

有限信标下目标辅助的声阵列网络自定位机制*

薛海亮^{1,2}, 邵华杰¹, 王智¹⁺, 李元实¹, 骆吉安¹, 鲍明², 冯大航²

¹(浙江大学 控制科学与工程学系, 浙江 杭州 310027)

²(中国科学院 声学研究所, 北京 100190)

Self-Localization Mechanism for Acoustic Array Network Based on Target Assistance under the Limited Beacons

XUE Hai-Liang^{1,2}, SHAO Hua-Jie¹, WANG Zhi¹⁺, LI Yuan-Shi¹, LUO Ji-An¹, BAO Ming², FENG Da-Hang²

¹(Department of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

²(Institute of Acoustic, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

+ Corresponding author: E-mail: wangzhizju@gmail.com

Xue HL, Shao HJ, Wang Z, Li YS, Luo JA, Bao M, Feng DH. Self-Localization mechanism for acoustic array network based on target assistance under the limited beacons. *Journal of Software*, 2011, 22(Suppl. (1)): 40-50.
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/11005.htm>

Abstract: A mechanism based on target assistance is proposed in this paper. This mechanism is mainly divided into two forms: static target assistance based self-localization mechanism and mobile target assistance based self-localization mechanism. The former, according to the measured DOA by nodes, first beacons through the pseudo-linear least square method to locate the static targets. Next, the unknown nodes are located by previously located static targets through BML. For the latter, BML, PCML and RML three algorithms are adopted in the self-localization and have been compared among themselves. From the MATLAB simulation results, the increasing the number of static targets contributes to an improvement of accuracy. PCML and RML can compensate the delay of sound propagation and increase the accuracy of localization when the target with a high speed. Finally, the feasibility of this mechanism is validated by experimental datas.

Key words: WSN; acoustic array; self-localization; DOA; Maximum Likelihood

摘要: 提出了一种基于目标辅助的声阵列网络自定位机制.该自定位机制主要有两种形式:基于静态目标辅助的自定位和移动目标辅助的自定位.对于静态目标辅助的自定位,节点根据所测得 DOA,通过伪线性最小二乘法首先由信标节点来定位静态目标,然后再用 BML 算法由静态目标来定位未知节点;对于移动目标辅助定位,采用 BML,PCML 和 RML 这 3 种算法实现自定位并作对比分析.通过 MATLAB 仿真可知,静态目标数目的增加有利于定位精度的提高.在信标快速移动情况下,PCML 和 RML 对声音传播延时进行了补偿,有利于提高定位精度.最后再采用实验数据论证了该机制的可行性.

关键词: 无线传感器网络;声阵列;自定位;波达方向;最大似然估计

* 基金项目: 国家自然科学基金(60873223, 90818010, 11174316); 浙江省科技厅国际合作项目(2009C34002); 浙江省文物局文物保护科技项目(2070204); 中国科学院无线传感网与通信重点实验室开放课题(2011001)

收稿时间: 2011-05-02; 定稿时间: 2011-07-29

无线传感器网络将会给人类生产生活的各个领域带来深远的影响^[1].无线传感器网络可采集多种类型的信号,以对周围环境实施有效监测.声信号是人类了解客观世界的一种重要信号形式.其频谱、能量等特征可反映声源的物理属性和运动状态等信息.声阵列技术是指由若干传声器按照一定几何关系排列组成的阵列,利用信号的空域特性以增强信号或有效提取其空域信息的信号处理技术^[2,3].声阵列网络就是由声阵列技术与无线网络技术相融合而出现高性能的声学网络化处理模式.声阵列网络采用基于 DOA(direction of arrival)的纯方位定位技术^[4,5]来获得目标的位置或轨迹.

本文考虑的是声阵列网络的自定位问题.在声阵列网络中,节点本身的位置和朝向信息对整个网络至关重要,是进行数据融合和网络管理的基础.系统的性能不仅和目标检测识别或定位追踪算法的性能紧密相关,更取决于能否精确获得节点本身的位置和朝向信息.系统必须首先获取节点的位置和朝向信息,才能够采取进一步的措施进行数据融合.此外,为实现对整个网络有效管理,需要获取每个节点的位置信息,以设计高效的有针对性的协议和组织结构(如 MAC 协议,路由协议,休眠调度,节点选择等)^[6-9].目前声阵列网络系统主要采用无人值守的方式,应用于敌对或人类不适合进入的区域.人工标定其位置和朝向信息会耗费大量的人力物力,而且极易破坏整个系统的隐蔽性.装备昂贵的定位设备会大幅增加成本,不适于大规模网络.随机部署的节点无法事先知道自身的位置,因此必须能够在部署后实现自定位.因此,如何实现快速准确的自定位对声阵列网络的应用具有重要意义.

同传统的 WSN 自定位问题相比,声阵列网络自定位除了确定节点的位置外,还要知道其朝向角.朝向是指声阵列估计声源方向时的参考方向.朝向是声阵列网络应用中必不可少的参数.声阵列根据自身的朝向所估计的声源方位是相对值,实际应用中一般需要将其转化为绝对坐标系下的方位值^[10].因此,需要针对声阵列网络的特点设计适合其应用的自定位机制.文献[11]考虑了测量过程中的噪声,分析了 DOA 的误差,并提出了采用多跳后的信标信息进行自定位的算法.文献[12,13]提出了一种基于 DOA 和 TOA(time of arrival)的解决方案,并给出了 CRB(cramer rao bound).文献[14]介绍了一种声阵列网络平台并提出了基于一致性检验(consistency check)的自定位机制.文献[15]通过实验数据,分析了声信号中心频率,带宽,信号周期和噪声等因素对自定位的影响.文献[16,17]介绍了采用移动信标来实现声阵列网络节点自定位的机制.文献[18]研究了如何通过 EKF 追踪来实现对声阵列的位置信息进行校正.

