

# 基于能量衰减的增量式声源跟踪算法研究

杨 洋<sup>1</sup>, 王秀芹<sup>2</sup>

(1. 渤海大学 工学院, 辽宁 锦州 121013;

2. 渤海大学 信息科学与技术学院, 辽宁 锦州 121013)

**摘 要:**声源定位属于典型的被动定位, 基于声源定位与跟踪在实际中具有广泛的应用。文中利用声音随距离的能量衰减模型, 提出了最小二乘的增量式声源跟踪算法形式, 并在二维空间分别给出了声源的定位, 位置式及增量式声源跟踪算法的实验结果。位置式及增量式声源跟踪算法是跟踪算法的两种表现形式, 实际中可根据跟踪算法的复杂度和具体的控制对象进行选择。由于只需计算声源移动增量, 与传统的位置式算法相比, 增量式声源位置跟踪算法具有控制器调整方便、容错性强等特点。

**关键词:**无线传感器网络; 声源定位; 声源跟踪; 增量式; 能量衰减

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2014)12-0041-04

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-629X.2014.12.010

## Research on Incremental Tracking Algorithm of Sound Source Based on Energy Attenuation

YANG Yang<sup>1</sup>, WANG Xiu-qin<sup>2</sup>

(1. School of Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, China;

2. School of Information Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, China)

**Abstract:** Sound source localization is typical passive method and has widely used in application. In this paper, using the energy attenuation model of sound to distance, propose the algorithm of incremental form of the sound source tracking with the least square, and give the positioning of the sound source in two-dimensional space, and the experimental results of sound source algorithm with the positioning and increment. The positioning and incremental sound source tracking algorithm are two forms of tracking algorithm, which can be selected according to the actual tracking complexity and specific control objects. Because of only calculating the increment of the moving source, compared with the conventional position-type algorithm, the incremental tracking algorithm has the characteristics that controller is easy to adjust, the fault-tolerant performance is well.

**Key words:** wireless sensor networks; sound source positioning; sound source tracking; increment form; energy attenuation

## 0 引言

所谓无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSN), 是指由低成本且低功耗的微型无线传感器节点通过自组织通信形成的分布式网络。在无线传感器网络中, 对目标的定位和跟踪的需求日益迫切, 并使之成为无线传感器网络中的一个研究热点。无线传感器网络的定位及跟踪问题在军事、反恐、工业、农业、环境监控、抢险救灾、医疗护理、视频监控、语音识别、报告人跟踪、机器人探测等领域都有广泛应用<sup>[1-10]</sup>。

目标定位技术是利用传感器网络节点的分布协

作, 通过检测节点信息并通过一定算法估算出目标的具体位置。无线传感器网络在目标定位方面有以下优势及不足: 优势如超大规模、自组织、分布协作; 不足主要体现在计算存储能力、电源能量、通信能力等方面<sup>[2-6, 9-10]</sup>。声源定位属于典型的被动定位, 基于声音信号的定位具有不易受电磁波干扰、不受视线和能见度影响等特点, 且声音探测传感器技术成熟, 成本低廉。因而声源定位与跟踪在实际中有广泛的应用, 研究基于无线传感器网络的声源定位技术具有重要的理论研究意义和实用价值<sup>[7, 11]</sup>。

## 1 声音能量定位的基本模型

若某一区域随机放置若干传感器节点,当声源发出信号时,每个传感器对接收的声音能量信号进行测量并传输给融合中心,融合中心根据相应的算法进行定位<sup>[12]</sup>。基于节点接收能量的定位算法常见有以下几种<sup>[5]</sup>:能量比例法(Energy Ratio)、最大似然法(Maximum Likelihood)、CPA 算法(Closest Point of Approach)等。假设监测区域内传感器节点的位置已知,各个方向声音的传递衰减模式相同,采用与文献[13-14]相同的声音衰减模型,第  $i$  个传感器在  $t$  时刻接收能量的表达式为:

$$E_i(t) = g_i \frac{S(t)}{d_i^2(t)} + \varepsilon_i(t) \quad (1)$$

式中,  $S(t)$  是声源的能量值;  $g_i$  是第  $i$  个传感器节点的增益;  $d_i$  是声源和第  $i$  个传感器节点之间的距离;  $\varepsilon_i(t)$  为叠加的背景噪声能量值且与声信号不相关。为简化起见,文中测量噪声  $\varepsilon_i(t)$  均为均值为 0、方差为  $\sigma$  的高斯白噪声,所有节点  $g_i$  都设为 1。

