

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.04.10

广域低频声定位方法研究

张宸文, 杨军*, 廖允鸿, 张润泽

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 基于传声器阵列的传统定位方法在千米级尺度下对广域低频声信号的定位存在一定局限性。为了提高定位精度, 利用32阵元声阵列开展外场试验, 研究了时延最小方差(Time Delay Minimum Variance, TDMV)方法与波束形成(Beamforming, BF)方法在5 km的外场环境下对同一位置低频声信号的定位能力。试验结果表明: 相较于传统的波束形成方法, 时延最小方差方法在广域范围的定位精度具有显著优势, 定位准确度提高了2.1%以上。本研究拓展了声源定位的距离范围, 为低频声源的精确定位提供了可行的方法。

关键词: 声学信号处理; 低频声源; 定位系统; 时延最小方差; 定位精度

中图分类号: TB52; O384; X859

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 04-0141-08

Research on wide-area low-frequency acoustic localization method

ZHANG Chenwen, YANG Jun*, LIAO Yunhong, ZHANG Runze

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Traditional location methods based on microphone arrays have certain limitations in locating wide-area low-frequency acoustic signals at kilometer-scale distances. To improve location accuracy, field experiments were conducted using a 32-element acoustic array to investigate the locating performance of the time delay minimum variance (TDMV) method and the beamforming (BF) method in a 5 km outdoor environment, focusing on low-frequency sound signals from the same source. Experimental results indicate that compared to the traditional BF method, the TDMV method exhibits a significant advantage in location accuracy over wide-area ranges, achieving an improvement of more than 2.1% in precision. These findings extend the effective range of sound source location and provide a feasible solution for the accurate location of low-frequency sound sources.

Key words: acoustic signal processing; low-frequency sound source; locating system; TDMV; location accuracy

0 引言

在声学信号处理领域, 声源定位技术是一个重要的研究方向, 该技术被广泛应用于环境监测、军事探测等诸多领域^[1-3]。常规的定位研究主要集中在中高频声源的定位^[4-7], 尤其是在几十米尺度下或室内环境中实现声源定位, 该范围的声源定位技术凭借高频信号的良好空间分辨力, 能够较

为精确地定位声源位置, 但在更大范围的低频声源信号应用中却存在一定的技术瓶颈: 一方面低频信号虽然远距离传播衰减减小, 但其大范围传播会带来传输路径复杂、易受到多径反射和环境噪声干扰, 增加了目标声源与背景噪声的分离难度; 另一方面, 低频信号由于波长较长, 导致空间分辨力较低, 难以在大尺度空间中实现高精度定位。上述特性使得利用小型传声器阵列在复杂开放环

收稿日期: 2024-12-26; 修回日期: 2025-01-25

引用格式: 张宸文, 杨军, 廖允鸿, 等. 广域低频声定位方法研究[J]. 计测技术, 2025, 45(4): 141-148.

Citation: ZHANG C W, YANG J, LIAO Y H, et al. Research on wide-area low-frequency acoustic localization method[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(4): 141-148.



境中实现低频声源定位成为一个值得深入探讨的研究方向。

1977年, OSTROVSKY A E^[8]首次指出了大地震时空气中存在一种与地震相关的长周期波, 并将低频声信号引入地震定位监测研究中, 但未明确指出该周期波的产生机理、频率范围以及传播速度。1997年, 谢金来等人^[9]研制出一套用于监测核爆炸的次声波系统, 该系统还可用于检测全球环境变化、人为灾害和自然灾害。2020年, 尚楚翔等人^[10]提出了一种基于最小二乘法的次声波入射角计算方法, 通过分析多通道相关方法的误差来源, 确定忽略阵元海拔高度差是导致定位误差的主要因素, 提高了次声波对地震源的定位能力。2021年殷昊等人^[11]采用短时能量突变的时延估计方法, 提高三元次声阵定位火箭发射的精度, 通过优化定位算法提高了低频声信号的定位精度。

广域低频声源定位可以应用于地震监测^[12]、气象探测、军事防御^[13]等诸多领域, 捕捉远距离低频声源信号和精确定位能够为相关系统提供重要的数据信息, 有助于提升监测范围和探测精度。目前, 国内外针对广域低频声源定位的应用仍较少, 开展适用于大尺度低频声源定位方法研究, 能够进一步拓展声监测的应用范围, 具有重要价值。本研究基于大尺度声阵列, 利用波束形成方法与时延最小方差方法, 分析低频声源的定位误差。