现有机制均只在网络初始化时实行自定位,实际应用中难免出现以下问题.首先,由于信标节点数目有限,移动信标移动覆盖机制的缺陷以及实际部署过程中的不均匀等因素,部分节点特别是处于网络边缘的节点无法实现有效自定位.其次,在网络的工作过程中,由于物理接触等因素,一些节点的位置和朝向等信息发生了变化,如果这些节点不进行再次自定位,整个网络的工作性能会受到一定的影响.如果重新布放信标进行自定位的方式会大幅度增加系统成本;而且某些场合(如敌对场合)亦不允许重新布放信标.因此,在研究声阵列网络工作特点的基础上,基于以上两种问题,本文提出了基于目标辅助的自定位机制,以在网络工作过程中实现节点自定位.

1 基于目标辅助的自定位机制

节点自定位问题是指建立节点之间的空间关系,本文考虑的是在二维平面下的声阵列网络自定位问题.在定位时为了节约成本,信标节点的数量往往是有限的,但是随着信标节点数量的减少,信标和未知节点之间的稀疏性增大,这会导致定位精度的下降.因此,为了解决这个问题,本文提出了基于目标辅助的自定位机制.基本思路如下:当有目标出现在监测区域时,信标节点和未知节点同时检测该目标的信息;信标节点利用所检测的信息发送给未知节点;未知节点利用信标节点所发送的目标信息,结合自身所检测的信息进行数据关联,实现自定位.该机制的流程如图 1 所示.

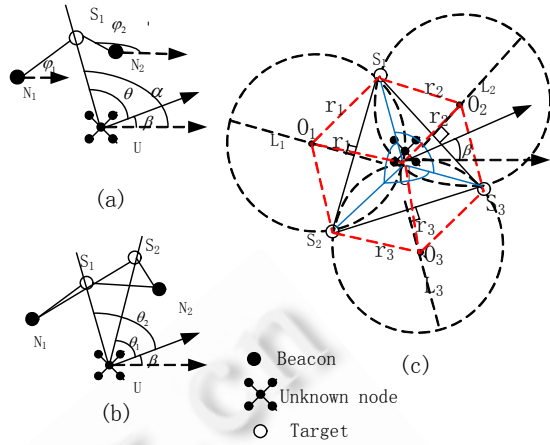
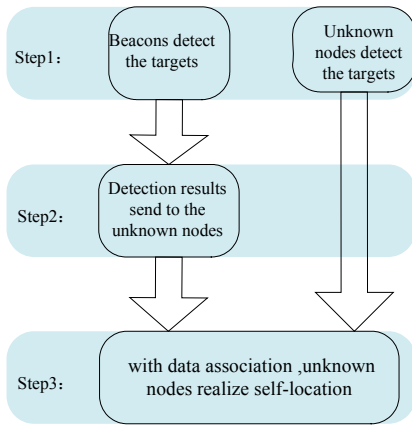


图 1 基于目标辅助的声阵列网络自定位机制流程

图 2 基于目标的自定位

1.1 基于目标的自定位基本条件

根据未知节点的情况,目标辅助的节点自定位机制所面临的工作场景可能为如下 3 种:

1) 未知节点的位置已知,朝向未知; 2) 未知节点的位置未知,朝向已知; 3) 未知节点的位置和朝向信息均未知.

上述场景如图 2(a)~图 2(c)所示,其中 $N_i(a_i, b_i)$ 表示信标节点, $U(x, y)$ 表示未知节点, $S_i(v_i, w_i)$ 表示目标.下面进一步给出详细的分析.

- 未知节点的位置已知,朝向未知

假如两个信标节点的位置已知,根据信标节点与目标之间测得的 DOA 值 φ_1, φ_2 , 由公式(1) 的方程组即可求出目标节点的位置 $S_1(v_1, w_1)$.

$$\begin{cases} \tan \varphi_1 = \frac{w_1 - b_1}{v_1 - a_1} \\ \tan \varphi_2 = \frac{w_1 - b_2}{v_1 - a_2} \end{cases} \quad (1)$$

由此可知,在信标节点和目标不在同一条直线上时以及没有考虑测量误差情况下,只要两个信标就可以求出目标的位置.又在已知未知节点和目标两者位置的条件下,根据二者的位置关系可求得在绝对坐标系下的

DOA 值 $\alpha = \arctan\left(\frac{w_1 - y}{v_1 - x}\right)$; 同时未知节点可根据声信号测得实际 DOA 值 θ . 则节点的朝向角 $\beta = \alpha - \theta$.