## 2 声源位置跟踪算法

设接收传感器位置为  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ 。声源

$$\begin{aligned} x_1^2 - x_n^2 - 2(x_1 - x_n)x + y_1^2 - y_n^2 - 2(y_1 - y_n)y &= d_1^2 - d_n^2 \\ x_2^2 - x_n^2 - 2(x_2 - x_n)x + y_2^2 - y_n^2 - 2(y_2 - y_n)y &= d_2^2 - d_n^2 \\ &\vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 - 2(x_{n-1} - x_n)x + y_{n-1}^2 - y_n^2 - 2(y_{n-1} - y_n)y &= d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{aligned} \quad (5)$$

上述方程可重新表示为

$$\begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ 2(x_2 - x_n) & 2(y_2 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 - d_1^2 + d_n^2 \\ x_2^2 - x_n^2 + y_2^2 - y_n^2 - d_2^2 + d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 - d_{n-1}^2 + d_n^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

即

$$\hat{A}\hat{X} = \hat{b}, \hat{X} = (\hat{A}^T \hat{A})^{-1} \hat{A}^T \hat{b} \quad (7)$$

其中,  $\hat{X}$  为估计声源位置;  $\hat{A}$  和  $\hat{b}$  如下所示:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ 2(x_2 - x_n) & 2(y_2 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}$$

$$\hat{b} = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 - d_1^2 + d_n^2 \\ x_2^2 - x_n^2 + y_2^2 - y_n^2 - d_2^2 + d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 - d_{n-1}^2 + d_n^2 \end{bmatrix}$$

对于第  $i$  次声源移动的变化量的估计值为

$$\Delta \hat{X}_i = \hat{X}_i - \hat{X}_{i-1} = (\hat{A}^T \hat{A})^{-1} \hat{A}^T \hat{b}_i - (\hat{A}^T \hat{A})^{-1} \hat{A}^T \hat{b}_{i-1} =$$

位置为  $(x, y)$  需由算法估计。第  $i$  个传感器与声源位置之间距离为  $d_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ 。空间距离文中定义为二维欧氏距离,如式(2)所示。

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (2)$$

一般情况下,  $d_i$  在实验中可由式(3)获得,  $S(t)$  为声源能量,  $E_i(t)$  为第  $i$  个传感器接收信号能量,即为声源能量和接收传感器能量之比。实验中可根据能量测量结果获得第  $i$  个传感器到声源位置间的距离  $d_i$ 。

$$d_i^2 = \frac{S(t)}{E_i(t)} \quad (3)$$

考虑到具体的声源位置和传感器位置坐标,根据公式(2),可以得到以下公式。

$$\begin{aligned} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= d_2^2 \\ &\vdots \\ (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 &= d_n^2 \end{aligned} \quad (4)$$

最小二乘法定位原理通过寻找多个“能量比”表征的超球面交集来估计目标位置<sup>[11]</sup>。根据最小二乘法,将方程(4)中第一个方程分别减去最后一个方程可得:

$$(\hat{A}^T \hat{A})^{-1} \hat{A}^T \Delta \hat{b} \quad (8)$$

其中,  $\Delta \hat{b} = \hat{b}_i - \hat{b}_{i-1}$ 。

仿照位置式 PID 算法和增量式 PID 算法的名称,文中将从方程(7)中估计出的声源位置过程定义为位置式跟踪算法,此算法在跟踪过程中,每次需要重新估计声源位置;而在方程(8)中,每次估计声源位置的变化量,文中将此跟踪算法形式定义为增量式声源位置跟踪算法。

位置式声源位置跟踪算法与增量式声源位置跟踪算法,是跟踪算法的两种表现形式,实际中可根据跟踪算法的复杂度和具体的控制对象进行选择。下面将在仿真实验过程中给出两种算法的具体跟踪描述。

