

一种声源定位系统设计

苗 晟¹ 周 维¹ 唐 浩² 吴季达² 姚绍文¹

(云南大学信息学院 昆明 650000)¹ (云南省无线电监测中心 昆明 650000)²

摘 要 对一定区域内的声源目标定位是声学技术的研究方向之一。借鉴 TDOA 算法被动定位思想,并针对声信号特点,可设计基于 TDOA 协同被动定位算法的声场监测系统,用于在空旷场地进行声源监测定位。该系统通过在空旷场地布放 3 个或多个高灵敏度麦克风监测声目标源,通过计算各麦克风收到信号的时间差,采用 Chan 和 Taylor 联合算法,可实现对一定区域内的声目标定位。经过在空旷地实测数据仿真表明,该系统可成功对声目标进行定位,且性能稳定。

关键词 TDOA, 声定位, Chan 算法, Taylor 算法

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

Acoustic Location System Design

MIAO Sheng¹ ZHOU Wei¹ TANG Hao² WU Ji-da² YAO Shao-wen¹

(Information College of Yunnan University, Kunming 650000, China)¹ (Yunnan Radio Detection Center, Kunming 650000, China)²

Abstract Acoustic source location is one of the research point in the acoustic technique. In this paper, we firstly use the idea of TDOA (Time Difference of Arrival) in the acoustic location system design; Putting three or more microphones in the open area, collecting acoustic signal and calculate the time delay between the different microphones, then use a new cooperative location algorithm based on Chan and Taylor algorithm to estimate the target location. The simulations and tests indicate this system can effectively locate the acoustic target in open area, and has stable performance.

Keywords TDOA, Acoustic location, Chan algorithm, Taylor algorithm

1 引言

TDOA (Time Difference of Arrival, 到达时间差) 算法是近年来信号源被动定位的主要方法之一,其通过计算目标源发出的信号(声,光,电磁等),计算不同传感器采集信号的到达时间差对目标源进行定位,该方法原理清晰,抗噪声干扰强,目前已广泛运用在无线电定位中^[1,2]。

基于 TDOA 的特点,该算法不仅适合对无线电信号定位,也很适合应用在声场定位中,只要在空旷场所中非同一条直线上布放 3 个以上的高灵敏度麦克风,就可以完成对一定范围内场所的突发声脉冲监控(例如大厅、广场等场所)。不过,针对声信号和无线信号的差异,具体算法需要进行一定调整和校正,以适应声环境的目标被动定位。但目前尚无相关文献介绍该思想在声学定位中的应用。

本文提出适合针对声目标被动定位的 TDOA 协同算法,该算法通过使用高灵敏度的麦克风接收声信号并计算各路信号间的相对延迟时间,采用 Chan 算法估计声目标的初始位置后,再采用泰勒算法对该初始位置进行校正,最终得到空旷场所声目标的位置坐标。相关系统设计采用 JAVA 实现上位机界面。通过在空旷地试验,表明该系统性能稳定,在安静环境下(例如夜间),能够得出一定精度的声目标位置。

2 声目标的 TDOA 算法

2.1 声定位特点

声场定位是声学研究方向之一。在空旷场所,针对突发

声脉冲,采用声场定位系统可快速判定目标方位,引导后续处理。现有的声定位方法大多采用麦克风阵列定位方法,如直线阵、球面阵等,但由于麦克风阵列受阵列间距的影响,安放受到一定限制,而采用 TDOA 算法不同位置只需要单一传感器,为实际场所需求提供了另一种方案解决思路。

通过在空旷场所布放高灵敏度麦克风监听声信号,可以确定声目标方位。声信号频率相对无线电信号低得多,一般主要能量集中在 5kHz 以内,而且空气中声波传播速度一般只有 340m/s,也比无线电信号在空气中传播速度低得多,这对同步要求很高的 TDOA 算法来说意味着在声定位中的实现更加容易,对相关的硬件采样电路和同步电路也较容易实现。不足之处是声信号在空气中衰减很快,而且易受干扰,所以定位距离受到很大影响,一般在比较安静的环境中能达到百米左右。TDOA 声定位示意图如图 1 所示。