- 未知节点的朝向已知,位置未知的情况

在图 2(b)中,未知节点通过 S_1, S_2 发射过来的信号测得 DOA 角度 θ_1, θ_2 . 假定未知节点的朝向是 β , 则 S_1 和 S_2 在绝对坐标系下的角度为 $\beta + \theta_i$ (以 2π 求模), 其中 $i = \{1, 2\}$. 每个绝对坐标系下的角度值都对应着一个以目标为端点的一条射线. 未知节点 U 的位置就是两个不在同一条直线上的射线的交点. 用数学公式表示为

$$\begin{cases} \tan(\beta + \theta_2) = \frac{w_1 - y}{v_1 - x} \\ \tan(\beta + \theta_1) = \frac{w_2 - y}{v_2 - x} \end{cases} \quad (2)$$

根据方程组(2)可求出未知节点 $U(x, y)$ 的位置.

- 未知节点的位置和朝向均未知时

该情景下可使用 DOA 的差值来定位. 在图 2(c)中,可以使用所测 DOA 值来计算 $\angle S_1US_2, \angle S_1US_3, \angle S_2US_3$.

又因为目标 S_1, S_2, S_3 这 3 点的位置坐标已由信标节点求出,故根据三角测量法可以求出未知节点的位置与朝向角. 通过计算发现,在理想情况下只需要不共线的 3 点就可以求出未知节点的位置信息.

由于目标的位置和轨迹最初是未知的,需要信标节点采用纯方位定位技术确定其位置或轨迹.在不考虑测量误差的情况下,由纯方位定位技术可知,至少需要两个节点(即两条方位线)才能确定目标的位置,而且这两个节点和目标不能在同一条直线上.设信标节点,未知节点和目标的数目分别为 N, M 和 T 个,通过以上分析,不难得出该自定位机制的基本条件,见表 1.

Table 1 Basic conditions of self-localization based on target and DOA

表 1 基于目标辅助和 DOA 的自定位基本条件

Unknown Node		The number of unknown parameters	Minimum number of beacons and targets	Remarks
Position	Orientation			
Known	Unknown	1	$N=2, T=1$	Beacons and targets are not in the same line
Unknown	Known	2	$N=2, T=2$	Beacons and targets are not in the same line unknown nodes and targets are not in the same line
Unknown	Unknown	3	$N=2, T=3$	Beacons and targets are not in the same line unknown nodes and targets are not in the same line

表 1 所给出的仅仅是基于目标辅助的节点自定位的基本条件,当存在更多信标节点或目标数目时,可采用数据融合方法进一步提高精度.

1.2 基于静态目标的自定位分析

1.2.1 静态目标位置估计

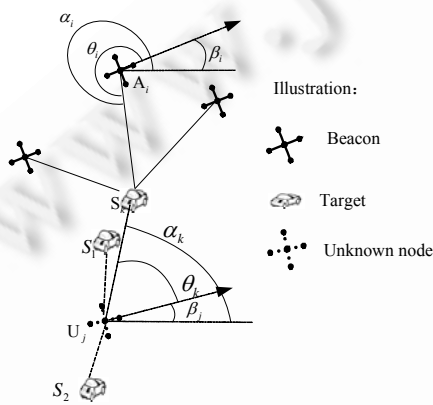


图 3 基于静态目标的自定位

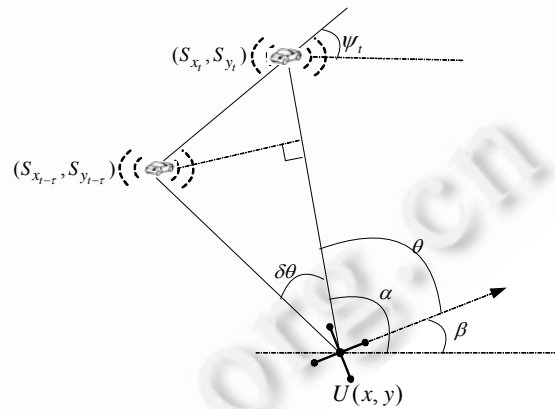


图 4 声信号传播延时分析

如图 3 所示,在区域 R 有若干声阵列节点,其中信标节点为 N 个,未知节点为 T 个,目标为 M 个; A_i 为信标节点,其基本信息 $\vec{a}_i = [x_i, y_i, \beta_i]^T$ 已知, $i=1, 2, \dots, N$; U_j 为未知节点,其基本信息 $\vec{u}_j = [x_j, y_j, \beta_j]$ 待估计, $j=1, 2, \dots, T$; 目标 S_k 的信息 (S_{x_k}, S_{y_k}) 未知, $k=1, 2, \dots, M$. 在没有误差的情况下,设信标节点 A_i 的观测值为 θ_i , 声阵列 A_i 的朝向角 β_i , 则 $\alpha_i = \theta_i + \beta_i$. 但是在实际场景中,由于 DOA 存在噪声,假设其噪声满足高斯白噪声^[19],即实际的观测值为 $\tilde{\theta}_i = \theta_i + \eta_i$, $\eta_i \sim (0, \sigma_i^2)$, 则 $\alpha_i = \tilde{\theta}_i + \beta_i$.