## 3 仿真实验

(1) 二维空间声源定位。

仿真实验参数如下:已知声源的位置及传感器节点分布在二维空间 5 m×5 m 的方形区域。传感器布设位置随机给出。已知声源发射能量数值为 1 000,六个传感器节点的随机位置如图 1 所示,分别为(0,0),(1,2),(2,2),(3.5,1.5),(4.1,2),(4.5,5),实际声源位置为(1,3)。其中接收传感器为声源随距离衰减后的能量并叠加含有能量分布均值为 0、方差为 1 的正态分布的高斯噪声,声源定位结果为(1.015 8,2.993 0)。

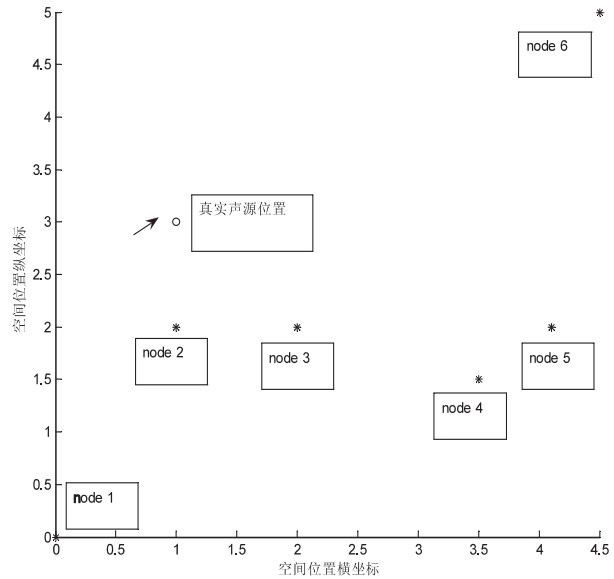


图 1 声源定位结果

由于在公式(5)中利用消去高次法,用前  $n-1$  个方程分别减去第  $n$  个方程,因此,解的精度受制于第  $n$  个方程的观测误差<sup>[15]</sup>。测量数据中噪声对方程的求解有较大影响,接收的声音能量信号含有较小的噪声就会使得方程无解<sup>[11]</sup>。表 1 给出了噪声能量方差变化时所估计声源位置坐标的变化情况。

表 1 定位坐标与噪声能量方差

	横坐标/m	纵坐标/m
$N(0,1)$	1.015 8	2.993 0
$N(0,3)$	1.005 2	2.860 9
$N(0,5)$	1.164 1	2.746 5
$N(0,7)$	1.043 3	2.643 1
$N(0,9)$	1.026 4	2.663 4

为了比较定位效果,定义定位偏差如公式(9)。

$$\text{err} = \sqrt{(x - \hat{x}_k)^2 + (y - \hat{y}_k)^2} \tag{9}$$

式中, $X(x,y)$ 和 $X(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$ 分别为真实声源位置和估计声源位置; $\text{err}$ 为第  $k$  次比较结果,它与接收传感器噪声能量数值有关。图 2 给出了试验中噪声能量方差与偏差的关系图。

