

一种任意布设多元阵列的声定位方法研究

崔林林, 宋 萍, 石庚辰

(北京理工大学 仿生机器人与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘 要:针对传统声定位系统难以满足传感器阵列所需满足的特定几何形状布设问题,提出了一种任意布设多元阵列的声定位方法。由于算法需要保证定位公式中的转换矩阵为非奇异矩阵,因此,最少需要5个阵元满足对声源进行空间定位,具有较好的工程应用前景。通过MATLAB对该算法进行仿真,在500 m×500 m的区域,时延标准差为60 μs,蒙特卡洛次数为500次,计算得出 x 、 y 轴的最大误差不超过0.04 m, z 轴的最大误差不超过0.1 m。由此可见,该定位方法不仅可有效实现对声源的三维定位,并可灵活应用于战场或其他声目标的探测。

关键词:声学;波达时间差(TDOA);任意布设;定位;精度;时延

中图分类号:TN911.72 **文献标识码:**A

Research on an Acoustic Localization Method Based on Arbitrary Layout Array

CUI Linlin, SONG Ping, SHI Gengchen

(Key Lab. of Biomimetic Robots and Systems, Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The conventional acoustic localization system cannot meet the specific geometry of the array layout. An acoustic localization method based on arbitrary layout array is proposed in this paper. Since the algorithm needs to ensure that the transformation matrix is nonsingular, and at least 5 elements are required to localize the sound source, the proposed method has good engineering application prospects. The simulation of the algorithm has been carried out with MATLAB. The simulation area is 500 m×500 m. The delay standard deviation is 60 μs. The numbers of Monte Carlo are 500 times. The maximum errors of x and y -coordinates are less than 0.04 m. The maximum error of z -coordinate is less than 0.1 m. It shows that this algorithm can not only effectively calculate the three-dimensional positioning of the sound source, but also can be flexibly applied to detect the sound or other sound targets on the battlefield.

Key words: acoustic; time difference of arrival (TDOA); arbitrary layout; localization; accuracy; delay

0 引言

常用的声定位算法分为波束成型法、高分辨率谱估计法及波达时间差(TDOA)法3类。由于前2种方法存在计算量大且不利于实时计算等缺点,近几年来,基于TDOA的声定位法得到了高度重视。基于TDOA的被动声定位技术是通过测得声源到声传感器阵列的时延信息,然后采用特定的定位算法进行解算,进而得到声源在空间中的位置信息^[1-3]。目前,国内、外常用的声传感器阵列有四元阵、五元阵、六元阵及圆形阵等。其中,四元阵的缺点是定向定距与方位角有关,且定位精度差^[4];五元阵定位模型能取得较好的定位效果,但俯仰角对定距精度有较大影响^[5-7];该六元阵虽然消除了有效声

速和阵形参数对定向估计精度的影响,但单个阵列对声源距离的估计精度尚未达到实用水平^[8]。由于固定几何形状的声传感器阵列在后期的维护上也存在一定困难,一旦遇到外界因素的影响,而使阵元的位置发生微小变化,将对定位结果产生不必要的误差。虽然也采用任意阵列的定位方法,但是其局限于二维空间且定位区域较小^[9]。因此,本文提出了一种任意布设多元阵列的声定位方法。

1 定位模型

在定位区域内随意布设 $i(i>4)$ 个阵元,进行声源定位时,首先,将各个阵元的位置信息记录并标号,这里可通过GPS模块或全站仪等设备实现;其次,设标号1的阵元为中心阵元,如若标号1的阵元

收稿日期:2016-06-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61074178)

作者简介:崔林林(1986-),男,河南省新乡市人,博士,主要从事声学定位、无线传感器网络的研究。E-mail:cuilinlinxinxiang@126.com。
通信作者:宋萍(1972-),女,山东省莱州市人,教授,主要从事感知与测控技术的研究。E-mail:Sping2002@bit.edu.cn。

工作异常,自动将标号2的阵元设为中心阵元;然后,计算各个阵元相对于中心阵元的时延估计,时延估计法有广义互相关法、互功率谱相位法、自适应滤波法和参量模型法等^[10-12];最后,将时延估计代入定位算法的解算方程,求得声源的空间位置。图1为算法的定位示意图。