在绝对坐标系下,目标 S_k 与信标节点 A_i 之间的斜率方程为

$$\tan \alpha_i = (S_{y_k} - y_i) / (S_{x_k} - x_i) \quad (3)$$

两边同时乘以 $(S_{x_k} - x_i) \cos \alpha_i$ 后化简可得:

$$-S_{x_k} \sin \alpha_i + S_{y_k} \cos \alpha_i = y_i \cos \alpha_i - x_i \sin \alpha_i \quad (4)$$

在实际定位时可能会有多个信标参与定位.因此我们可以根据伪线性最小二乘估计可以求出目标位置:

$$\begin{bmatrix} S_{x_k} \\ S_{y_k} \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (5)$$

$$\text{其中, } A = \begin{bmatrix} \tan \alpha_1 & -1 \\ \vdots & \vdots \\ \tan \alpha_N & -1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} y_1 \cos \alpha_1 - x_1 \sin \alpha_1 \\ \vdots \\ y_N \cos \alpha_N - x_N \sin \alpha_N \end{bmatrix}.$$

但是需要注意的是,在仿真过程中发现,如果多个信标在同一条直线或者在同一直线 $\pm 18^\circ$ 区间里(如图3中 S_k, S_1, S_2 所示),定位误差较大,这种情况的定位是无效的,应舍去.

1.2.2 基于静态目标的自定位算法

设在绝对坐标系下,目标 S_k 相对未知节点 U_j 的测量角度应为 α_k ,朝向角 β_i . U_j 的观测值为 θ_k , $\theta_k = \alpha_k - \beta_j$.考虑到观测误差则 $\tilde{\theta}_k = \theta_k + \eta_k$, $\eta_k \sim (0, \sigma_k^2)$.由此可采用基本最大似然估计^[17](BML)来求解未知节点 U_j ,其代价函数为

$$C = \sum_{k=1}^T \frac{1}{\sigma_k^2} \left(\tilde{\theta}_k - \arctan \frac{S_{y_k} - y_j}{S_{x_k} - x_j} + \beta_j \right)^2 \quad (6)$$

其中, (S_{x_k}, S_{y_k}) 已经由式(5)求出,将其代入式(6)即可求得 U_j 的信息 $\vec{\gamma}_j = [x_j, y_j, \beta_j]^T$.

1.3 基于移动目标的自定位分析

一般移动目标的速度在每秒几米到几十米不等.声信号的传播速度仅比信标移动速度高出一到两个量级,若采用静态目标的观测角度将不可避免的带来误差^[20-22].设一小段时间内目标为匀速直线运动.如图4所示,在 t 时刻假设节点的位置为 $U(x, y)$,目标的状态为 $\vec{S}_t = (S_{x_t}, S_{y_t})$, $\vec{V}_t = (V_{x_t}, V_{y_t})$;此时节点接收到的声音信息是目标在 $\vec{S}_{t-\tau} = (S_{x_{t-\tau}}, S_{y_{t-\tau}})$ 发出的,与 t 时刻目标真实位置相匹配的 DOA 为:

$$\theta^{mov} = \alpha + \arcsin \left(\frac{v}{c} \sin(\alpha - \psi_t) \right) - \beta \quad (7)$$

其中, $\psi_t = \arctan(V_{y_t} / V_{x_t})$, $v = \|\vec{V}_t\|$, $c=340\text{m/s}$.因此需要修正式(6),以减少误差.

1.3.1 移动目标追踪

目标定位与追踪是声阵列网络系统的基本功能之一,目前已有不少成熟的算法可供选用.卡尔曼滤波广泛应用于目标追踪领域.由于待估计参数与观测值之间并非严格满足线性关系,本文采用扩展卡尔曼滤波算法完成对目标的跟踪.

本文采用动态系统模型来描述目标运动状态,包括目标状态方程和测量方程:

$$\begin{cases} x(k+1) = Fx(k) + Aw(k+1) \\ z(k) = H(x(k)) + v(k) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $x(k) = [P_x \ P_y \ V_x \ V_y]$.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0.5T^2 & 0 \\ 0 & 0.5T^2 \\ T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix}, z(k) = [\hat{\theta}_1(k) \ \hat{\theta}_2(k) \ \dots \ \hat{\theta}_N(k)], H(x(k)) = [\theta_1^{mov} \ \theta_2^{mov} \ \dots \ \theta_N^{mov}].$$

其中, $x(k)$ 为目标状态向量,本文取目标的平面坐标位置以及平面坐标位置的一阶导数(即平面速度)作为目标状态, $w(k)$ 和 $v(k)$ 分别是目标运动噪声和测量噪声信号.本文假设 $w(k)$ 和 $v(k)$ 都是独立的高斯白噪声信号,协方差矩阵分别为 Q 和 R .其中 F 为目标运动状态转移矩阵,可以设置多个不同的状态转移矩阵并通过一定的算法决定不同状态转移矩阵的使用,实现多模型的目标跟踪,本文中采用了匀速直线模型的状态转移矩阵.为了提高定位追踪效果,本文采用式(6)所述的模型,对声信号传播延时进行了补偿,其中 H 为测量矩阵,对应于选取的

状态变量.

1.3.2 基于移动目标的自定位算法

在追踪移动目标的过程中,信标节点检测数据发送至未知节点.未知节点利用这些数据,结合自身所检测的 DOA 实现自定位,结合式(6)(7)可采用具有延时补偿功能的最大似然估计^[17](PCML)求解未知节点 U ,其代价函数为

$$C = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \left(\tilde{\theta}_i - \arctan \frac{S_{y_i} - y}{S_{x_i} - x} - \arcsin \left(\frac{v}{c} \sin \left(\arctan \frac{S_{y_i} - y}{S_{x_i} - x} - \psi_i \right) \right) + \beta \right)^2 \quad (9)$$

其中,目标位置 (S_{x_i}, S_{y_i}) 可以根据式(5)求出,将其代入式(9)即可求得未知节点 U_j 的信息 $\tilde{\gamma} = [x, y, \beta]$.

