(8):235-243.
- [3] 行鸿彦,杨旭,张金玉.基于四元传声器阵列的声源全方位定位算法[J].仪器仪表学报,2018,39(11):43-50.
- [4] 陈晟,杨燕明,周鸿涛,等.北极跨冰层水中声源方位估计实验与分析[J].声学学报,2022,47(2):175-186.
- [5] 孙昊,刘贺洋,仲维灿,等.基于主动探测的机器人声源目标距离测定方法[J].北京工业大学学报,2015,41(1):37-41.
- [6] 魏庆朝,张雪峰,臧传臻,等.公路隧道内主动降噪声源布置位置仿真模拟[J].北京交通大学学报,2017,41(4):17-22.
- [7] YANG X, XING H, JI X. Sound source omnidirectional positioning calibration method based on microphone observation angle [J]. Complexity, 2018,2018:1-15.
- [8] 余亮,潘铮,陈正武,等.传声器阵列特征滤波去噪方法[J].声学学报,2021,46(3):335-343.

- [9] 万莎,李昌日,杨肖杰,等.便携式胎心音检测系统的设计[J].国外电子测量技术,2021,40(12):120-124.
- [10] KLISHOVA E, GVOZDEVA A, GOLOVANOVA L, et al. Temporal characteristics of azimuthally moving sound source localization in patients with mild and moderate sensorineural hearing loss [J]. Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology, 2021, 57(6):1499-1510.
- [11] ZEDDIES D, GRAY M, ROGERS P, et al. Tank acoustics, and sound source localization by plainfin midshipman fish(*porichthys notatus*) [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 135(4):2361.
- [12] YANG X, XING H, XU W, et al. A moving path tracking method of the thunderstorm cloud based on the three-dimensional atmospheric electric field apparatus [J]. Journal of Sensors, 2021, 2021(9):1-13.
- [13] ZHAO X, MENG Z. Perception of sound source localization in wave field synthesis [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, DOI: 10.1088/1742-6596/1739/1/012011.
- [14] REN D, QI Z. An optical beam deflection based MEMS biomimetic microphone for wide-range sound source localization [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(50), DOI: 10.1088/1361-6463/ac22d7.
- [15] 戴金洲,牛锋,沙硕,等.机动车鸣笛抓拍系统校准技术研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12):182-188.
- [16] 季建朝,王聪,刘浩,等.相干噪声快速去除算法及其在声源定位中的应用 [J]. 声学学报, 2021, 46(5):677-686.
- [17] 王言彬,徐长秋,毛富哲.基于深度学习的声源无网格定位及量化方法 [J]. 电子测量技术, 2021, 44(16):57-61.
- [18] 王超,鱼良龙,韩梅,等.单矢量听器稀疏近似最小方差方位估计算法 [J]. 声学学报, 2021, 46(6):1050-1058.

作者简介

杨喆萱,本科,主要研究方向为气象科学与闪电探测等。
E-mail:2602211092@qq.com

杨旭(通信作者),博士,主要研究方向为闪电探测技术、信号与信息处理等。
E-mail:20211118007@nuist.edu.cn