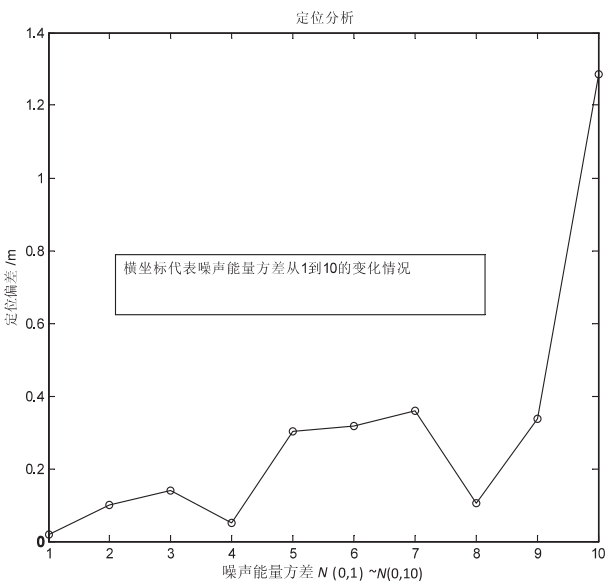


图 2 偏差分析

(2) 二维空间声源跟踪。

仿真实验参数如下:已知声源的位置及传感器节点分布在二维空间 5 m×5 m 的方形区域。传感器布设位置随机给出,这里与二维空间声源定位中位置相同,其中接收传感器为声源随距离衰减后的能量并叠加含有能量均值为 0、方差为 1 的正态分布的高斯噪声,声源移动路径为以(2,2)为圆心,半径为 2 的圆周。仿真实验需估计声源移动位置坐标。采用位置式和增量式声源跟踪算法得到的实验结果分别如图 3 和图 4 所示。

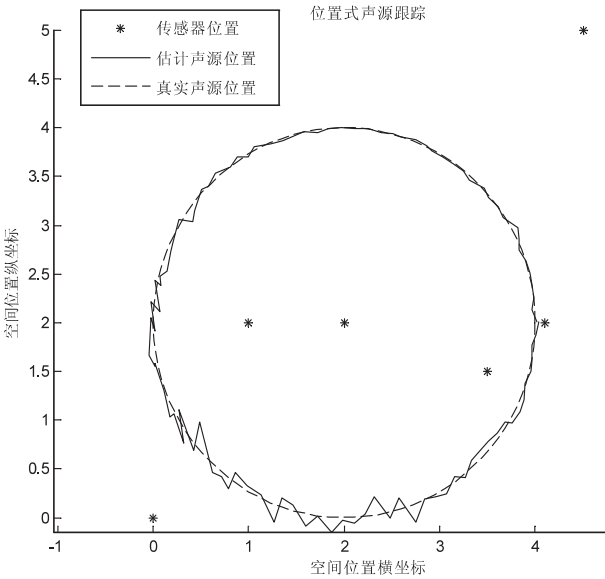


图 3 位置式声源跟踪算法实验效果图

为了验证跟踪效果,定义累计误差如下所示

$$\text{err} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_k - \hat{x}_k)^2 + (y_k - \hat{y}_k)^2} \tag{10}$$

其中, $(x_k, y_k)$ 和 $(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$ 分别为声源移动后的真实位置和估计位置; $k$ 为传感器采集次数。

仿真环境下 (Matlab 7.0, Mathworks) 运行 1 000 次, 位置式与增量式算法得到的累积误差分别为 24.976 4 和 24.885 7; 仿真运行 10 000 次, 位置式与增量式算法得到的累积误差分别为 249.005 7 和 252.021 4。由于本实验中接受传感器噪声随机性, 二者仿真实验结果中累计误差及跟踪路径略有不同, 多次实验可以得出, 两种算法跟踪效果基本一致。

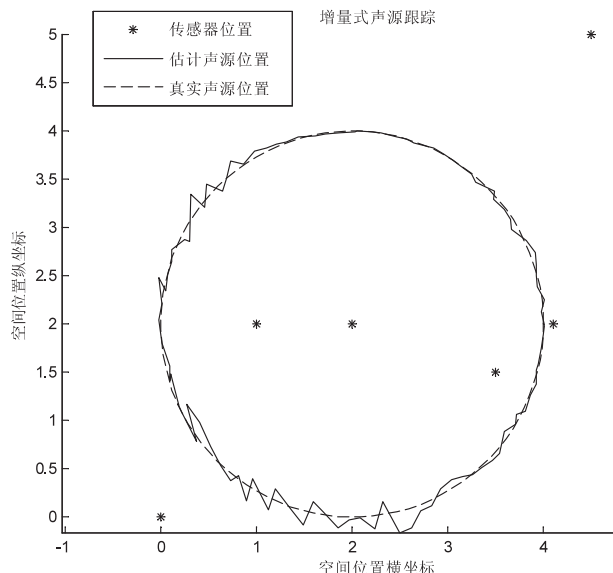


图 4 增量式声源跟踪算法实验效果图

从数据的发送、接收、处理容错等方面来讲, 增量式声源位置跟踪算法由于计算控制增量, 更加简单实用。且当被跟踪目标移动量较小时, 即控制增量小于设定阈值, 增量式声源位置跟踪算法所控制的执行器不必频繁动作, 降低算法的跟踪负担, 提高实时性。如跟踪报告人的位置, 摄像头的角度转换, 机器人自动寻找声源等, 当计算机出现故障, 数据传输发生错误等情况出现时, 增量式算法仍可具有容错性, 执行器位置 (如摄像头, 跟踪器的旋转角度) 仍可保持前一步的位置, 不会给被控对象带来较大的扰动, 也可根据采集时间、变化范围, 及时做出适当调整, 避免出现大角度误操作。