该模型考虑了声源位置和移动速度,声源和阵列之间的距离等对 DOA 的影响.此外,还有一种具有较低复杂度的经验算法^[17](RML).具体步骤为:未知节点首先采用 BML 粗略的估计自身的位置,由此计算到目标的距离,估计延时大小,然后修正目标的位置信息,再次采用 BML 进行自定位.

2 仿真分析

2.1 基于静态目标辅助的仿真分析

由于目标是未知宽带声源,加之噪声环境的因素,DOA 误差是难以避免的.DOA 误差对自定位效果的影响主要表现在两方面.首先,该自定位机制中,未知节点利用目标的位置进行自定位,目标位置的精确性会直接影响自定位效果.DOA 误差大小会直接影响信标节点对目标的定位.其次,未知节点对目标的 DOA 估计性能也会影响其自定位性能.

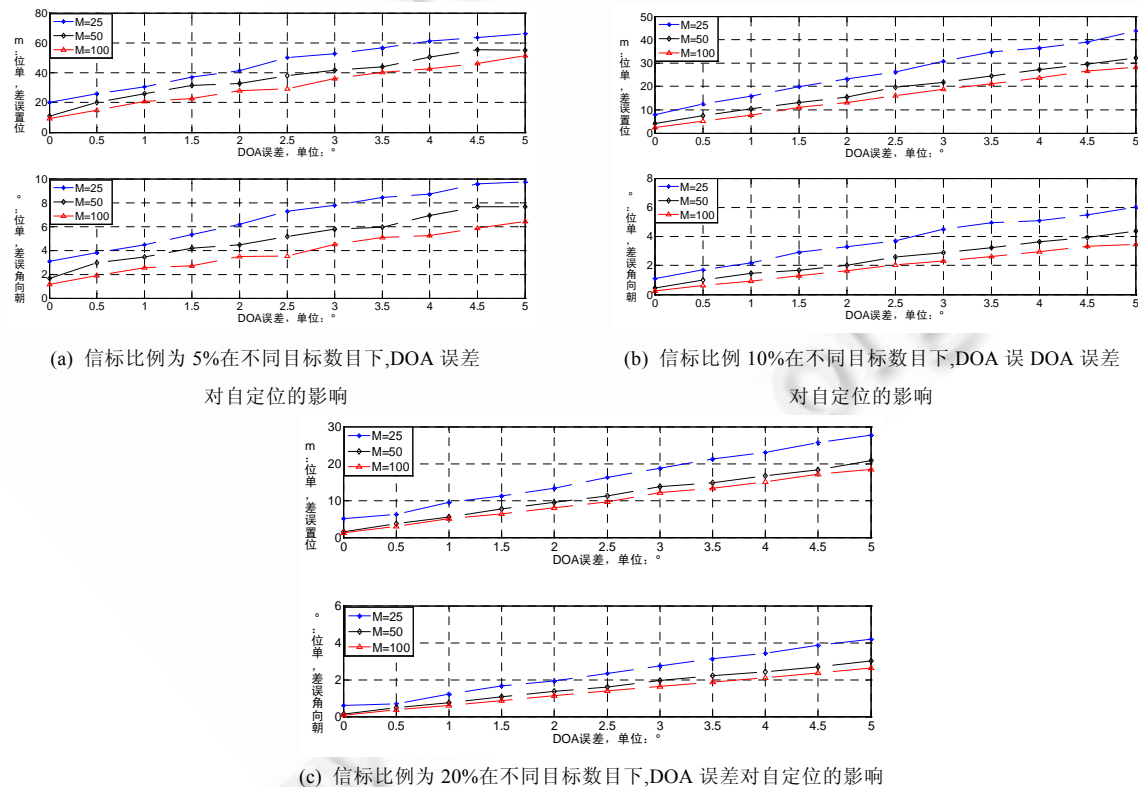


图 5

现以目标为静止状态为例,其仿真场景为:在 $[-500,500]m \times [-500,500]m$ 的 $1km^2$ 区域内,随机部署了100个阵列节点,其中信标节点的比例为 p ,未知节点的比例为 $1-p$,再向该区域抛撒了一些目标声源,假设节点的感知半径为400m.如图5所示,分别是信标节点比例为5%,10%,20%的情况下,以DOA误差为变量,在不同的目标数目辅助下的自定位仿真结果图.从图5(a)中可以看出,当信标节点的比例 $p=5%$,DOA误差为 5° ,目标数目 $M=20$ 时,位置误差大约为66m,朝向角误差为 9.7° ,当目标数目 $M=50$ 时,位置误差减少为55m,朝向角误差减少为 7.6° ;随着目标数目增加到 $M=100$ 时,位置误差减少为51.5m,朝向角误差减少为 6.4° .故可以得出结论:静态目标的目标数目增加有利于减少位置误差和朝向角误差.这主要是由于未知节点在半径 $r=400m$ 的范围内可以测得DOA的目标数目增加,未知节点可利用的数据量相应增加,对其位置定位的约束条件越多,最大似然估计的精度对应提高.因此,目标辅助数目增加有利于定位精度的提高.图5(b),图5(c)也可以得出相同的结论.

