

彭烁钟, 张俊杰, 强君宝. 基于TDOA的声源定位技术研究与应用[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(12): 163-169. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 24052102

基于TDOA的声源定位技术研究与应用

彭烁钟, 张俊杰, 强君宝

(南京工程学院 信息与通信工程学院, 南京 211167)

摘要: 声源定位技术在多个领域具有广泛的应用, 如智能监控、机器人导航、无人机、语音增强等。其中, 基于到达时间差的定位方法因其高精度和实时性而备受关注。考虑易实现和高精度两项指标, 提出了一种基于到达时间差 (Time Difference of Arrival, TDOA) 算法的声源定位系统。分析了TDOA技术的实现方法, 介绍了声源定位模型、时延估计模型、到达时间差声源定位算法和几何方位坐标预测, 通过比较广义互相关和广义二次互相关, 设置麦克风阵列坐标, 不同信噪比的条件下比较算法性能, 并讨论了噪声和混响对时延估计的影响, 提出了相应的解决方案。文中详细阐述了球面波在声源定位中的应用, 以及广义二次互相关算法如何提高信号抗噪声能力。为了验证算法的有效性, 利用基于几何方位坐标预测的声源定位方法, 并通过实验对比了不同算法的性能。实验结果表明, 改进后的算法在声源定位中表现出优越性, 预测坐标与真实坐标接近, 定位误差较小。这为空间声源定位提供了有效解决方案, 对实际应用具有指导意义。

关键词: TDOA 算法; 声源定位; 定位算法; 定位性能; 广义二次互相关; 时延估计

中图分类号: TN912.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)12-0163-07

Research and application of sound source localization technology based on TDOA

PENG Shuozhong, ZHANG Junjie, QIANG Junbao

(School of Information and Communications Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Sound source localization technology has wide applications in many fields, such as intelligent monitoring, robot navigation, drones, voice enhancement, etc. Among them, the positioning method based on arrival time difference has attracted much attention due to its high accuracy and real-time performance. Considering the two indicators of easy implementation and high accuracy, a sound source positioning system based on the Time Difference of Arrival (TDOA) algorithm is proposed. The implementation method of TDOA technology is analyzed, and the sound source positioning model, time delay estimation model, arrival time difference sound source positioning algorithm and geometric azimuth coordinate prediction are introduced. By comparing generalized cross-correlation and generalized quadratic cross-correlation, the microphone array coordinates are set. The performance of different algorithms is compared under the condition of signal-to-noise ratio, the impact of noise and reverberation on delay estimation is discussed, and corresponding solutions are proposed. The paper elaborates on the application of spherical waves in sound source localization and improves the signal's ability to resist noise of the generalized quadratic cross-correlation algorithm. In order to verify the effectiveness of the algorithm, a sound source localization method based on geometric azimuth coordinate prediction is used, and the performance of different algorithms is compared through experiments. Experimental results show that the improved algorithm shows superiority in sound source localization, the predicted coordinates are close to the real coordinates, and the positioning error is small. This provides an effective solution for spatial sound source localization and has guiding significance for practical applications.

Key words: TDOA algorithm; sound source localization; positioning algorithm; positioning performance; generalized quadratic cross-correlation; delay estimation

0 引言

声源定位技术在多个领域都发挥着重要作用,

无论是语音识别^[1]、智能安防^[2], 还是室内导航和监控^[3], 精确的定位都是实现这些应用功能的关键。近年来, 基于到达时间差 (TDOA) 的声源定位

作者简介: 张俊杰(2003—), 男, 本科生, 主要研究方向: 深度学习; 强君宝(2002—), 男, 本科生, 主要研究方向: 信号处理。

通信作者: 彭烁钟(2002—), 男, 本科生, 主要研究方向: 语音处理。Email: 2974252588@qq.com。

收稿日期: 2024-05-21

哈尔滨工业大学主办 ◆ 专题设计与应用

技术^[4]因其高精度、低成本和易实现等优点受到了广泛关注。TDOA 声源定位技术通过测量声信号到达不同传感器的时间差来估计声源的位置。这种方法无需复杂的角度测量设备,仅通过时间同步的传感器阵列即可实现声源的精确定位。与传统的声源定位方法相比,TDOA 技术具有更高的定位精度和更强的抗干扰能力。