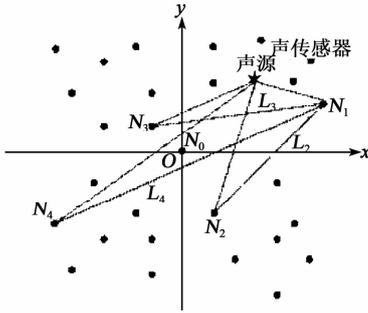


图1 定位示意图

图1中,阵元 i 的坐标为 $N_i(x_i, y_i, z_i)$,声程差为 S_i ,声源坐标为 (x, y, z) , L_i 为阵元 i 到阵元1的距离,其中 $i > 4$,中心阵元坐标为 $N_0(x_0, y_0, z_0)$,声源到中心阵元的距离为 S_0 。根据节点与声源的空间几何关系可得

$$\begin{aligned} (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 = \\ (S_0 - S_i)^2 - 2(x x_i + y y_i + z z_i) + \\ x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 = 2S_0 S_i + S_i^2 \end{aligned} \quad (1)$$

将中心阵元及另外3个阵元的坐标代入式(1),并将其进行分解合并,可得

$$-2 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ S_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \\ S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1^2 - L_1^2 \\ S_2^2 - L_2^2 \\ S_3^2 - L_3^2 \\ S_4^2 - L_4^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

为方便起见,将式(2)写成

$$-2\mathbf{W}\mathbf{K} = \mathbf{Q} \quad (3)$$

式中: \mathbf{W} 为声源坐标及声源与中心阵元的距离组成的一维向量; \mathbf{K} 为4个阵元的坐标及声程差组成的 4×4 的矩阵; \mathbf{Q} 为 $S_i - L_i$ 组成的一维向量。

如果矩阵 \mathbf{K} 可逆,可得

$$\mathbf{W} = -0.5\mathbf{Q}\mathbf{K}^{-1} \quad (4)$$

实验过程中,阵元 N_i 的坐标及 S_i 一般都满足 \mathbf{K} 不是奇异矩阵的条件,因此,可采用式(4)来求解声源的位置及 S_0 。如果出现极端情况, \mathbf{K} 为奇异矩阵,则可通过增加阵元的措施来解决。定位算法的流程图如图2所示。

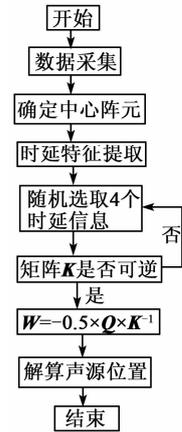


图2 声定位算法流程图

声定位算法步骤:

- 1) 通过声传感器进行数据采集后确定某个阵元为中心阵元。
- 2) 对所有阵元数据信息进行时延特征的提取。
- 3) 随机计算其中4个阵元相对于中心阵元的时延。
- 4) 判断矩阵 \mathbf{K} 是否可逆,如果可逆,则进行下一步,不可逆则返回至随机3个时延的选取。
- 5) 根据式(4)可解算出声源的坐标及 S_0 。

2 仿真分析

在 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的定位区域中, x, y 坐标的变化区域为 $(-250 \text{ m}, 250 \text{ m})$, z 坐标设为 10 m ,进而对该算法进行误差分析。为便于示图,这里取误差的绝对值。令中心阵元的坐标为 $(0, 0, 0)$,为使另外4个阵元的位置满足正态分布,这4个阵元的坐标随机选取为4个象限中, MATLAB 程序中表示为

$$\begin{aligned} N_1: [T^* \text{abs}(\text{randn}), T^* \text{abs}(\text{randn}), t^* \text{randn}]; \\ N_2: [T^* \text{abs}(\text{randn}), -T^* \text{abs}(\text{randn}), t^* \text{randn}]; \\ N_3: [-T^* \text{abs}(\text{randn}), -T^* \text{abs}(\text{randn}), t^* \text{randn}]; \\ N_4: [-T^* \text{abs}(\text{randn}), T^* \text{abs}(\text{randn}), t^* \text{randn}]; \end{aligned}$$

设阈值 $T = 250, t = 50$,令时延标准差为 $60 \mu\text{s}$ 。

蒙特卡洛次数为500次,图3~5分别为坐标 x, y 和 z 的误差分布图。由图可知,坐标 x 和 y 的误差最大值不超过 0.04 m ,坐标 z 的误差最大值不超过 0.1 m 。