2.2 基于移动目标的仿真分析

以上本文已经详细分析了DOA误差,信标节点的比例和目标数目等因素对自定位效果的影响.当目标处于移动状态时,以上因素对自定位效果的影响与静止目标的场景类似,在此不再赘述.本文接下来重点分析目标移动速度对自定位效果的影响.

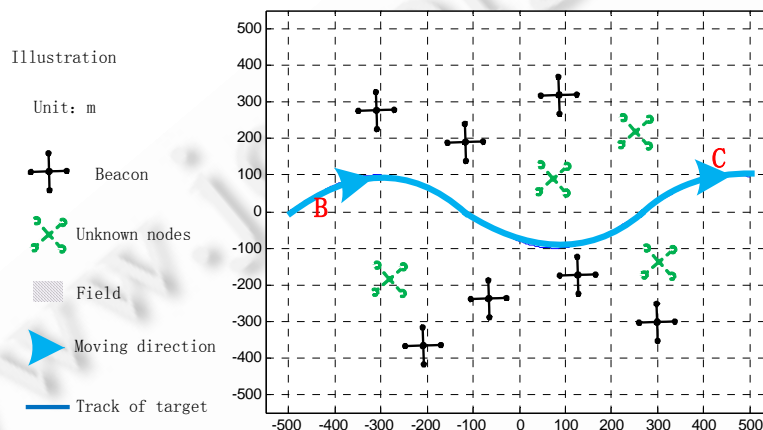


图6 基于移动目标的自定位仿真示意图

仿真场景如图6所示.在 $[-500,500]m \times [-500,500]m$ 的 $1km^2$ 区域内,随机布置了100个节点,其中信标节点的比例 $p=0.3$.目标沿着如图6所示的轨迹以一定速度由B点移动到C点.设定目标区域内存在10处目标,假设DOA误差为 $\sigma=2^\circ$.信标节点检测目标的声信号,并利用扩展卡尔曼滤波追踪目标,确定其轨迹,并将所得信息广播,信息包括当前时间,目标的位置和速度等.监测区域内的未知节点收到信标数据之后,分别采用BML,PCML和RML估计自己的位置和朝向.仿真结果见表2.

Table 2 Effectiveness analysis of node self-localization under the state of target mobile

表2 在目标移动状态下,节点自定位效果分析

Error	Position error (m)				Orientation error (m)			
	Simulation data			Experimental data	Simulation data			Experimental data
	$\sigma=1^\circ$	$\sigma=3^\circ$	$\sigma=5^\circ$		$\sigma=1^\circ$	$\sigma=3^\circ$	$\sigma=5^\circ$	
Algorithm								
BML	5.003	6.176	7.942	9.497	1.426	1.695	2.014	2.301
PCML	4.680	6.111	7.944	9.057	1.335	1.630	1.941	2.219
RML	4.668	6.093	7.914	9.048	1.334	1.629	1.937	2.217

目标的移动速度对自定位效果的影响主要表现在两方面:其一,移动状态下的目标增加了对其进行定位追

踪的难度,使所得到的轨迹估计值存在较大的误差;其二,目标的移动速度会影响自定位效果,移动目标对自定位算法提出了更高的要求.当目标以较快速度移动时,这种现象更为明显.如图 7 所示,随着目标移动速度的增大,自定位效果变差.

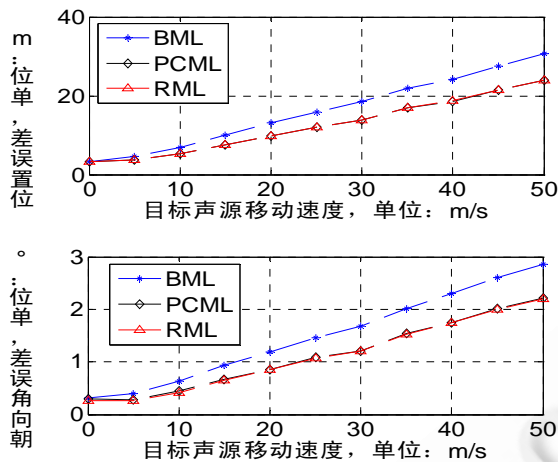


图 7 目标移动速度对自定位效果的影响

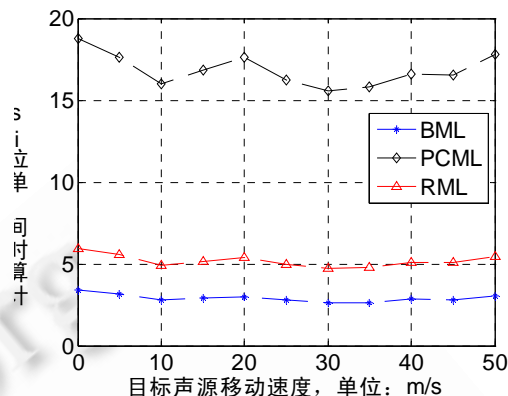


图 8 不同目标移动速度下的计算量分析

观察图 7 可以发现,所提出的 3 种方法可以实现不同的自定位精度.本文已经在第 2 节分析了所述 3 种算法的计算复杂度.其中 PCML 在理论上补偿了声信号传播延时的影响;RML 是一种轻量级的经验算法,其计算量少于 PCML;同 BML 相比,PCML 和 RML 提高了自定位的精度,但是具有较高的计算复杂度.本文分析了在目标移动速度下,3 种方法分别运行 50 次所需的时间(本文以计算时间近似代表计算量和复杂度).3 种方法均采用 MATLAB 自带的 `fminunc` 函数求解代价函数的极值.以 $\sigma=2^\circ$, $v=10\text{m/s}$ 的情况为例,如图 8 所示.3 种方法中, BML 的计算时间最少, RML 的计算时间约为 BML 的两倍, PCML 的计算时间最长.