1 声源定位基本模型

在广域外场环境下, 可假设声源传播符合点源模型, 在已知传声器阵列各阵元的坐标位置的情况下, 得到声波到达各传声器的时间, 计算得到声源相对于阵列的方向角信息, 进而确定声源位置坐标。

1.1 时延最小方差法

时延最小方差^[14]声定位方法通过对目标区域进行网格划分, 假设声源位于不同网格点并计算相应的时延差, 逐步逼近真实声源位置。具体步骤如下:

首先, 将目标区域划分为 $N \times N$ 的网格, 每个网格点代表1个可能的声源位置, 定义为 $G = \{(x_i, y_i)\}$, 其中 (x_i, y_i) 表示第 i 个网格点, 假设声

源的实际位置为 $P = (x_s, y_s)$, 但该位置未知。区域内布设了 M 个已知位置的传声器, 定义第 k 个传感器的位置为 $S_k = (x_k, y_k)$, $k = 1, 2, \dots, M$ 。

某一网格点 $G_{i,j} = (x_i, y_i)$ 到传声器 k 的实际距离 $d_{i,j,k}$ 为

$$d_{i,j,k} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} \quad (1)$$

该网格点到传声器 k 的理论传播时间 $t_{i,j,k}$ 为

$$t_{i,j,k} = d_{i,j,k} / c \quad (2)$$

式中: c 为声速。因此, 传声器 k 和 l 的理论时延差 $\Delta t_{i,j}^{(k,l)}$ 可表示为

$$\Delta t_{i,j}^{(k,l)} = \frac{\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}}{c} - \frac{\sqrt{(x_i - x_l)^2 + (y_i - y_l)^2}}{c} \quad (3)$$

通过传声器实际采集到的时延差为 $\Delta T^{(k,l)}$, 可得到理论值与实际值的误差。定义假设位置 $G_{i,j}$ 的方差 $S_{i,j}$ 为

$$S_{i,j} = \sum_{k=1}^{M-1} \sum_{l=k+1}^M (\Delta t_{i,j}^{(k,l)} - \Delta T^{(k,l)})^2 \quad (4)$$

为了实现误差最小化, 引入相关度函数 f , 将误差的倒数定义为

$$f = \frac{1}{S_{i,j} + \varepsilon} \quad (5)$$

式中: ε 为避免分母为0的小正数。遍历所有网格点后, 相关度函数最大的位置即为声源估计位置 $P_{\text{estimated}}$, 即

$$P_{\text{estimated}} = \arg \max_{(i,j)} f_{i,j} \quad (6)$$

1.2 波束形成成像法

波束形成算法^[15]的原理: 根据声波到达传声器阵列各个阵元的相位差, 通过移相叠加的方法, 得到合成的声信号, 抑制了环境噪声对定位的影响。对测量区域范围进行扫描, 以云图的方式显示出来, 形成波束形成成像图。具体步骤如下:

二维阵列的接收信号模型为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{x}(t)$ 为阵列接收到的信号向量, 其长度为阵元数量 N ; $\mathbf{n}(t)$ 为噪声向量; $\mathbf{s}(t)$ 为阵列接收到的目标声源信号, 其可以表示为

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{a}(\phi, \theta) s_0(t) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{a}(\phi, \theta)$ 为方向向量(或阵列流行向量), 与声源的方向 (ϕ, θ) 有关; $s_0(t)$ 为信号源实际发出的声源信号。

对一个二维阵列,其阵列流行向量 $\mathbf{a}(\phi, \theta)$ 定义为

$$\mathbf{a}(\phi, \theta) = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}r_1 \cdot \mathbf{k}(\phi, \theta)} \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}r_2 \cdot \mathbf{k}(\phi, \theta)} \\ \dots \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}r_N \cdot \mathbf{k}(\phi, \theta)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: r_N 为第 N 个阵元的实际位置, $\mathbf{k}(\phi, \theta)$ 为单位矢量。

波束形成器的输出 $y(t, \phi, \theta)$ 为

$$y(t, \phi, \theta) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) \quad (10)$$

式中: $\mathbf{w}$ 为波束形成权重向量,通常 $\mathbf{w} = \mathbf{a}(\phi, \theta)$, H 为共轭转置。代入方向向量后得

$$y(t, \phi, \theta) = \mathbf{a}^H(\phi, \theta) \mathbf{x}(t) \quad (11)$$

通过扫描所有可能的方向点 (ϕ, θ) ,计算对应方向的波束输出功率 $P(\phi, \theta)$,即

$$P(\phi, \theta) = |y(t, \phi, \theta)|^2 = |\mathbf{a}^H(\phi, \theta) \mathbf{x}(t)|^2 \quad (12)$$