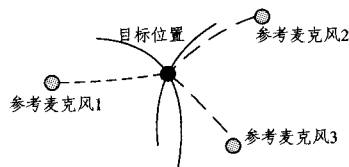


图 1 TDOA 声定位示意图

2.2 基于互功率谱的时间延迟计算

采集三路麦克风信号计算相对时间延迟是 TDOA 算法定位的第一步,考虑到声信号频率相对较低,采样率不高,采用互功率谱方式计算时间延迟能获得较高精度。

将声信号通过傅里叶变换由时域转换成频域信号。

苗 晟(1982—),男,博士生,工程师,主要研究方向为音频信号处理及人工智能,E-mail:wumingzhicao@126.com。

$$F_x(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi\tau t} dt \quad (1)$$

$$F_y(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) e^{-j2\pi\tau t} dt \quad (2)$$

通过上式求出互功率谱密度函数:

$$G_{X_1 X_2}(\tau) = F_x(\tau) F_y^*(\tau) \quad (3)$$

式中, $F_y^*(\tau)$ 为 $F_y(\tau)$ 的共轭。

由于声环境干扰较为严重,加之背景噪声的存在,广义互相关估计可能没有明显的尖峰存在。为了凸现尖峰并降低误差,可以先对麦克风接收到的声信号进行数字滤波处理,它等效于在频域的加权处理,这可以加强接收信号中源信号的谱分量,提高信噪比,从而获得更高的时间差估计精度。

基于互功率谱的广义互相关算法,对频域进行加权处理后,可对信号和噪声进行白化处理,以增强信号中信噪比较高的频率成分,抑制信道中噪声的影响,再通过反傅里叶变换将其变换到时域,得到两信号之间的广义互相关函数。

$$R_{xy}^g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A G_{X_1 X_2}(\tau) e^{-j2\pi\tau t} d\tau \quad (4)$$

式中, A 为广义互相关的加权函数。根据信号和噪声的不同情况,针对不同的噪声干扰选取不同的权值使基于互功率谱的广义互相关函数的峰值锐化。通过搜索峰值,得出时间延迟参数,进入下一步分析。

2.3 Chan 算法和 Taylor 算法简介

Chan 算法是一种求解双曲线方程组的非递归算法。该算法采用两步最大似然估计^[4]。该算法的特点是计算量小,在噪声服从高斯分布的环境下,定位精度高。但在非视距环境下^[5], Chan 算法^[6]的定位精度显著下降。

声场定位中,只要求出了各麦克风间的相对延迟参数,就可以得到目标到各麦克风间的距离差,多个测量值就可以构成一组关于声目标位置的双曲线方程组,求解该双曲线方程组就可得到目标的估计位置。设 (x, y) 为目标的待估计位置, (x_i, y_i) 为第 i 个麦克风接收点的已知位置,则目标和第 i 个麦克风之间的距离有:

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 - (y_i - y)^2}$$

$$R_i^2 = (x_i - x)^2 - (y_i - y)^2 = K_i - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2 \quad (5)$$

其中 $K_i = x_i^2 + y_i^2$ 。 $R_{i,1}$ 为目标与第 i 个麦克风和第一个麦克风的距离差,则:

$$R_1 = \sqrt{(x_i - x)^2 - (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 - (y_1 - y)^2} \quad (6)$$

由式(6)整理得到:

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 + R_1^2 = K_i - 2X_i x - 2Y_i y + x^2 + y^2 \quad (7)$$

在 $i=1$ 时式(7)为:

$$R_1^2 = K_1 - 2X_1 x - 2Y_1 y + x^2 + y^2 \quad (8)$$

从式(7)减去式(8),结果为:

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 = K_i - 2X_{i,1}x - 2Y_{i,1}y + K_1 \quad (9)$$

先假设 R_1 为已知,则 MS 位置 (x, y) 可由式(9)按以下形式解出;

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} R_{2,1} \\ R_{3,1} \end{bmatrix} R_1 + \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ R_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (10)$$

将式(10)代入式(5),令 $i=1$,得到一个关于 R_1 的二次方程,将其正根代回式(6),就得到目标的估计位置。但 Chan 算法在由于求解二次方程组,精度受到一定影响,所以求解的方位信息需要进一步矫正。