随着科技的不断发展,声源定位技术的应用场景也在不断扩大。在智能家居领域^[5],TDOA 技术可以实现语音控制设备的精确识别与定位,提升用户体验。在公共安全领域^[6],TDOA 技术可以用于监控和追踪异常声音源,及时发现并处理安全隐患。此外,在军事^[7]、航空航天、无人机^[8]等领域,TDOA 技术也有着广阔的应用前景。

因此,文章旨在深入研究基于 TDOA 的声源定位技术,探讨其原理、实现方法以及在实际应用中的挑战与解决方案。通过本文的研究,期望能够为 TDOA 声源定位技术的发展和应用提供有益的参考和借鉴。

1 概述

近年来,声源定位技术得到了广泛的应用和深入的研究。在智能家居、智能安防、智能交通等领域,声源定位技术都起到了重要作用。同时,随着物联网、大数据等技术的不断发展,声源定位技术也将与其他技术相结合,为人们的生活带来更多的安全与便利。随着数字信号处理、传感器技术、人工智能和机器学习等先进技术的问世和应用,声源定位技术水平得到了显著提升。未来,随着科技的不断发展,声源定位技术将会逐步得以完善,为更多领域的应用提供更加精确和可靠的定位服务。

声源定位技术作为一种重要的信号处理手段,在多个领域具有广泛的应用。其中,基于到达时间差(TDOA)的声源定位技术因其高精度、实时性和低成本等优点,成为当前研究的热点之一。TDOA 声源定位技术主要依赖于声信号到达不同传感器的时间差异来实现声源的定位。通过构建传感器阵列,可以收集来自不同方向的声音信号,并测量这些信号到达各个传感器的时间差。基于这些时间差数据,可以利用数学算法和信号处理技术^[9]来估计声源的位置。TDOA 声源定位技术的研究涉及多个方面,包括传感器阵列的优化设计、时间同步技术的实现、噪声和干扰的抑制等。在传感器阵列设计^[10]方面,需要考虑传感器的布局、数量和类型等因素,以

优化定位精度和覆盖范围。在时间同步技术方面,需要确保各个传感器之间的时间误差足够小,以提高定位的准确性。此外,还需要研究有效的噪声和干扰抑制^[11]方法,以提高定位系统的鲁棒性。

2 系统设计

2.1 声源定位模型

TDOA 定位算法^[12]主要有基于几何定位法^[13]、最大似然估计法和机器学习方法。采用的是基于 TDOA 定位算法的几何定位算法。利用时延算法,通过测量声源到达不同传感器的时间差,利用几何关系计算声源位置。声源定位模型的基本框架如图 1 所示。

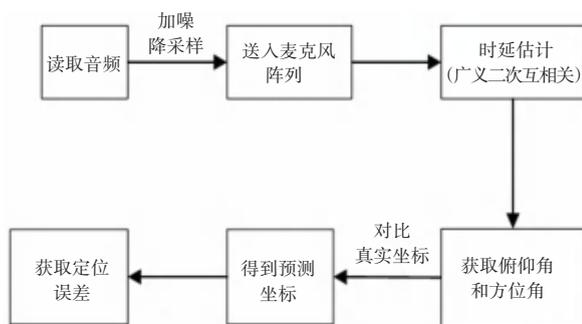


图1 声源定位模型的基本框架

Fig. 1 Basic framework of sound source localization model

2.2 时延估计模型

时延估计^[14]的基本原理是,通过测量信号从发射点到接收点的传播时间差,可以计算出发射点和接收点之间的距离差,从而确定发射点的位置。TDOA 定位系统通常由多个接收器和一个发射器组成。发射器发送信号,接收器接收到信号后,测量信号的到达时间,并将时间信息发送回发射器。发射器根据接收器的时间测量值,计算出每个接收器与发射器之间的距离差,并根据距离差确定发射器的位置。