通过绘制 ϕ 和 θ 的二维图像,可以得到声源的二维定位结果。波束形成方法的特点是传声器阵列的阵元间距不能大于半波长,且孔径越大,成像效果越清晰。

2 声定位试验设计

低频声信号传播距离远、穿透能力强,但定位精度较低。为了对比和评估时延最小方差方法和传统波束形成方法在千米级范围内的定位精度误差,尤其是对低频声信号的定位能力。通过设计并实施试验,旨在验证多阵元传感器阵列在5 km范围内采集低频声信号的能力,并进一步探讨2种定位方法在实际应用中的精度、容错性和适用性。

本次试验在某试验场进行,为了监测与采集低频声信号,本次试验选取如图1所示的次声传感器,该传感器适用的频率范围在10~300 Hz,可以较好覆盖本次试验设计的声源频率。在参考声压值为20 μPa 的基础上,该测试仪器具有50~174 dB的动态测量范围,能够监测爆炸声波。

阵元布置的设计依据主要基于以下几点:①信号特性适配。低频声信号波长较长,因此阵元间距需要控制在合理的范围内,避免出现空间混叠现象,同时保证阵列具备足够的空间分辨力;

②信噪比优化。考虑到低频声信号在风噪声干扰环境下的信噪比问题,每组小阵列均设计为圆形,能够显著增强低频信号的空间增益,这种结构尤其适合低频声的定位,可有效减小风噪和环境噪声的影响^[16];③灵活性与均匀性。由于试验场地环境复杂且存在障碍物,阵元布置需兼顾灵活性和信号采集的均匀性。



图1 低频声传感器与供电模块

Fig.1 Low-frequency acoustic sensor and power supply module

根据以上原则,本试验使用31支传声器,分布在6个小阵列中进行信号采集。为确保布置的灵活性和信号采集的均匀性,小阵列的具体构成:5个阵列各包含5支传声器,而剩余1个阵列包含6支传声器。传声器的实际布设位置如图2所示。

为了合理设置爆炸点位置,使传声器阵列更高效地采集到声源信号,通过波束形成方法和时延最小方差方法分别分析阵列的定位盲区,如图3、图4所示。通过对阵列盲区分布的研究,确定阵列在不同方向上的分辨能力,并将声源布设在阵列分辨能力较高的区域,以提高定位精度和信号采集质量。选用频率为20 Hz的声信号,以匹配试验条件下的声源特性,充分体现阵列的分辨能力和方向性特性。通过分析阵列盲区分布,提高传声器阵列采集到信号的信噪比,为后续试验设计以及数据处理提供保障。