泰勒序列表展开式是需要已知初始估计位置的递归算法^[6],在每一次递归中通过求解 TDOA 测量误差的局部最小二乘(LS)解来改进估计位置。对于一组 TDOA 测量值,该算法首先将式(2)在选定目标的初始位置 (x_0, y_0) 进行泰勒展开,忽略掉二阶以上分量^[7],该式转化为:

$$h = G\Delta + \varepsilon \quad (11)$$

其中:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}, h = \begin{bmatrix} R_{2,1} - (R_2 - R_1) \\ R_{3,1} - (R_3 - R_1) \\ \vdots \\ R_{m,1} - (R_m - R_1) \end{bmatrix}$$

$G =$

$$\begin{bmatrix} (X_1 - x)/R_1 - (X_2 - x)/R_2 & (Y_1 - y)/R_1 - (Y_2 - y)/R_2 \\ (X_1 - x)/R_1 - (X_3 - x)/R_3 & (Y_1 - y)/R_1 - (Y_3 - y)/R_3 \\ \vdots & \vdots \\ (X_1 - x)/R_1 - (X_m - x)/R_m & (Y_1 - y)/R_1 - (Y_m - y)/R_m \end{bmatrix} \quad (12)$$

对式(11)采用加权最小二乘算法(WLS),可以得到 Δ 的最小二乘估计:

$$\Delta = (G^T Q^{-1} G)^{-1} G^T Q^{-1} h \quad (13)$$

式中, Q 为 TDOA 测量值的协方差矩阵,用 Chan 的定位结果加上式(13)的 Δ 值便是最终的估计值。在初始位置采用 Taylor 算法进行矫正,可以极大提高声目标位置的估计精度。

特别注意的是由于 Taylor 级数展开法初始值的选取对定位结果影响很大,如果 Taylor 算法的初始值选取不恰当,则会导致 Taylor 算法的不收敛^[8]。因此,必须先通过某种算法,对测量数据进行初始定位,并将定位的结果作为 Taylor 级数展开法的初始值,然后再利用 Taylor 级数展开法进行定位运算。针对声信号的特点,选择作为初始定位的算法应该具备运算速度快、定位结果较精确的特点,而 Chan 算法恰好具有所期望的优点,它的定位结果反映了目标位置的大致坐标。虽然,Chan 算法在远距离情况下及背景噪声较大的情况下定位精度将有所下降,但其初始估计值有利于 Taylor 算法的收敛。因此,基于 Chan 算法和 Taylor 算法的协同定位的 TDOA 方法是一个有效的选择。

2.4 声目标的 TDOA 定位系统设计

针对上述分析,设计结合声目标特性的被动 TDOA 定位系统。该系统使用适合在声信号的 TDOA 被动定位算法,系统框如图 2 所示。

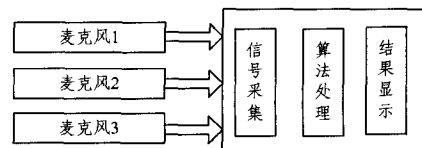


图 2 声定位系统流程

系统算法流程如图 3 所示。

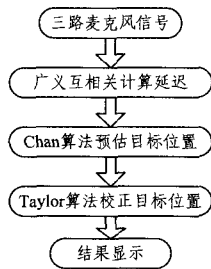


图 3 TDOA 协同声定位算法流程

该算法通过布放的高灵敏度的麦克风(不少于 3 个,且任意 3 个麦克风不在同一条直线上)接收目标声源信号,注意麦克风的接收精度直接影响到系统的定位距离和定位精度。

对于各麦克风采集到的声信号,首先采用基于互功率谱的广义互相关方法求解声源目标到各麦克风间的时间延迟,其次采用 Chan 算法对目标位置进行初步定位计算,并将 Chan 的定位结果作 Taylor 级数展开算法的初始值,再使用泰勒算法对该初始值进行迭代校正,进行多次迭代后当 Δ 的值小于阈值时,用 Chan 的定位结果加上 Δ 便是最终的估计值。