## 4 结束语


文中仿真实验是基于声音能量衰减模型进行研究。针对二维空间声源的定位及跟踪给予仿真实验, 尤其给出了增量式声源位置跟踪算法的实现过程并对其物理意义进行说明, 需要注意的是, 增量式声源位置定位及跟踪的精度与接收传感器噪声量紧密相关, 定位精度、容错性等还需研究。此外, 如何解决基于无线

传感器在定位问题的应用, 如能量消耗, 三维空间定位及跟踪, 安全私密性等还有待进一步完善<sup>[16]</sup>, 这也是今后研究的重点。

## 参考文献:

- [1] 匡兴红, 邵惠鹤. 基于传感器网络的气体源定位方法研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1464-1467.
- [2] 任丰原, 黄海宁, 林 闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [3] 张苍松. 基于 RSSI 的室内定位算法优化技术[D]. 西安: 西北大学, 2014.
- [4] 崔 莉, 鞠海玲, 苗 勇, 等. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174.
- [5] 于 浩, 陈 雄, 范晶晶. 高斯-牛顿法在基于能量的目标定位中的运用[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(27): 124-126.
- [6] 陈积明, 张艳平, 曹向辉, 等. 基于声强的无线传感器网络目标跟踪方法研究[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(11): 2791-2794.
- [7] 崔晓宗, 全 杰, 刘 弢, 等. 一种用于无线传感器网络的非线性最小二乘声源定位算法[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(S2): 65-70.
- [8] Yan Liu, Ren X M, Rad A B, et al. An entropy optimization strategy for simultaneous localization and mapping[J]. Journal of Intelligent Robotic Systems, 2010, 60(3-4): 435-455.
- [9] 姚丹霜, 端木庆敏. 无线传感器网络节点定位算法研究[J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(3): 82-85.
- [10] 冯 立, 姚远程, 胡荣春. 基于分层定位的无线传感器网络定位研究[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2008, 20(4): 427-430.
- [11] 戎 舟, 刘瑞兰. 无线传感器网络非线性方程声音目标定位算法[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(11): 65-68.
- [12] 戎 舟. WSN 基于声音能量量化数据的目标定位研究[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(11): 4312-4314.
- [13] 贾子熙, 吴成东, 张云洲, 等. 无线传感器网络中一种分布式声源定位方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(20): 6552-6555.
- [14] Sheng Xiaohong, Hu Yuhon. Energy based acoustic source localization[J]. IPSN, 2003, 2634: 285-300.
- [15] 张 鹏, 周建国, 冯 欣, 等. RSSI 测距法无线室内定位解算方法研究[J/OL]. 2013-07-22. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4415.P.20130722.1348.002.html>.
- [16] Wang Jing, Ghosh R K, Das S K. A survey on sensor localization[J]. Journal of Control Theory and Application, 2010, 8(1): 2-11.

# 基于能量衰减的增量式声源跟踪算法研究

作者：[杨洋](#)，[王秀芹](#)，[YANG Yang](#)，[WANG Xiu-qin](#)  
作者单位：[杨洋, YANG Yang \(渤海大学 工学院, 辽宁 锦州, 121013\)](#)，[王秀芹, WANG Xiu-qin \(渤海大学 信息科学与技术学院, 辽宁 锦州, 121013\)](#)  
刊名：[计算机技术与发展](#)   
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)  
年，卷(期)：2014(12)

引用本文格式：[杨洋](#). [王秀芹](#). [YANG Yang](#). [WANG Xiu-qin](#) [基于能量衰减的增量式声源跟踪算法研究](#) [期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2014(12)