由图3、图4可以看出:该组传声器阵列分辨能力高的区域主要位于垂直于阵列的中轴线方向

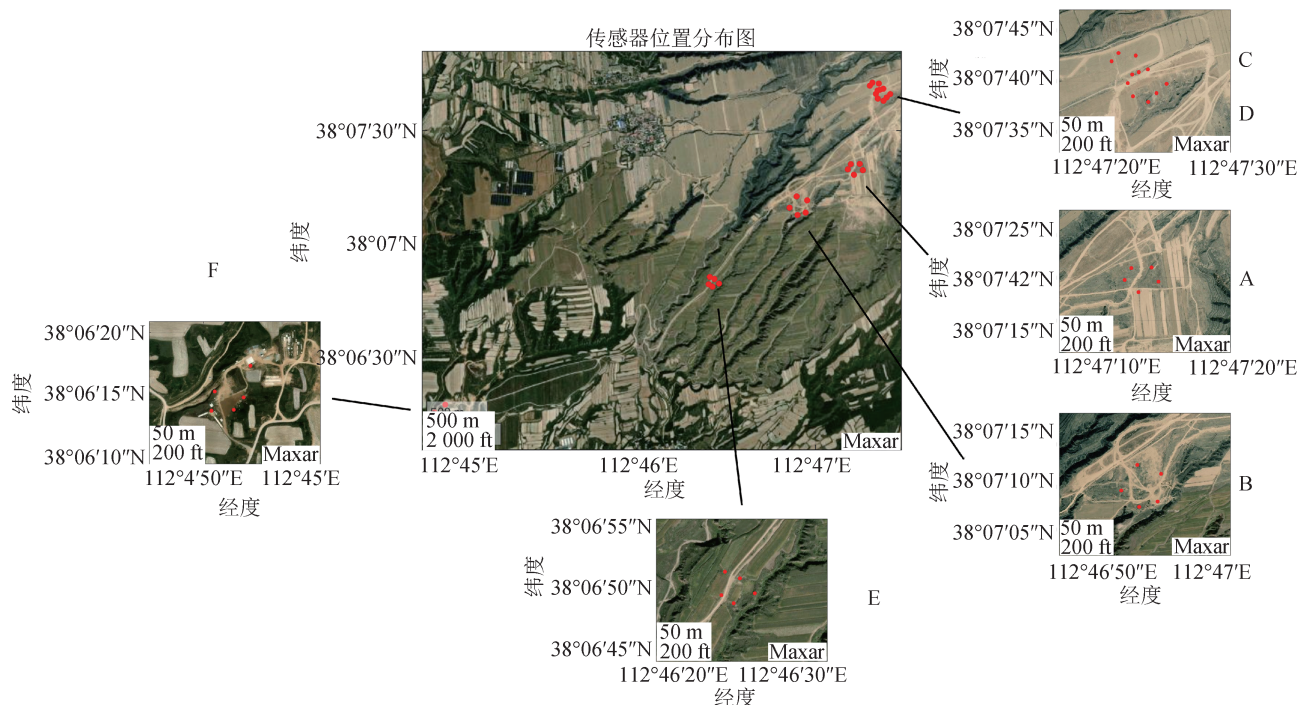


图2 传声器位置布设情况

Fig.2 Microphone location layout

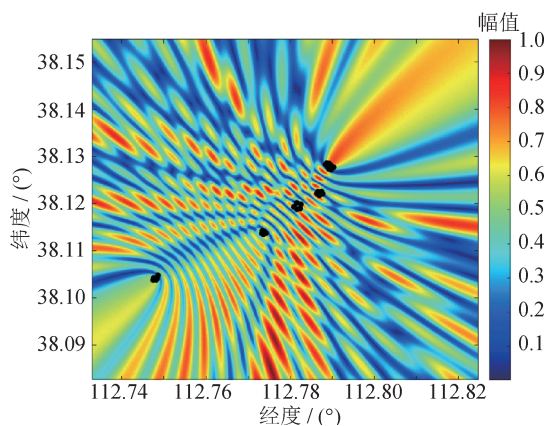


图3 阵列定位二维波束图

Fig.3 Array positioning two-dimensional beam pattern

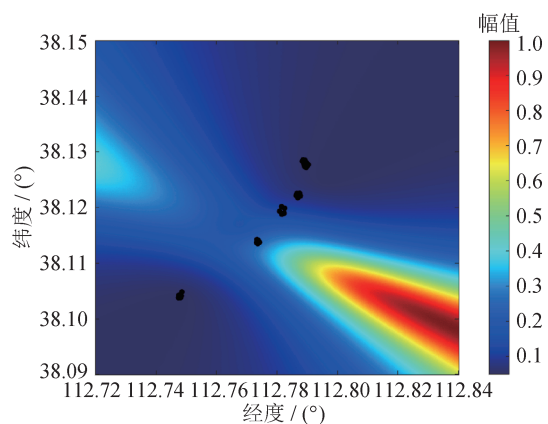


图4 阵列定位二维时延方差图

Fig.4 Array positioning two-dimensional time delay variance plot

上,且波束形成方法分析得到的定位盲区由于跨波长,出现了栅瓣现象,旁瓣水平也较高,对定位结果影响较大;而利用时延方差最小的方法得到的定位盲区图中,定位精度高的区域集中。基于盲区分析结果,将声源布设在阵列定位分辨能力较高的区域,最大限度提高信号采集质量和定位精度。

3 定位结果与分析

为了验证声源定位方法对于广域低频声源的定位能力,利用时延最小方差法以及波束形成方法对声源进行定位,分析2种定位方法对低频声信号的定位精度,得到适合于低频声信号定位方法。选取声源频率为20 Hz,以匹配低频声信号特性,开展试验验证2种定位方法的定位精度。

在实际经纬度坐标为(38°7′28.85″N, 112°47′25.80″E)的位置进行云爆弹的爆炸,用于模拟一种低频声源信号,爆炸当量为500 kg的TNT炸药,从而保证声源信号可以传播足够的距离。各布设位置的传声器均成功采集爆炸声信号,且信号幅值显著。