TDOA 定位系统的数学公式可以表示为:

$$\Delta t = \frac{d \times \Delta T}{c} \quad (1)$$

其中, Δt 表示信号到达时间差; d 表示发射器与接收器之间的距离; c 表示信号传播速度; ΔT 表示信号发送和接收之间的时间间隔。通过测量 Δt ,可以计算出 d ,从而确定发射器的位置。

2.2.1 广义互相关

TDOA 算法中,获取时延估计至关重要。在众多时延估计算法中,广义互相关^[15]函数时延估计法

运用最为广泛,为了减少噪声和混响在实际环境中的影响,在互功率谱域使用加权函数加权^[16],经过

FFT 运算找到峰值估计时延,其流程如图 2 所示。

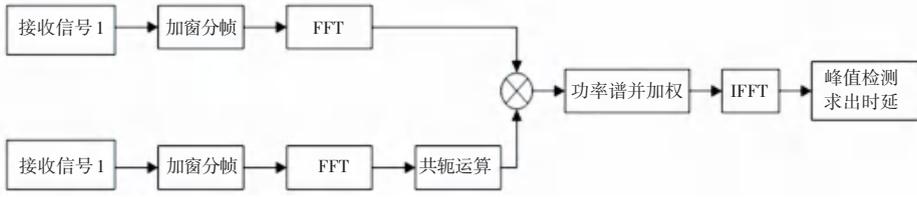


图 2 时延估计流程

Fig. 2 Flow chart of time delay estimation

广义互相关函数 GCC 的计算公式为:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{12}(\omega) G_{x_1x_2}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2)$$

确定声源在二维平面内的位置坐标,至少需要 3 个麦克风;这里分为近场和远场,假设声速波长为 λ ,麦克风之间的距离为 d ,那么声源与麦克风之间的距离大于 $2d/\lambda$ 时,符合远场模型,反之则为近场模型。

对于远场模型,声源达到麦克风阵列的波形视为平面波,如图 3 所示。

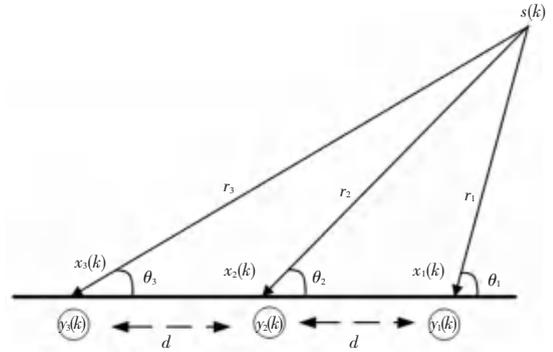


图 4 声源定位估计近场模型

Fig. 4 Near-field model of sound source localization estimation

近场模型有 3 个麦克风,假设 τ_{12} 、 τ_{13} 分别为第 2 个和第 3 个麦克风与第 1 个麦克风的时延,则:

$$\tau_{12} = \frac{r_2 - r_1}{c} \quad (5)$$

$$\tau_{13} = \frac{r_3 - r_1}{c} \quad (6)$$

根据麦克风阵列的几何关系,能够得到:

$$\begin{cases} r_2^2 = r_1^2 + d^2 + 2r_1d\cos\theta_1 \\ r_3^2 = r_1^2 + 4d^2 + 4r_1d\cos\theta_1 \end{cases} \quad (7)$$

其中, τ_{12} 、 τ_{13} 通过时延估计得到,求解方程,进而可以得到 θ_2 和 θ_3 。

2.2.2 广义二次互相关

上文所叙述的广义互相关 (Generalized Cross Correlation, GCC) 利用权函数有效提高了信号时延估计精度,但是抗噪声性能有限,当信噪比较低时,算法性能急剧下降。针对这一问题,广义二次互相关^[17]得到了广泛应用,本文将对这一算法的原理以及代码实现进行总结。

二次互相关^[18],即做 2 次互相关运算。具体表现为,先对信号进行自相关和互相关运算,然后利用得到的自相关和互相关函数,再进行一次互相关运算,以提高信号抗噪声鲁棒性。