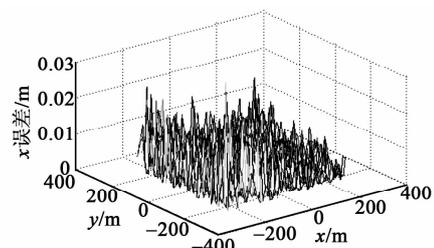


图3 x 坐标误差分布图

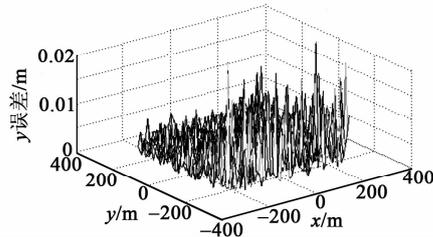


图4 y坐标误差分布图

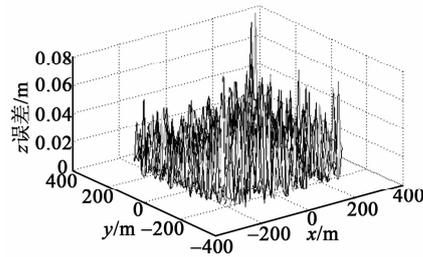


图5 z坐标误差分布图

算法的定距误差如图6所示。其中,定距误差的最大值不超过0.02 m。

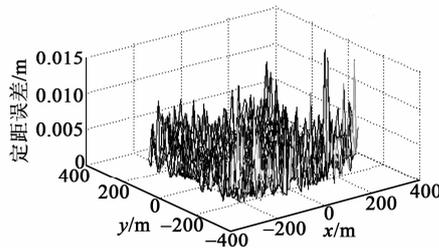


图6 定距误差分布图

由图3~6可知,通过在坐标系的4个象限随机布设4个阵元,根据式(4)可较好解算出声源的坐标及声源距中心阵元的距离。

3 结束语

本文提出了一种任意布设多元阵列的声定位方法。通过MATLAB对该算法进行仿真,在500 m×500 m的定位区域,时延标准差为60 μs,蒙特卡洛次数为500次,计算得出x、y轴的最大误差不超过0.04 m,z轴的最大误差不超过0.1 m。仿真结果表明,该定位方法可有效实现对声源的三维定位。由于可任意布设阵元,因此,可灵活地应用于战场或其他声目标的探测。

参考文献:

[1] CARTER G. Time delay estimation for passive sonar signal processing[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1981, 29(3): 463-470.
 [2] HO K C, LU X, KOVAVISARUCH L. Source localization using TDOA and FDOA measurements in the

presence of receiver location errors; analysis and solution[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(2): 684-696.

- [3] HO K C. Bias reduction for an explicit solution of source localization using TDOA[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(5): 2101-2114.
 [4] 闫石,何轲,赵延安.一种基于四元立体阵的声定向方法[J].电声技术,2007,31(7):16-19.
 YAN Shi, HE Ke, ZHAO Yan'an. A method to estimate bearing with nonplane quaternion array based on DSP[J]. Audio Engineering, 2007, 31(7): 16-19.
 [5] 陈华伟,赵俊渭,郭业才.五元十字阵被动声定位算法及其性能研究[J].探测与控制学报,2003,25(4):11-16.
 CHEN Huawei, ZHAO Junwei, GUO Yecai. Acoustic passive localization algorithm based on a planar five-element array and its performance analysis[J]. Journal of Detection & Control, 2003, 25(4): 11-16.
 [6] 徐长根,张飞猛.基于五元阵的炮兵声测数学模型研究[J].国外电子测量技术,2008,27(4):7-9.
 XU Changgen, ZHANG Feimeng. Research on acoustic survey model based on five element array[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2008, 27(4): 7-9.
 [7] 孙书学,顾晓辉,孙晓霞.用正四棱锥形阵对声目标定位研究[J].应用声学,2006,25(2):102-107.
 SUN Shuxue, GU Xiaohui, SUN Xiaoxia. Study on localization of acoustic target with a rectangular pyramid array[J]. Applied Acoustics, 2006, 25(2): 102-107.
 [8] 王学清,时银水,朱岩.空间六元麦克风阵列及其定位精度[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(8):1392-1393.
 WANG Xueqing, SHI Yinshui, ZHU Yan. Six microphoned cone-shaped array and its locating accuracy analysis[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(8): 1392-1393.
 [9] 刘庆华,伊晓东.基于分布式任意阵列的宽带信源定位方法研究[J].电子技术应用,2016,42(1):82-86.
 LIU Qinghua, YI Xiaodong. Method research of wide-band sources localization for arbitrary array[J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(1): 82-86.
 [10] KNAPP C H, CARTER G C. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Trans on Acoustics Speech, and Signal Processing, 1976, 24(4): 321-327.
 [11] FUCHS J J. Multipath time-delay detection and estimation[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1999, 47(1): 237-243.
 [12] WU Y. Time delay estimation of non-Gaussian signal in unknown Gaussian noises using third-order cumulants[J]. Electronics Letters, 2002, 38(16): 931-934.