图5为6个小阵接收到的时域波形信号,可以看出6路波形的信噪比高,且波形相似度非常高,

均为“N”形的脉冲波,持续时间均在0.1 s左右。

设置采样率为1 000 Hz,时间窗长度为1 024个点、1.024 s,时间分辨力为1 ms,频率分辨力为0.976 Hz。对信号频率进行分析,如图6所示。

由图6可以看出:信号的能量主要集中在100 Hz以下,高频部分的噪声能量很低。根据时频图的分析结果对信号进行处理,可以得到各个基阵的实际时延量。

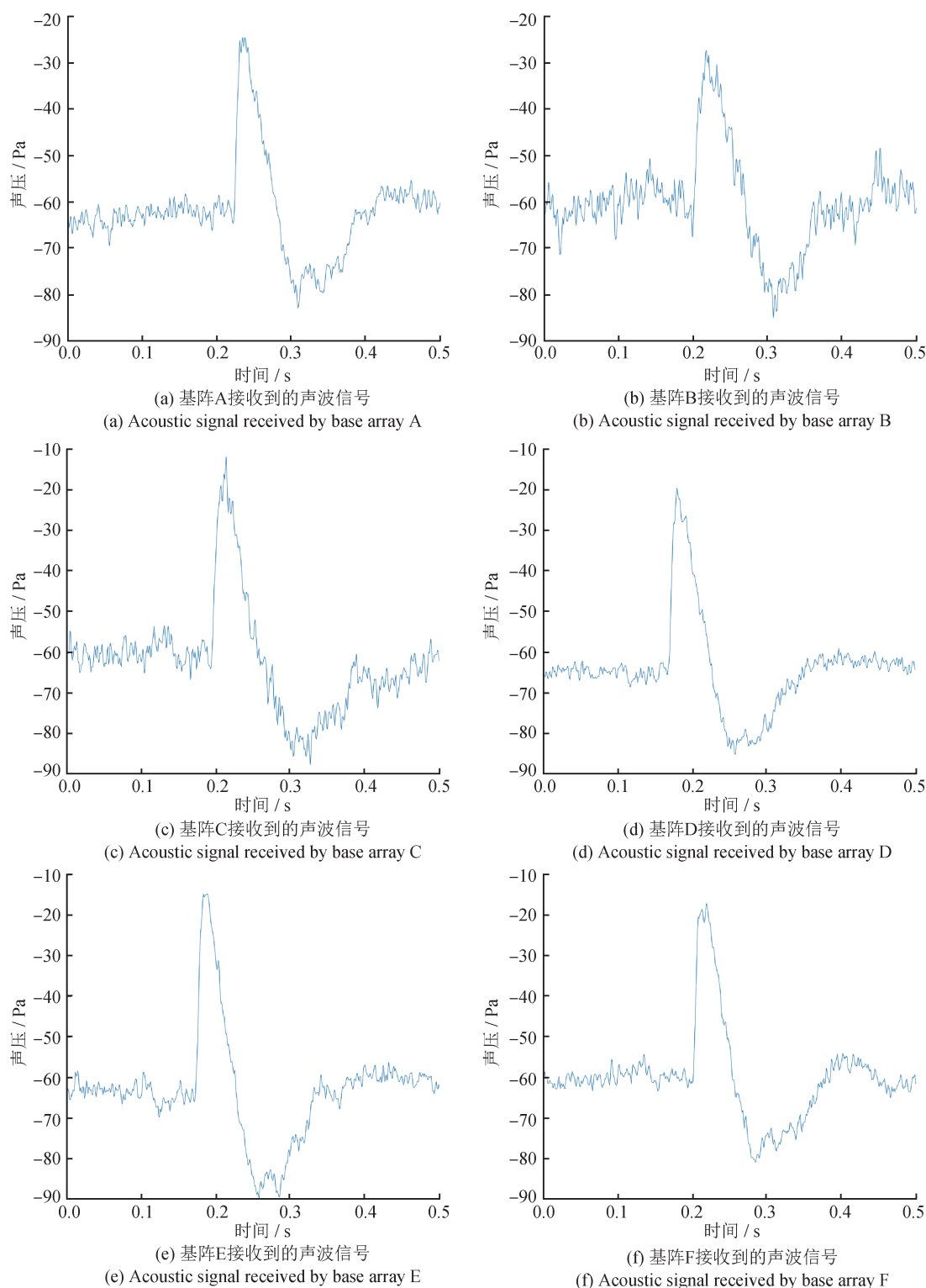


图5 云爆弹多阵元接收到的声波信号

Fig.5 Acoustic signals of cloudburst bomb received by multiple array elements

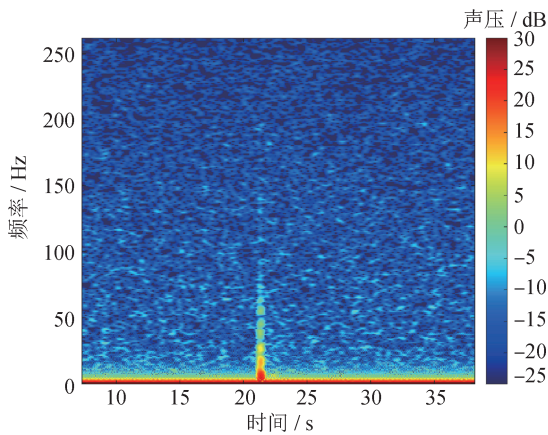


图6 声源信号时频图

Fig.6 Time-frequency diagram of sound source signal

表1显示了6组基阵中某一阵元的坐标位置以及该阵元采集到信号峰值的时间,通过以上信息验证定位方法的效果。

表1 6组基阵坐标及采样时间

Tab.1 Coordinates and sampling time of 6 base arrays

基阵坐标 / (°)	基阵代号	采样时间
38.077N, 112.474E	A	12 h 56 m 45 s 284 ms
38.073N, 112.472E	B	12 h 56 m 43 s 472 ms
38.068N, 112.464E	C	12 h 56 m 46 s 752 ms
38.071N, 112.469E	D	12 h 56 m 44 s 132 ms
38.068N, 112.465E	E	12 h 55 m 46 s 713 ms
38.072N, 112.470E	F	12 h 56 m 44 s 132 ms