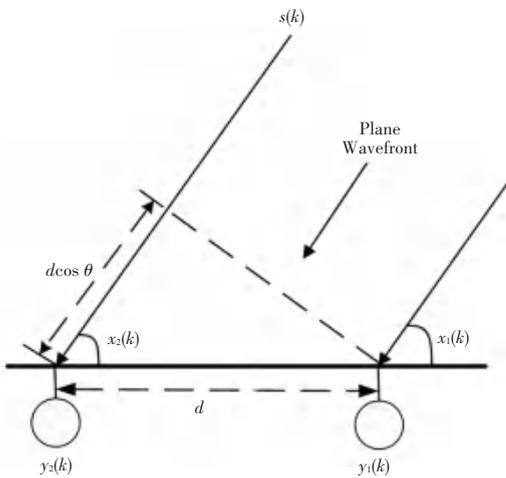


图 3 声源定位估计远场模型

Fig. 3 Far-field model of sound source localization estimation

根据麦克风阵列的几何关系,可得:

$$\hat{\tau} = \frac{d\cos\theta}{c} \quad (3)$$

声源相对麦克风阵列的角度:

$$\theta = \arccos \frac{c\hat{\tau}}{d} \quad (4)$$

对于近场模型,声源达到麦克风阵列的波形视为球面波,如图 4 所示。

针对如下2个信号:

$$x_1(t) = s(t) + n_1(t) \quad (8)$$

$$x_2(t) = s(t - \tau_{12}) + n_2(t) \quad (9)$$

首先,对 $x_1(t)$ 做自相关以及对 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 做互相关,研究得到的公式为:

$$R_{x_1x_1} = E\{x_1(t)x_1(t - \tau)\} \quad (10)$$

$$R_{x_1x_2} = E\{x_1(t)x_2(t - \tau)\} \quad (11)$$

根据噪声假设为零均值的高斯噪声且与信号互不相关,可推得:

$$R_{x_1x_1} = R_{ss}(\tau) \quad (12)$$

以及

$$R_{x_1x_2} = R_{ss}(\tau - \tau_{12}) \quad (13)$$

然后,再对这2个相关函数做互相关:

$$R_{R_{x_1x_1}R_{x_1x_2}} = E\{R_{x_1x_1}(t)R_{x_1x_2}(t - \tau)\} \quad (14)$$

最终得到:

$$R_{R_{x_1x_1}R_{x_1x_2}} = R_{R_s}(\tau - \tau_{12}) \quad (15)$$

同样由互相关函数性质可知,当取最大值时,即2个麦克风之间的时延。再加上合适的权函数,即可实现广义二次互相关算法。

广义二次和修改算法流程如图5所示。

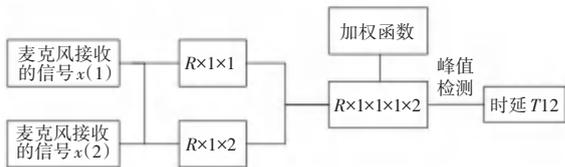


图5 广义二次互相关算法流程

Fig. 5 Flow chart of generalized quadratic cross-correlation algorithm

3 声源定位算法

3.1 基于TDOA的声源定位算法

基于到达时间差的定位技术称为时延估计技术^[19]。所谓时延是指传感器阵列中不同位置的传感器接收到的同源信号由于传输距离的差异而产生的时间差。时延估计就是利用信号处理和参数估计的相关知识,对上述时延进行估计和确定。基于时延估计的声源定位算法就是根据传声器阵列中不同位置的传声器接收语音信号的时延,来估计出信号源的方位。

在现有的基于传声器阵列的声源定位算法中,基于到达时间差的定位算法^[20]的运算量较小,实时性效果比较好,而且硬件成本低,因而倍受关注。基于TDE的声源定位算法一般要分为2个步骤:

(1)先进行时延估计,并确定传声器阵列中不

同传声器对同源语音信号的到达时间差(Time Difrent of Anive, TDOA)。

(2)根据测定出的TDOA和各个传声器的几何位置,通过双曲线方程,来最终确定声源的方位和距离。

因此,只要测定出时间延迟,就可以计算出方位角^[21]的度数,从而确定声源的位置。但是,2个传声器只适用于二维平面的情况,要在实际应用,也就是三维空间中确定出声源位置^[22],就必须采用传声器阵列,用多个传声器测定多个时延和方位角,才能最终准确确定声源的位置。

时延估计算法有很多,例如广义互相关(Generalized Cross Correlation, GCC)法、LMS自适应滤波法^[23]、线性回归法以及互功率谱相位。其中,广义互相关法应用得最广泛。广义互相关法通过求两信号之间的互功率谱,并在频域内赋予一定的加权,来抑制噪声和反射的影响,再反变换到时域,得到两信号之间的互相关函数。而互相关函数的峰值处,就是两信号之间的相对时延。然而在实际应用中,由于噪声等的影响,相关系数会受到或多或少的的影响,最大峰会被弱化,有时甚至还会出现多个峰值,这些都造成了实际峰值检测的困难。而广义互相关法就是在功率谱域对信号进行加权,突出相关的信号部分并抑制受噪声干扰的部分,从而使相关函数在时延处的峰值更为突出。

时延估计的流程见图2。设 $h_1(n)$ 和 $h_2(n)$ 分别为生源信号 $s(n)$ 到2个传声器的冲激响应,则传声器可用以下模型来表示:

$$\begin{cases} x_1(n) = h_1(n) \otimes s(n) + n_1(n) \\ x_2(n) = h_2(n) \otimes s(n) + n_2(n) \end{cases} \quad (16)$$

其中, $n_1(n)$ 和 $n_2(n)$ 分别表示2个传声器所接收到的噪声信号。

对两信号进行滤波处理,设 $x_1(n)$ 与 $x_2(n)$ 的傅里叶变换分别为 $X_1(\omega)$ 和 $X_2(\omega)$,两路滤波器的系统函数分别为 $F_1(\omega)$ 和 $F_2(\omega)$,则滤波后的信号可表示为:

$$\begin{cases} Y_1(\omega) = F_1(\omega)X_1(\omega) \\ Y_2(\omega) = F_2(\omega)X_2(\omega) \end{cases} \quad (17)$$

两传声器接收到信号的广义互相关函数 $R_{12}(\tau)$ 可表示为:

$$R_{12}(\tau) = \int_0^{2\pi} Y_1(\omega)Y_2^*(\omega)e^{-j\omega\tau}d\omega = \int_0^{2\pi} F_1(\omega)F_2^*(\omega)X_1(\omega)X_2^*(\omega)e^{-j\omega\tau}d\omega =$$

$$\int_0^{2\pi} \Phi_{12}(\omega) X_1(\omega) X_2^*(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega \quad (18)$$

其中, $\Phi_{12}(\omega) = F_1(\omega) F_2^*(\omega)$ 为广义互相关加权函数。针对不同的噪声和反射情况, 可以选择不同的加权函数 $\Phi_{12}(\omega)$, 使广义互相关函数具有比较尖锐的峰值。而互相关函数的峰值处, 就是 2 个传声器之间的相对时延。但实际应用中, 由于信噪比较低以及窗长有限, 这种分析往往不稳定, 就要选择合适的加权函数 $\Phi_{12}(\omega)$, 要考虑到高分辨率和稳定性。

3.2 基于几何的方位坐标预测

对于 TDOA 算法中通过麦克风之间的时延^[24], 得到相关的预测坐标, 本文所采用的是基于几何的方法, 得到声源的预测坐标。

对于空间声源的定位, 在已知空间麦克风接收信号时间差^[25]的基础上, 同样可以通过几何定位法估计出声源的位置。设到坐标系原点的距离为 r , 方位角为 φ , 俯仰角为 θ 。声源 S 到各个阵元的距离分别为 r_1, r_2, \dots, r_8 。设观测点为原点, 由于本次实验的阵列为 L 型, 所以设每个麦克风之间间隔相同, 均为 d , 推得如下关系式:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \\ (x+d)^2 + y^2 + z^2 = r_1^2 \\ (x+2d)^2 + y^2 + z^2 = r_2^2 \\ (x+3d)^2 + y^2 + z^2 = r_3^2 \\ (x+4d)^2 + y^2 + z^2 = r_4^2 \\ x^2 + (y+d)^2 + z^2 = r_5^2 \\ x^2 + (y+2d)^2 + z^2 = r_6^2 \\ x^2 + (y+3d)^2 + z^2 = r_7^2 \\ x^2 + (y+4d)^2 + z^2 = r_8^2 \end{cases} \quad (19)$$