该思想主要是要注意各麦克风采集信号的时间同步,以保证系统能够计算出正确的时间延迟,避免 Chan 算法不收敛。

3 算法仿真

为检验该系统的定位效果,在某空旷场所进行声定位试验,在该场所不同地点布放 5 个高灵敏度接收麦克风,并保证任意 3 个不在同一条直线上。采用音响发射模拟噪声源。

图 4 是 5 个麦克风接收到的声信号,通过选择幅度较大的 3 路信号进行 TDOA 算法声场定位。

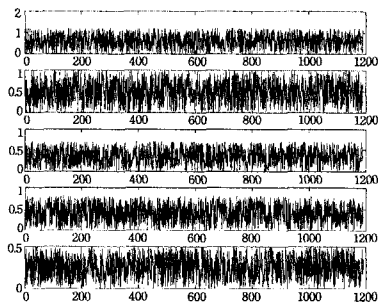


图 4 麦克风接收到的 5 路声信号

图 5 是对选择出的 1、2 路信号进行 Path 函数加权得出的广义互相关函数图。

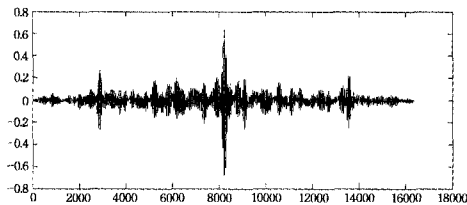


图 5 权值为 Path 的基于互功率谱的广义互相关函数

从图 5 来看,在高信噪比的情况下,即周边环境比较安静

的时候,相关函数能较准确地估计时延,不同的权值函数对基于互功率谱的广义互相关函数明显起到了锐化峰值的作用,前期的算法仿真表明 Path 权值的锐化效果明显。但是在实际应用中,接受到噪声干扰方式可能会有变化,有时是多径效应影响严重,有时是随机噪声,需要根据具体情况选择不同加权方式。

在得到延时时间差后,通过图 3 所示的基于 Chan 算法和 Taylor 算法的协同定位的 TDOA 方法对目标进行定位,定位结果在系统界面上的显示如图 6 所示。经校验,该定位结果与目标实际方位吻合,误差约在 5m 左右,基本达到定位目的。

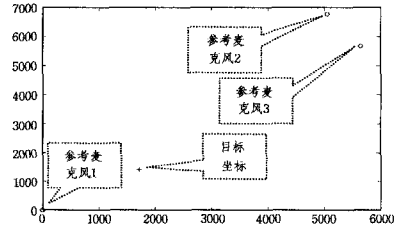


图 6 TDOA 算法对声目标的定位结果

结束语 本文结合声信号特点,首次提出了声场 TDOA 定位算法,并采用 Java 编写了上位机运用程序,实现了实时声场定位监测。该系统计算包含 3 个基本步骤,分别为各麦克风间的延迟时间估计、目标方位初始估计和最终校正显示。其中基于 Chan 和 Taylor 级数展开的协同定位算法是本算法应用的重点,该算法流程充分考虑了 Chan 算法和 Taylor 算法的优缺点,巧妙利用了 Chan 算法的估计值作为 Taylor 算法的初始值进行迭代计算,解决了 Taylor 算法由于初始值选择不当造成算法不收敛的问题。在空旷清静场所的仿真结果表明,本文提出的采用协同声定位方法的 TDOA 算法在实际环境下能完成声目标定位,定位误差约为数米。

参考文献

- [1] Yap J H, Ghaheri-Niri S, Tafazolli R. Accuracy and hearability of mobile positioning in GSM and CDMA networks[C] // 3G Mobile Communication Technologies, Third International Conference. 2002;350-354
- [2] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. Signal Processing, IEEE Transactions, 1994, 42(8):1905-1915
- [3] Foy W H. Position-location solutions by Taylor series estimation [J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1976, 12(3):187-194
- [4] Chau H C, Robinson A Z. Passive source location employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival difference[J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1987, ASSP-35(1):1223-1225
- [5] 陈德章,唐插,吴季达.基于 Chan 和 Taylor 的 TDOA 协同定位算法研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(Z10):406-407, 411
- [6] 唐皓,吴季达,鲁东生.基于 TDOA 原理计算信号源位置的算法探讨[J]. 计算机科学, 2011, 38(Z10):467-469
- [7] 周康磊,毛永毅.基于残差加权的 Taylor 级数展开 TDOA 无线定位算法[J]. 西安邮电学院学报, 2010, 15(3):2-3