3 种方法具有不同的自定位精度和计算量,在实际应用中,可根据场景的具体需求选用相应的方法.

自定位过程中,未知节点可根据目标的运动状态和应用场景对自定位精度的要求等,选用 BML、PCML 或 RML 实现自定位.

3 实验数据分析

为进一步验证算法的可行性,本文利用实际声阵列网络系统^[23]采集的实验数据,进行了自定位效果分析.

Table 3 Position information of node

表 3 节点自身的位置信息

Node	Abscissa	Ordinate	Orientation ($^\circ$)
N_1	0	0	88.041 1
N_2	6.912 335	105.129 239	89.926 9
N_3	98.036 286	-18.387 465	88.044 6
N_4	-115.050 13	11.429 378	81.762 6
N_5	-39.257 398	-107.496 877	83.108 8

在本实验中,节点自身的信息见表 3.我们安排了两个场景,分别是静止目标和移动目标.在第 1 种情况下,声阵列网络可以用最小二乘估计或者最大似然估计等方法,确定目标的位置,然后根据已定位的目标和未知节点所测 DOA 来估计未知节点的位置信息.在第 2 种情况下,声阵列网络可以采用扩展卡尔曼滤波等算法实现对目标的追踪.获取目标的位置或轨迹后,信标节点把检测结果发送至未知节点.未知节点采用自身所检测的 DOA 数据和所接收到的目标位置或轨迹信息,进行自定位.本文接下来分别对这两种场景进行了验证.

第 1 种:在本实验中,如图 9 所示,将 5 个节点布置在 $[-150,150]\text{m}\times[-150,150]\text{m}$ 区域内,其位置和朝向信息见表 3.本文的思路是由其中 4 个节点估计目标的位置,再根据目标的位置和声阵列所得的 DOA 估计第 5 个节点的位置和朝向,分别进行 5 次估计后求平均值.自定位结果如图 9 所示,其中位置和朝向角的误差分别为 1.3874m,0.4084°(注意:由于实验是静态定点测量 DOA,误差较小,所以定位精度较高),这满足了定位精度要求.

在第 2 种状态下,可选用最小二乘估计等方法对移动目标进行连续定位,或采用扩展卡尔曼滤波等目标追踪算法确定目标的移动轨迹.如图 10 所示,目标从 A 点移动到 B 点.在本节中,我们首先假设一部分节点为信标节点,其位置和朝向是已知的;移动目标在监测区域内移动;各个信标节点检测目标的 DOA,系统根据这些 DOA 数据,采用扩展卡尔曼滤波确定目标的轨迹.然后,以所估计的目标轨迹为信标的轨迹,根据相应的时间序列,将未知节点所检测的 DOA 和目标的轨迹相关联,求得未知节点的位置和朝向信息.本文的思路是由其中 4 个节点估计目标的位置,再以目标的位置和第 5 个节点所得的 DOA,估计第 5 个节点的位置和朝向角进行 5 次求平均值.所得的结果见表 2.从实验结果可知,PCML 和 RML 对声音传播延时进行了补偿,提高了定位精度.

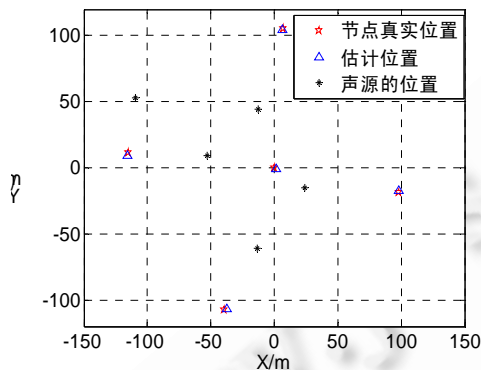


图 9 基于静止目标的自定位示意图

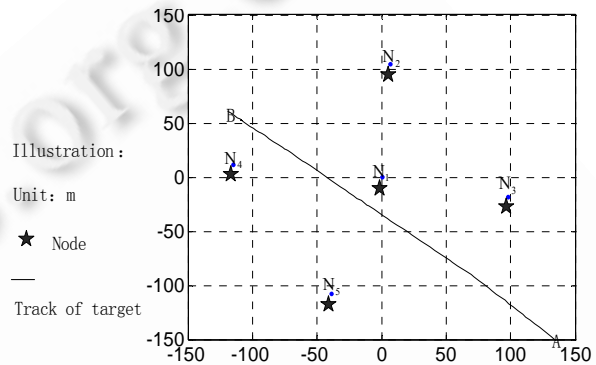


图 10 移动目标的自定位场景示意图

4 总结与展望

本文首先描述了所要解决的问题,然后提出了基于目标辅助的自定位机制,分析了解决该问题的基本条件,以及影响自定位效果的关键因素,最后采用实验数据对该机制进行了验证.结果表明该机制可以有效实现未知节点的自定位.自定位效果受到 DOA 误差的影响,当目标处于运动状态时,声阵列节点实际上通过检测目标在一段轨迹上所发声音以实现 DOA 估计,由此带来了 DOA 估计误差.如果能对该现象进行补偿,可以提高自定位精度.在未来的工作中还可以进一步分析静态声源的最佳数目以及构建定位成本低且定位精度高的优化模型.