选取时延量计算的参考传感器时, 优先选择距离声源较近且信号质量较好的传感器。首先, 声源位置若已知或大致估计, 可选择靠近声源的传感器, 减少传播路径差异带来的误差。其次, 信号质量较好的传感器能提高时延计算的精度, 避免噪声等干扰对时延估计的影响。最后, 阵列中心或对称位置作为参考点, 有助于减少因参考

点位置偏差引起的定位误差, 并使时延计算更加稳定、对称, 尤其是在不确定声源方向的情况下, 中心位置有利于更均衡地采集来自各方向的信号。因此, 选取A处靠近声源位置的传感器作为参考传声器, 利用波束形成方法对声源信号进行定位, 根据各传声器采集到的信号, 对其定位结果进行分析, 绘制定位结果如图7所示。

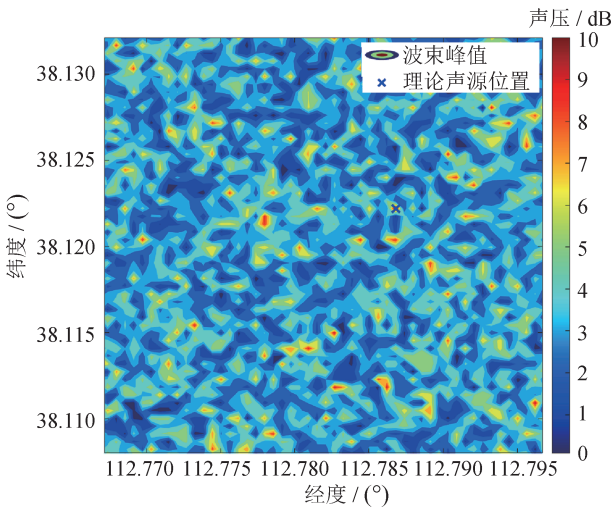


图7 16元阵波束形成定位结果图

Fig.7 Diagram of beamforming positioning results of 16-element array

从图7可以看出: 波束形成方法能较好地定位实际的声源位置, 但是主瓣过宽且旁瓣水平较高, 导致定位结果中存在若干“鬼影”(即定位结果存在虚假声源信号)位置, 可能会误判声源的实际位置。这是因为对于低频信号来说, 阵列孔径比声源信号的波长更小, 阵元间距大于半波长, 所以阵列的空间分辨能力降低, 从而导致主瓣较宽、旁瓣较窄。该方法的定位结果与实际声源信号位置的误差如表2所示。

利用时延最小方差方法对声源信号进行定位, 绘制其定位结果云图, 如图8所示。

表2 波束形成定位误差

Tab.2 Positioning error of beamforming method

参数	波束形成定位结果 / (°)	实际声源位置 / (°)	误差 / (°)	定位实际误差 / m	定位误差 / %
经度	112.791 4	112.790 5	0.000 9	98.79	4.93
纬度	8.123 6	8.124 8	0.001 2	139.10	6.96

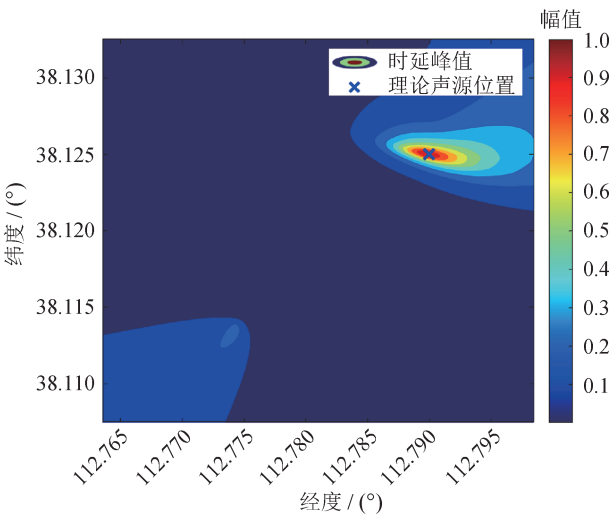


图8 时延最小方差定位结果
Fig.8 Positioning result of TDMV method

由图8可知：时延最小方差的定位方法的定位精度更高。因为时延最小方差定位方法的核心是通过不同传声器接收到的声波信号的时间差对信

号源进行定位，所以利用该方法得到的定位结果精度提升较明显。对该方法计算得到的理论声源位置与实际声源位置进行对比，如表3所示。

通过分析表2与表3中2种定位方法的定位误差可知：时延最小方差法在定位精度上显著优于波束形成法，尤其是当阵元间距大于半波长、阵列孔径与波长较为接近时，定位结果存在明显优势。这是因为波束形成方法无法突破瑞利极限，在信号波长较长的情况下会出现高旁瓣及栅瓣现象，从而对定位结果产生较大影响；而时延最小方差方法则不受传声器阵列阵元孔径的影响。

分析试验数据可得：时延最小方差法的经度定位准确度相较波束形成法提高了2.15%，纬度定位准确度提高了5.15%。试验结果表明：时延最小方差法在应对低频信号传播过程中的噪声干扰及多路径效应方面，具有更强的鲁棒性和更高的精确性。

表3 时延最小方差定位误差
Tab.3 Positioning error of TDMV method

参数	时延方差估计定位结果/(°)	实际声源位置/(°)	误差/(°)	定位实际误差/m	定位误差/%
经度	112.790 0	112.790 5	0.000 5	55.50	2.78
纬度	38.125 0	38.124 6	0.000 4	36.27	1.81

4 总结

为了探究适用于广域低频声信号定位的方法，本文利用声阵列系统在外场环境下进行试验，在阵列相同的情况下，分析了波束形成方法与时延最小方差方法的定位盲区，进而合理布设声源位置。验证了在千米级尺度下时延最小方差法相较于波束形成方法对低频声源的定位具有明显优势，定位准确度提高了2.1%以上。时延最小方差方法具有定位精度高、鲁棒性强等优点，为复杂环境下广域声阵列定位提供了有效手段，有助于拓宽我国声源定位技术的应用范围。

参考文献

[1] 何敬玉, 刘吉铮, 杨志晨, 等. 多旋翼无人机噪声源跟踪定位系统研发及测试[J]. 现代防御技术, 2024, 52(3): 1-8.
HE J Y, LIU J Z, YANG Z C, et al. Development and-

testing of multi rotor unmanned aerial vehicle noise source tracking and positioning system [J]. Modern Defense Technology, 2024, 52(3): 1-8. (in Chinese)
[2] 张中盘, 张明, 时瑛, 等. 皮带输送机托辊故障声源定位方法[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(1): 142-147.
ZHANG Z P, ZHANG M, SHI Y, et al. Sound source localization method for belt conveyor idler faults [J]. Noise and Vibration Control, 2024, 44(1): 142-147. (in Chinese)
[3] 范雨泽, 刘舰. 基于声音识别技术的机器人动态导航系统设计[J]. 电声技术, 2024, 48(10): 15-18.
FAN Y Z, LIU J. Design of dynamic navigation system for robots based on sound recognition technology [J]. Audio Engineering, 2024, 48(10): 15-18. (in Chinese)
[4] HAN P C, YAN Q, HOU F, et al. Application of microphone array using compressed sensing algorithm for abnormal sound localization in aircraft strength test [C]// 2023 6th International Conference on Information Communica-

- tion and Signal Processing (ICICSP), Xi'an, China, 2023: 1-6.
- [5] 崔玮玮, 曹志刚, 魏建强. 声源定位中的时延估计技术[J]. 数据采集与处理, 2007(1): 90-99.
CUI W W, CAO Z G, WEI J Q. Time delay estimation techniques in source localization[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2007(1): 90-99. (in Chinese)
- [6] 蒋相斌, 白宗龙, 孙金玮, 等. 强混响条件下基于广义互相关的声源定位算法改进[J]. 计测技术, 2018, 38(1): 43-47.
JIANG X B, BAI Z L, SUN J W, et al. An improvement for accuracy of acoustic source location based on general cross-correlation in high reverberation environment[J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(1): 43-47. (in Chinese)
- [7] 张炳毅, 付强, 徐佳, 等. 声源定位系统动态校准方法研究[J]. 计测技术, 2019, 39(5): 51-54.
ZHANG B Y, FU Q, XU J, et al. Research on calibration method for dynamic characteristics of sound source location system[J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(5): 51-54. (in Chinese)
- [8] OSTROVSKY A. E. Geodesy and physics of the earth: proceedings of the third international symposium[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1977: 673-680.
- [9] 谢金来, 谢照华. 大气核爆炸次声监测系统[J]. 核电子学与探测技术, 1997(6): 9-12, 31.
XIE J L, XIE Z H. Infrasound monitoring system for atmospheric nuclear explosions[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1997(6): 9-12, 31. (in Chinese)
- [10] 尚楚翔, 滕鹏晓, 吕君, 等. 大气次声源定位算法及误差分析[J]. 声学技术, 2020, 39(3): 360-365.
SHANG C X, TENG P X, LV J, et al. Localization algorithm for infrasound source in air and its error analysis[J]. Technical Acoustics, 2020, 39(3): 360-365. (in Chinese)
- [11] 殷昊, 庞新良, 张震川. 三元次声阵定位火箭发射的方法[J]. 声学技术, 2021, 40(5): 728-733.
YIN H, PANG X L, ZHANG Z C. The method of locating rocket launching with ternary infrasonic array[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(5): 728-733. (in Chinese)
- [12] 吕君, 杨亦春, 冯浩楠, 等. 北京一次小震级地震前异常声-重力波产生机理的研究[J]. 声学学报, 2015, 40(2): 307-316.
LV J, YANG Y C, FENG H N, et al. Study on generation mechanism of anomalous acoustic-gravity waves before the 2011 Beijing earthquake[J]. Acta Acustica, 2015, 40(2): 307-316. (in Chinese)
- [13] 于国栋, 王世赞, 王春阳. 一种改进的弹丸落点声学定位方法[J]. 声学学报, 2019, 44(6): 986-993.
YU G D, WANG S Z, WANG C Y. Improved acoustic localization method for projectile dropping point[J]. Acta Acustica, 2019, 44(6): 986-993. (in Chinese)
- [14] 张炳毅, 黄日恒, 杨军, 等. 次声监测系统设计和次声传感器相位校准技术研究[J]. 计测技术, 2016, 36(5): 9-13.
ZHANG B Y, HUANG R H, YANG J, et al. Design of infrasound monitor system and phase calibration of infrasonic transducers[J]. Metrology & Measurement Technology, 2016, 36(5): 9-13. (in Chinese)
- [15] 杨亦春, 郭泉, 吕君, 等. 大地震前出现的异常次声波观测研究[J]. 物理学报, 2014, 63(13): 224-237.
YANG Y C, GUO Q, LV J, et al. Observation and study of abnormal infrasound waves before major earthquakes[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(13): 224-237. (in Chinese)
- [16] 谢金来, 屠焰, 王俊生. 用于提高信噪比的圆形次声接收阵[J]. 声学学报, 1986(5): 276-283.
XIE J L, TU Y, WANG J S. Circular infrasound receiving array for improving signal-to-noise ratio[J]. Acta Acustica, 1986(5): 276-283. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)

第一作者: 张宸文(2000—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为基于传声器阵列的声源定位技术。



通信作者: 杨军(1979—), 男, 研究员, 工学博士, 主要从事力学声学计量测试技术与仪器、动态测量理论方法研究, 主持国防科研、国家自然科学基金、工信部专项科研、国家重点研发计划等重大重点项目, 获国家科技进步二等奖1项、省部级科技奖4项。