对于远场情况, 即当声源到麦克风的距离 r_i 远大于麦克风阵列的阵元间距 d 时, 可以认为其与声源距离相等。通过上文的时延估计算法得到时延后, 得到每个麦克风与声源间角度, 为所计算的方位角和俯仰角:

$$\theta = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{(\tan angH \cdot \tan(\frac{\pi}{2} - angL))^2 + (\frac{1}{\cos angH})^2}}\right) \quad (20)$$

$$\varphi = angL \quad (21)$$

其中, $angL, angH$ 分别表示高低位麦克风的角, 得到相关方位角和俯仰角, 通过如下公式得到预

测的坐标:

$$x = -L \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi + x_1 \quad (22)$$

$$y = L \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi + y_1 \quad (23)$$

本次采用定位误差为欧氏距离, 这里用到的公式为:

$$\Delta d = \sqrt{(X - x)^2 + (Y - y)^2} \quad (24)$$

4 实验结果与分析

4.1 实验设置

本次实验利用 Matlab, 为了验证算法性能, 采用该软件仿真加噪信号, 具体设置的参数如下: 采样频率为 44.1 kHz, 信号为一段动物语音。加噪信号为通过 Matlab 软件自带随机函数生成一定方差的高斯白噪声信号, 利用信噪比将相关的语音混合, 处理仿真成现实麦克风接收的语音信号, 0.1 s 为 1 帧。麦克风阵列主要考虑使用二维 L 型阵列进行接收, L 型阵列的 X 轴和 Y 轴的阵元可以分别视为一个一维的线型阵列, 然后可以分别估计来自声源方向的水平角度和垂直角度, 高位用于检测俯仰角, 低位用于检测方位角, 每个麦克风相隔 20 cm。麦克风阵列坐标见表 1。

表 1 麦克风阵列坐标

Table 1 Microphone array coordinates

编号	坐标(M)	
	高位麦克风	低位麦克风
1	[50.0 0 10.0]	[50.0 0 10.0]
2	[50.0 0 10.2]	[50.2 0 10.0]
3	[50.0 0 10.4]	[50.4 0 10.0]
4	[50.0 0 10.6]	[50.6 0 10.0]
5	[50.0 0 10.8]	[50.8 0 10.0]

通过 Matlab 软件进行仿真实验, 对比广义互相关算法和改进的广义二次算法在不同信噪比条件下的性能。

4.2 实验分析

实验过程如图 6 所示。图 6 中, 绿色为真实坐标数据, 蓝色为预测目标数据, 会随着所划分每一帧进行实时跟踪。研究得到的定位误差如图 7 所示, 可由图 7 来查看算法性能。

将在不同信噪比的情况下各取 3 次值, 分别取平均值、查看广义互相关算法和广义二次互相关算法之间的比较, 比较结果见表 2。

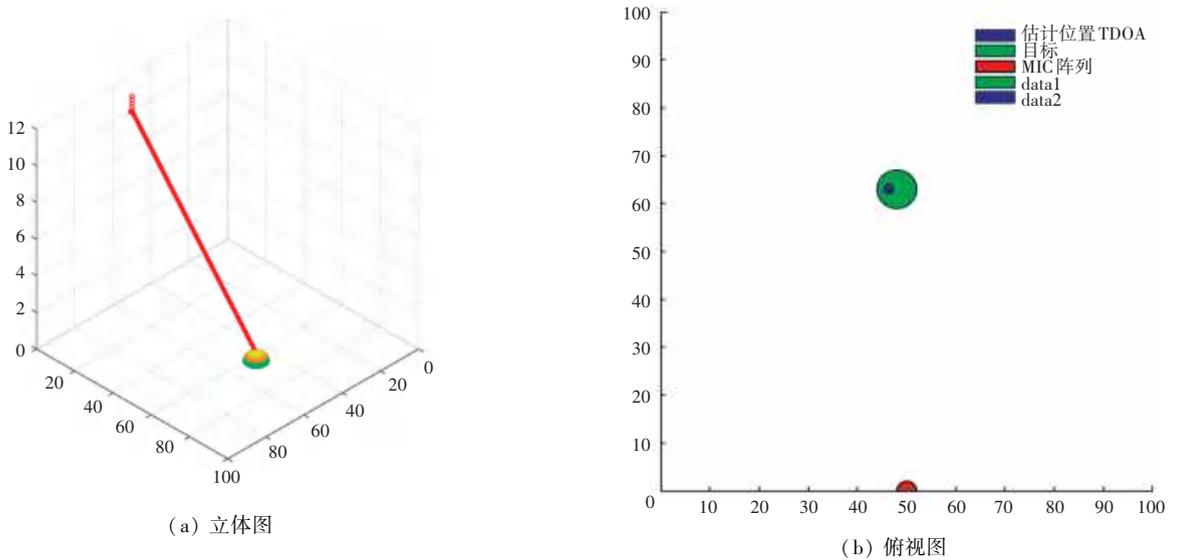


图6 实验过程

Fig. 6 Diagram of experimental process

表2 广义二次互相关与广义互相关对比

Table 2 Comparison between generalized quadratic cross-correlation and generalized cross-correlation

SNR	广义互相关				广义二次互相关			
	1	2	3	均值	1	2	3	均值
20.0	1.549	2.014	1.847	1.803	1.424	1.386	1.413	1.408
10.0	2.283	2.765	2.330	2.459	1.219	1.401	1.402	1.341
5.0	4.517	4.334	4.414	4.422	2.651	2.482	2.490	2.541
0.1	4.729	5.415	4.878	5.001	3.454	3.465	3.471	3.463

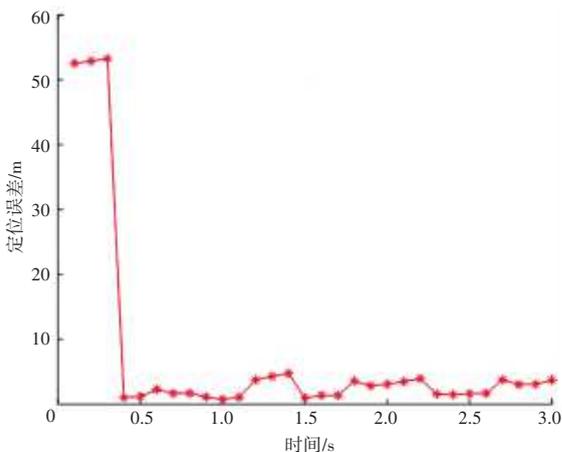


图7 定位误差

Fig. 7 Diagram of positioning error

从表2可知,在相同信噪比的情况下,广义二次互相关的抗噪能力优于广义互相关,并且定位误差值相对较为平稳。在不同信噪比的情况下,广义二次互相关的误差变化幅度不大;而广义互相关,在低信噪比情况下,误差较大,体现了广义二次互相关算法在低信噪比情况下抗噪性能的优越性。

5 结束语

基于到达时间差(TDOA)的声源定位技术以其高精度、实时性和低成本等显著优势,在智能监控、机器人导航、语音增强等多个领域展现出了广阔的应用前景。随着数字信号处理、传感器技术、人工智能和机器学习等最新技术的飞速发展,声源定位技术正迎来新的发展机遇。

本文综述了基于TDOA的声源定位技术的研究现状、主要方法及其优缺点,并探讨了其在实际应用中的挑战与解决方案。通过分析,研究发现TDOA声源定位技术不仅具有高精度和实时性的优点,而且在复杂环境中也表现出了较强的鲁棒性。此外,本技术还具有成本低廉、易于实现等优势,使其在实际应用中具有广泛的适用性。

尽管TDOA声源定位技术具有诸多优点,但在实际应用中仍面临一些挑战。例如,如何优化传感器阵列的布局以提高定位精度?如何消除环境噪声和其他干扰因素对定位结果的影响?这些问题需要

在未来的研究中继续探索 and 解决。

参考文献

- [1] 郝鹏. 基于麦克风阵列的语音识别系统设计[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.
- [2] 邵旭, 王尚全, 王娟. 基于智能安防的含噪声源定位研究[J]. 电子质量, 2014(5): 56-59.
- [3] CHANDRAKALA S, JAYALAKSHMI L S. Environmental audio scene and sound event recognition for autonomous surveillance [J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2019, 52(3): 1-34.
- [4] 苏石, 申冲, 王晨光. 基于模糊集合改进的 TDOA 声源定位方法[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(4): 271-278.
- [5] 郑峰. 一种高效的实时听声辨位系统设计与算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [6] 张能元. 基于室内外无缝定位的快递员监控信息系统设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- [7] TAO Yebo, ZHENG Jieji, ZHANG Yue, et al. Design of laser weapon sniper attack system based on TDOA sound source positioning algorithm [J]. Electronic Production, 2024, 32(5): 53-55.
- [8] 邱佩雯, 钟奇, 俞越. 基于 TDOA 技术的无人机监测定位方法研究[J]. 中国无线电, 2024(3): 63-64.
- [9] 王雨辰. 声定位与识别系统的信号处理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [10] 安梦琪. 基于传感器阵列的点声源定位虚拟仪器系统研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- [11] ZHAO Weidong, XU Xinwei, SONG Rui, et al. Research progress and prospects on localization methods of automobile abnormal noise sources [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(10): 73-83.
- [12] 刘坤, 栾雨, 袁帅, 等. 基于 TDOA 的声源定位系统设计[J]. 工程与试验, 2023, 63(4): 50-52.
- [13] JIANG Shoudong, MAO Zhengchong. Geometric positioning algorithm combined with particle swarm optimization [J]. Digital Technology and Applications, 2023, 41(7): 4-6.
- [14] NIU Yongjian, YANG Fei, LI Hailong. Far-field passive sound source localization algorithm based on time delay estimation [J]. Science, Technology and Engineering, 2024, 24(11): 4560-4566.
- [15] WU Zhaohui, CAI Zhenyu, ZHU Jiajun, et al. Dual microphone array position calibration algorithm based on TDOA [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(3): 41-46.
- [16] 魏文亮, 茅玉龙. 一种改进加权函数的 GCC 时延估计方法研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(5): 16-20.
- [17] YU Ping, YANG Cheng, WANG Ziwei, et al. Generalized quadratic correlation delay estimation algorithm based on joint weighting [J]. Computer Simulation, 2023, 40(3): 400-404.
- [18] LIU Xianglou, AN Mengqi, LIU Zhaoting. Quadratic correlation delay estimation algorithm based on RLLMP and cepstral pre-filtering [J]. Automation and Instrumentation, 2023(5): 18-21.
- [19] WANG Xiaohuai, YI Shubin, CAI Luosi. Precise positioning of sound sources based on TDOA technology and geometric model [J]. China New Technologies and New Products, 2022 (22): 29-31.
- [20] ZHANG Dagui, ZHOU Zhifeng, ZHANG Yi, et al. TDOA sound source localization method based on particle swarm optimization [J]. Electronic Technology, 2023, 36(9): 21-28.
- [21] CHEN Weiye, LIU Guangyi, LI Ou. Research on TDOA geometric positioning tracking algorithm based on AUPF [J]. Computer Application Research, 2022, 39(5): 1519-1523.
- [22] 刘燕都, 焦义文, 马宏, 等. 一种基于 TDOA 的多天线联合测角算法[J]. 电讯技术, 2020, 60(11): 1317-1324.
- [23] 甄国涌, 王森, 程茜茜. 一种改进的 LMS 自适应滤波算法[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(12): 76-79.
- [24] 叶诚, 杨淑莹. 基于到达时间差的声源定位算法与实现[J]. 天津理工大学学报, 2015, 31(2): 50-54.
- [25] 党晓敏. 麦克风阵列声源定位系统的研究与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.