References:

- [1] Weiser M. Some computer science issues in ubiquitous computing. *Communications of the ACM*, 1993,36 (7):75-84.
- [2] Chen J, Yao K, Hudson R. Source localization and beam forming. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002,19(2):30-39.
- [3] Krim J, Viberg M. Two decades of array signal processing research: The parametric approach. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996,13(2):67-94.
- [4] Taek S, Speyer J. A stochastic analysis of a modified gain extended kalman filter with applications to estimation with bearings only measurements. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1985,30(10):940-949.
- [5] Nardone SC, Aidala VJ. Observability criteria for bearings-only target motion analysis. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, 1982,18(2):162-166.
- [6] Li YJ, Wang Z, Sun YX. Two-Hop neighborhood information-based real-time routing design for sensor networks. *Journal of Software*, 2009,20(7):1931-1942 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3329.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03329]

- [7] Mauve M, Widmer J, Hartenstein H. A Survey on Position-Based Routing in Mobile Ad-Hoc Networks. 2001.
- [8] Wang ZB, Lou W, Wang Z, Ma J, Chen H. A novel mobility management scheme for target tracking in cluster-based sensor networks. In: Proc. of the 6th IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS 2010). Santa Barbara, 2010. 172–186.
- [9] Oshman Y, Davidson P. Optimization of observer trajectories for bearings-only target localization. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1999,35(3):892–902.
- [10] Niculescu D, Badri N. Ad hoc positioning system (APS) using AOA. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2003. 2003. 1734–1743.
- [11] Peng R, Sichitiu ML. Angle of arrival localization for wireless sensor networks. In: Proc. of the Conf. on Sensor and Ad-Hoc Comm. and Networks. 2006. 374–382.
- [12] Moses RL, Krishnamurthy D, Patterson R. A self-localization method for wireless sensor networks. Eurasip Journal on Applied Signal Processing, Special Issue on Sensor networks, 2003, 348–358.
- [13] Moses R, Patterson R. Self-Calibration of sensor networks. In: Proc. of the SPIE, Vol. 4743, Unattended Ground Sensor Technologies and Applications IV. 2002. 108–119.
- [14] Girod L, Lukac M, Trifa. V, Estrin D. The design and implementation of a self-calibrating distributed acoustic sensing platform. In ACM SenSys. 2006.
- [15] Ash JN, Moses RL. Acoustic time delay estimation and sensor network self localization: Experimental results. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006,118(2):841–850.
- [16] Cevher V, McClellan JH. Acoustic node calibration using a moving source. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2006,42(2):585–600.
- [17] Xue H, Wang Z, Luo J, Bao M, Wang ZB, Guan LY, Chen ST. Self-Localization mechanisms for acoustic array network based on mobile beacon and DOA. Information and Control, 2010,39(4):1–8 (in Chinese with English abstract).
- [18] Cevher V, McClellan JH. Sensor array calibration via tracking with the extended kalman filter. In: Proc. of the 5th Annual Federated Laboratory Symp. on Advanced Sensors. 2001. 51–56.
- [19] Pedersen KI, Mogensen PE, Fleury BH. A stochastic model of the temporal and azimuthal dispersion seen at the base station in outdoor propagation environments. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2002,49(2):437–447.
- [20] Kaplan LM, Le Q, Molnar P. Maximum likelihood methods for bearings-only target localization. In: Proc. of the ICASSP 2001. Salt Lake City, 2001. 554–557.
- [21] Kaplan LM, Le Q. On exploiting propagation delays for passive target localization using bearings-only measurements. Journal of Franklin Institute, 2005, 193–211.
- [22] Kam W L, Brian G F. Broadband passive acoustic technique for target motion parameter estimation. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2000,36(1):163–175.
- [23] Luo J, Feng D, Chen S, *et al.* Experiments for on-line bearing-only target localization in acoustic array sensor networks. In: Proc. of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). 2010. 1425–1428.

附中文参考文献:

- [6] 李燕君,王智,孙优贤.传感器网络基于两跳邻居信息的实时路由设计.软件学报,2009,20(7):1931–1942. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3329.htm> [doi: 10.3724/SP.J. 1001.2009.03329]
- [17] 薛海亮,王智,骆吉安,鲍明,王志波,管鲁阳,陈善涛.基于移动信标与 DOA 的声阵列网络自定位机制.信息与控制,2010,39(4):1–8.



薛海亮(1985-),男,河北高邑人,硕士,主要研究领域为无线传感器网络.



邵华杰(1987-),男,硕士,主要研究领域为无线传感器网络.



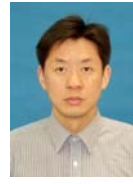
王智(1969-),男,博士,副研究员,主要研究领域为压缩感知与协同信息及信号处理,传感器网络,实时通信与网络技术.



李元实(1987-),男,硕士,主要研究领域为无线传感器网络.



骆吉安(1983-),男,博士,主要研究领域为统计信号处理,在声阵列传感器网络中移动目标定位与追踪的应用.



鲍明(1973-),男,博士,主要研究领域为声信号智能处理,双耳听觉计算模型,模式识别与人工智能.



冯大航(1984-),男,博士,主要研究领域为信号检测,宽带声源测向.

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn