

逆向捕获时间差的 Voronoi 声源定位机制

夏娜¹, 倪成春¹, 徐朝农², 丁胜¹, 郑榕³

(1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国石油大学(北京) 计算机科学与技术系, 北京 102249;
3. 麦克马斯特大学 计算与软件学院, 安大略 汉密尔顿 L8S4K1)

摘要: 提出一种逆向捕获时间差的声源定位协议, 可以使传感器网络在大部分时间里处于射频休眠状态, 因此具有显著的节能效果; 在利用时间差数据求解声源位置时, 引入 Voronoi 图理论对搜索空间进行裁剪, 以提高算法搜索求解的效率和成功率。理论分析和实验结果表明该声源定位机制具有明显的能量有效性、定位解算的精确性、快速收敛性和顽健性, 适用于能量受限无线传感器网络中动态声源的实时精确定位。

关键词: 无线传感器网络; 声源定位; TDOA; 逆向捕获; Voronoi 图

中图分类号: TN98

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2013)11-0140-13

Voronoi acoustic source localization mechanism based on counter captured time difference

XIA Na¹, NI Cheng-chun¹, XU Chao-nong², DING Sheng¹, ZHENG Rong³

(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Department of Computer Science and Technology, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
3. Department of Computing and Software, McMaster University, Hamilton L8S4K1, Canada)

Abstract: An acoustic source localization protocol based on counter captured time difference was presented. It can drive the sensors in network to “sleep” in most of the time, so as to achieve energy saving obviously. In the stage of computing the acoustic source position with the time difference data, Voronoi diagram was introduced to reduce the searching space to improve the success percentage and convergence speed of the algorithm. Both the theoretical analysis and experiment results demonstrate that this acoustic localization mechanism is energy efficient, in real-time and robust in localization computing. So it is suitable for dynamic acoustic source accurate localization in WSNs.

Key words: wireless sensor networks; acoustic source localization; TDOA; counter captured; Voronoi diagram

1 引言

无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)技术的快速发展为分布式、低成本的声源定位提供了一种新型的解决方案。利用无线传感器节点对声源进行定位还具有隐蔽性好、全天候、不受视线和能见度限制等优点, 因此该方案已成为现代军事和民用安防中声源定位的研究热点^[1,2], 其成果可广泛

应用于入侵检测、狙击手定位、车辆定位以及视频会议和多媒体人机交互中的发言者自动跟踪等方面。由于无线传感器网络的能量受限性以及实际应用中待定位声源的动态性和突发性, 因此设计一种能量有效的、快速准确的声源定位协议和算法是关键, 同时也是一个严峻的挑战^[3-5]。

现有的无线传感器网络声源定位可分为近似定位和精确定位。

收稿日期: 2012-11-25; 修回日期: 2013-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61100211, 61003307); 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NCET-13-0768); 中国博士后科学基金资助项目(20110490084, 2012T50569); 安徽高校省级自然科学基金项目(KJ2013A210)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61100211, 61003307); Program for New Century Excellent Talents in University(NCET-13-0768); Postdoctoral Science Foundation of China (20110490084, 2012T50569); The Natural Science Foundation of Anhui Province High School(KJ2013A210)

1) 近似定位方法

它是指用一个近似的位置作为声源的真实位置。2008 年, WANG 等^[4]提出一种 Lightning 声源定位协议。该方法的原理是利用射频信号传播速度远大于声波传播速度的特点, 当某传感器节点感知到声音信号后立即发送射频信号, 以确定其为距离声源最近的节点, 该节点的位置便作为声源的近似位置。该方法在传感器节点分布密度较高时, 能够达到一定的定位精度且易于实现; 2011 年, 本课题组在上述工作的基础上, 进一步研究了多传感器节点协同的近似声源定位协议^[5], 完整考虑了节点处理声音和射频信号的时间, 推导出声源定位边界性条件; 2013 年, 基于刚性理论进行了节点可定位性的研究和实践^[6-8]。

2) 精确定位方法

第一类是基于机器学习的定位方法。2010 年, KIM 等^[9]引入支持向量机(SVM)方法解决无线传感器网络中声源定位问题, 并于 2011 年进一步讨论了一种事件驱动的高斯过程(GP)用于无线传感器网络中的声音目标定位, 实验结果表明这 2 种方法具有较好的估计精度^[10]。由于此类方法需要通过大量实验样本训练分类函数, 进而完成特定环境中声源位置的推理, 因此对于动态环境下声源定位的适应性不够。

第二类是基于 3 种物理测量值的定位方法。利用接收信号强度(RSS)^[11,12]、到达角度(DOA)^[13,14]、到达时间差(TDOA)^[15-17]计算声源精确位置。LIU 和 LU 等^[18,19]提出了一种声音传播的能量衰减模型, 利用极大似然估计方法(MLE)实现声源定位, 并引入 EM (expectation-maximization)算法减小了 MLE 的计算量; ASANO 等^[20]提出了基于麦克风阵列的近场二维 MUSIC 算法, 通过估计声音到达角度及其传播距离, 实现声源定位; ZHANG 和 KNAPP 等人^[21,22]利用广义互相关法估计声音信号到达多个传感器节点的时间差 TDOA, 结合节点的位置信息计算声源位置。文献[23]提出通过获取声音信号到达普通节点和簇头节点的时间差 TDOA, 计算出声源相对簇头节点的方位角和俯仰角, 进而确定声源位置。该方法需要较多节点参与定位过程, 并且要求角度计算结果具有较高的精度, 因此该方法能耗较高, 设备成本昂贵。文献[24]提出一种基于一致性方程的快速自适应定位算法。该方法能够对系统测量误差及合作误差进行补偿, 从而保

证即使当传统的基于一致性方程的算法失败时, 也能获得较高精度的结果。

以上基于 TDOA 的声源定位已经被证明是一种有效的声源定位方法, 但仍不能完全满足实际的需求, 主要存在以下问题。

现有协议在获取时间差数据时在节能方面的考虑不够。协议要求网络中的传感器节点始终开启射频模块以接收同步信号, 从而对声音到达进行计时, 因此网络整体能耗较高。

基于获取的 TDOA 数据解算声源位置, 相应的算法求解的实时性和成功率难以满足动态声源定位的需求。

针对上述问题, 本文提出一种逆向捕获时间差的声源定位协议, 缩减了传感器节点射频模块的开启时间, 且要求参与定位的节点数较少, 因此与传统 TDOA 方法相比, 能耗较低, 通信数据量较小。同时引入 Voronoi 图模式对算法搜索空间进行裁剪, 有效提升了算法求解的效率和成功率。

2 逆向捕获时间差的声源定位协议

2.1 协议描述

核心思想: 当传感器网络监测区域内无声音事件时, 各节点的射频模块处于休眠状态; 声音事件将激活节点的射频模块; 协议以逆向的方式捕获声音到达多个节点的时间差信息, 进而完成定位计算。协议分为 2 个阶段: 1) 时间差捕获; 2) 数据汇聚至基站。基站完成最终的声源定位解算。现假设在无线传感器网络监测区域内存在一个点声源 S 和 3 个以上的传感器节点 S_1 、 S_2 、 S_3 ..., 不妨设节点 S_1 距离声源最近, S_2 次之, S_3 最远, 拓扑结构如图 1 所示。

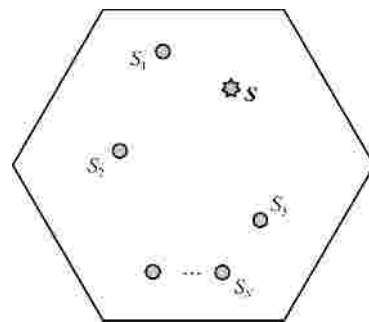


图 1 声源及传感器节点位置

声音到达 S_1 、 S_2 和 S_3 3 个节点的时间差捕获过程如图 2 所示, 过程描述如下。

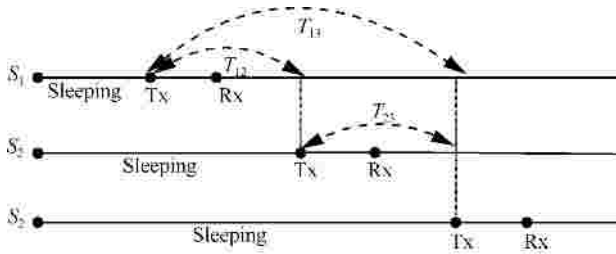


图 2 协议的时间差捕获示意

1) 初始状态：所有节点的射频模块均关闭，即节点处于 Sleeping 状态。

2) 当脉冲音到达 s_1 时， s_1 打开其内部计时器，记为 Timer1，该节点由 Sleeping 状态转为射频发送状态 Tx，发送射频信号持续 T_{burst} 时间之后转为射频接收状态 Rx；此时 s_2 和 s_3 仍处于射频关闭状态，因此对 s_1 发出的射频信号免疫。

3) 当脉冲音到达 s_2 时， s_2 打开计时器 Timer2，节点由 Sleeping 状态转为 Tx 状态，发送射频信号，持续 T_{burst} 时间之后转为 Rx 状态；节点 s_1 收到来自 s_2 的射频信号，读取 Timer1 的计数值，即为声音到达 s_1 和 s_2 的时间差 T_{12} 。

4) 当脉冲音到达 s_3 时， s_3 打开计时器 Timer3，节点由 Sleeping 状态转为 Tx 状态，发送射频信号，持续 T_{burst} 时间之后转为 Rx 状态；节点 s_1 和 s_2 分别收到来自 s_3 的射频信号并分别读取 Timer1 和 Timer2 的计数值，即为声音到达 s_1 和 s_3 的时间差 T_{13} 以及 s_2 和 s_3 的时间差 T_{23} 。在本协议中，声音到达时间差的捕获不同于传统方法，称之为“逆向捕获”，其优点是能量有效性好，因为大部分时间里各节点的射频模块处于 Sleeping 状态，只有收到脉冲音才会被激活。

5) 当某个节点记录的有效时间差的个数 ≥ 2 时，该节点广播“Satisfied”消息，启动数据汇聚过程。各节点按预制的 TDMA 时隙表依次将本地存储的时间差数据发送至基站，由基站完成声源定位解算。

6) 数据汇聚结束后，各节点恢复到 Sleeping 状态，等待处理新一轮声源定位操作。

协议的状态转移图描述如图 3 所示。

2.2 协议可定位性评估

由几何定位原理可知，当获取的时间差数据大于等于 3 组时即可解算出声源位置，但由于传感器节点硬件识别声音信号需要时间，发射射频信号需要准备时间，接收并识别射频信号也需要时间，因此在一些较为特殊的网络拓扑结构下，上述协议可

能难以或无法捕获时间差数据，从而出现定位失效的情况。以下将进行协议可定位性的分析和评估。设节点 s_1 、 s_2 、 s_3 到达点声源 S 的距离分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 ，且 $d_1 < d_2 < d_3$ ；其他通信参数的符号及其描述如表 1 所示。分析过程中忽略射频传播时间。

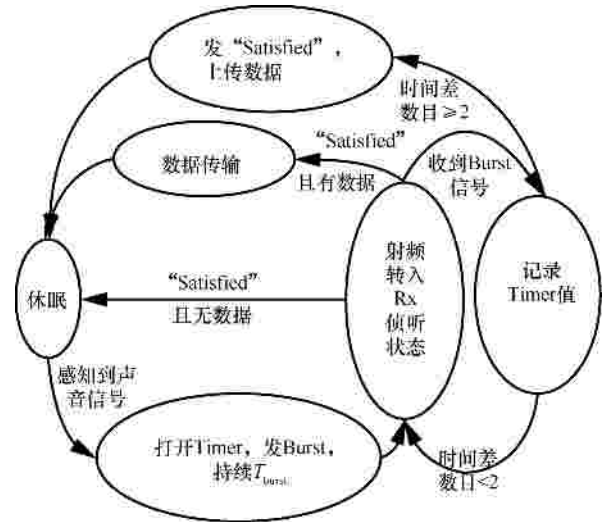


图 3 逆向捕获时间差协议状态转移

表 1 部分参数符号及含义

参数符号	含义
S_i	第 i 个节点 ($i = 1, 2, 3$, 下同)
d_i	声源 S 到节点 i 的距离
v	声音在空气中的传播速度
D_{reg}	节点识别声音信号所需要的时间
T_{rf1}	节点发送射频信号的启动时间
T_{rf2}	节点接收并识别射频信号的时间
T_{burst}	节点发送射频信号持续的时间, $T_{burst} > T_{rf2}$
T_{sat}	广播“Satisfied”信号持续的时间, $T_{sat} > T_{burst}$
R_{tr}	数据发送速率, 单位 bit/s
L_c	节点的通信帧的长度(bit) (包含同步字节 S_y (bit), 帧头 H_e (bit), 数据域 D_a (bit), 校验比特 C_h (bit))

节点 s_1 和 s_2 到达声源 S 的距离分别为 d_1 和 d_2 ($d_1 < d_2$)，进一步地， d_1 和 d_2 的大小关系存在 3 种典型情况，在本文协议下节点捕获声音到达时间差的具体分析如下。

情况 1 如图 4(a)，若 $d_2 / v + D_{reg} + T_{rf1} + T_{burst} < d_1 / v + D_{reg} + T_{rf1} + T_{burst} + T_{rf2}$ ，即 $d_2 < d_1 + T_{rf2}v$ 时，节点 s_1 转到 Rx 状态后，节点 s_2 发射射频的剩余时间 $< T_{rf2}$ ，已经无法让 s_1 识别该射频信号，因此无法获取 Timer1 的计数值，即无法捕获声音到达 s_1 和 s_2 的时间差 T_{12} 。

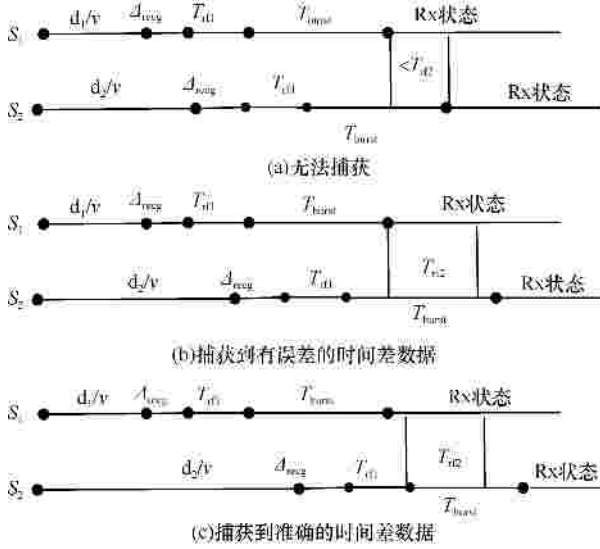


图 4 节点捕获时间差的 3 种情况

情况 2 如图 4(b), 若

$$\begin{cases} d_2/v + D_{recg} + T_{rf1} + T_{burst} < d_1/v + D_{recg} + T_{rf1} + T_{burst} + T_{rf2} \\ d_2/v + D_{recg} + T_{rf1} < d_1/v + D_{recg} + T_{rf1} + T_{burst} \end{cases}$$

即 $d_1 + T_{rf2}v < d_2 < d_1 + T_{burst}v$ 时, 节点 S_1 转到 Rx 状态后, 节点 S_2 虽然已经发射一段时间的射频信号, 但其剩余时间仍然大于 T_{rf2} , 可以使 S_1 识别该射频信号。 S_1 读取 Timer1 计数值, 记录时间差为 T'_{12} , 且满足

$$d_1/v + D_{recg} + T'_{12} = d_2/v + D_{recg} + T_{rf1} + T_{rf2} + x$$

其中, $0 < x < (T_{burst} - T_{rf2})$ 具有不确定性。真正的时间差为

$$T_{12} = d_2/v - d_1/v = T'_{12} - (T_{rf1} + T_{rf2}) - x$$

由于 x 的不确定性, 以上时间差数据存在一定的误差。

情况 3 如图 4(c)所示, 若 $d_2/v + D_{recg} + T_{rf1} < d_1/v + D_{recg} + T_{rf1} + T_{burst}$, 即

$$d_2 < d_1 + T_{burst}v \quad (1)$$

节点 S_1 转到 Rx 状态后, 节点 S_2 开始发射射频, S_1 可接收并识别来自 S_2 的射频信号。 S_1 读取 Timer1 的计数值, 记录时间差为 T'_{12} , 且满足

$$d_1/v + D_{recg} + T'_{12} = d_2/v + D_{recg} + T_{rf1} + T_{rf2}$$

真正的时间差

$$T_{12} = d_2/v - d_1/v = T'_{12} - (T_{rf1} + T_{rf2})$$

此时, 节点可以获取准确的时间差数据。同理可得, 当

$$d_3 > d_2 + T_{burst}v \quad (2)$$

$$d_3 < d_1 + T_{burst}v \quad (3)$$

节点可以获取相应的准确的时间差数据。

$$T_{23} = d_3/v - d_2/v = T'_{23} - (T_{rf1} + T_{rf2}),$$

$$T_{13} = d_3/v - d_1/v = T'_{13} - (T_{rf1} + T_{rf2}).$$

在实际应用中, T_{burst} 一般非常短, 典型值为 $500 \mu s$, $T_{burst}v$ 约为 $0.17 m$, 因此条件(1)~(3)比较容易满足。在传感器网络中只要存在 3 个距离声源距离之差在 $0.17 m$ 以上的节点, 应用本文协议即可以准确捕获声音到达各节点的时间差数据, 并进一步实现声源定位计算。

2.3 大规模网络情况下的协议

由 2.1 节协议描述可知, 无线传感器网络中 3 个传感器节点即可捕获足够的时间差数据。对于大规模的实际监测网络 (传感器节点数 $N \gg 3$), 上述协议执行时会出现以下问题。

声源触发较近的 3 个传感器节点成功捕获时间差数据后, 声音信号的传播却未终止, 它仍将触发较远的节点 (从 Sleeping 状态转入射频开启状态)。根据 2.1 节协议, 这些节点也将捕获相应的时间差数据, 并上传基站。过多冗余的触发和数据将造成网络整体能耗加剧, 这一现象称为“过度触发”。

为了解决上述问题, 将 2.1 节协议修改如下。

- 1) 初始状态: 所有节点均处于 Sleeping 状态。
- 2) 当脉冲音到达某个节点时, 该节点首先将射频模块置为 Rx 状态, 侦听是否有“Satisfied”消息。如果有, 则回归 Sleeping 状态; 否则, 重复 2.1 节协议的步骤 2)~4)。

3) 若某个节点获得的时间差数目 ≥ 2 , 它将广播“Satisfied”信号, 且持续时间足够长 (设为 T_{sat}), 可以抑制网络最远端的节点不被声音信号触发。随后同样进入数据汇聚过程。

大规模网络情况下节点捕获时间差的协议描述如图 5 所示。

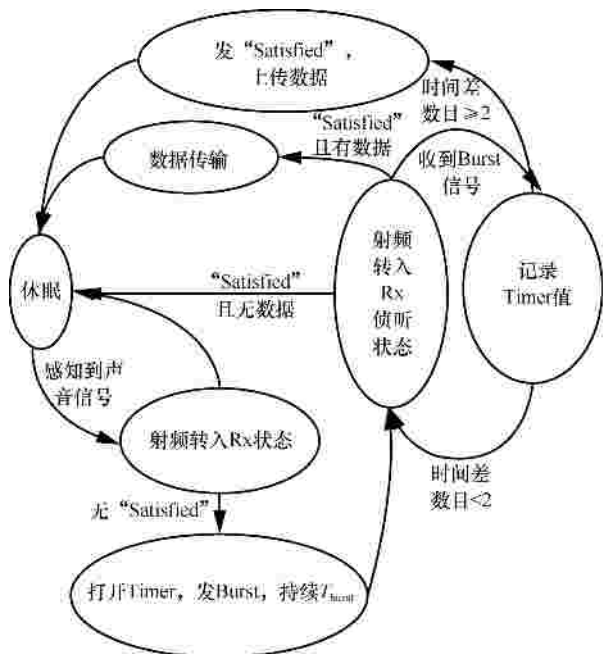


图 5 大规模网络下协议状态

3 协议能量有效性分析

3.1 传统 TDOA 方法能量有效性

在传统 TDOA 方法中，节点的射频模块始终处于工作状态（或处于 Rx 侦听态，或处于 Tx 发射态）。

假设声音事件发生频率为 F_s ，每个节点只有在上传数据时其射频模块才会进入发射状态。 $T_{data} = L_c / R_r$ 为传输一组时间差数据需要的时间。那么在单位时间 T 内，每个节点的射频模块处于发射状态的时间为

$$T_{tx}^{tradition} = TF_s T_{data}$$

在其余时间内，各节点的射频模块均处于侦听状态，其总时长为

$$T_{rx}^{tradition} = T - T_{tx}^{tradition} = T(1 - F_s T_{data})$$

设节点在 Tx 和 Rx 状态下的功率分别为 p_{tx} 和 p_{rx} 。那么在单位时间 T 内，传统 TDOA 方法对应的网络（最小定位系统 3 个节点）的通信总能耗为

$$E_{total}^{tradition} = 3(p_{tx} T_{tx}^{tradition} + p_{rx} T_{rx}^{tradition})$$

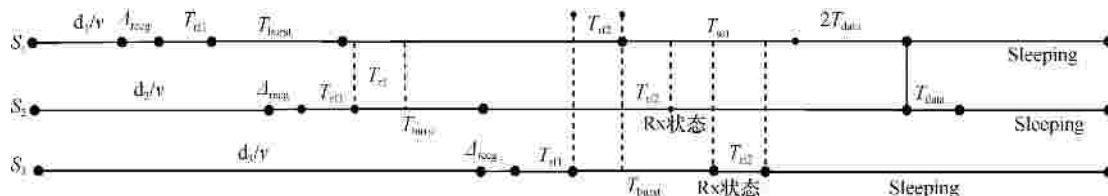


图 6 捕获到准确的时间差数据时多节点工作时序

$$= 3T[p_{tx} F_s T_{data} + p_{rx} (1 - F_s T_{data})] \quad (4)$$

3.2 逆向捕获时间差协议的能量有效性

为有效地分析本文协议的能耗，将一次定位过程分为时间差捕获和数据传输 2 个阶段。

3.2.1 时间差捕获阶段

由图 6 可见，在时间差获取阶段，节点 S_1 、 S_2 、 S_3 处于 Tx 状态的时长分别为

$$\begin{cases} T_{tx_s1}^{new} = T_{burst} + T_{sat} \\ T_{tx_s2}^{new} = T_{burst} \\ T_{tx_s3}^{new} = T_{burst} \end{cases}$$

在该阶段 S_1 处于 Rx 状态的时长为

$$\begin{aligned} T_{rx_s1}^{new} &= (d_3/v + D_{reg} + T_{rf1} + T_{rf2}) - \\ &\quad (d_1/v + D_{reg} + T_{rf1} + T_{burst}) \\ &= d_3/v - d_1/v + T_{rf2} - T_{burst} \end{aligned}$$

同理，在该阶段 S_2 处于 Rx 状态的时长为

$$\begin{aligned} T_{rx_s2}^{new} &= (d_3/v + D_{reg} + T_{rf1} + T_{rf2} + T_{sat} + 2T_{data}) \\ &\quad - (d_2/v + D_{reg} + T_{rf1} + T_{burst}) \\ &= d_3/v - d_2/v + T_{rf2} + T_{sat} + 2T_{data} - T_{burst} \end{aligned}$$

由协议可知， S_3 发送射频信号后，会转入 Rx 状态，并立即收到 S_1 发出的“Satisfied”消息，于是进入 Sleeping 状态，其处于 Rx 状态时长为 $T_{rx_s3}^{new} = T_{rf2}$ 。

3.2.2 数据传输阶段

数据传输阶段， S_1 需传输 2 组时间差数据； S_2 需传输一组时间差数据；而 S_3 没有数据要上传。

S_1 在广播“Satisfied”消息后立即开始上传数据，其处于 Tx 状态的时长为

$$T_{data_tx_s1}^{new} = 2T_{data}$$

S_2 侦听载波，在 S_1 传输完数据后开始上传自己的数据，其时长为

$$T_{data_tx_s2}^{new} = T_{data}$$

S_3 没有数据上传，其收到“Satisfied”消息后立即转入睡眠状态。

3.2.3 总能耗

在逆向求解时间差声源定位协议下，在单位时间 T 内，所有节点在 T_x 状态下的能耗为

$$E_{tx}^{new} = p_{tx} TF_s (T_{tx_s1}^{new} + T_{tx_s2}^{new} + T_{tx_s3}^{new} + T_{data_tx_s1}^{new} + T_{data_tx_s2}^{new}) = p_{tx} TF_s (3T_{burst} + T_{sat} + 3T_{data}) \quad (5)$$

在 R_x 状态下的能耗为

$$E_{rx}^{new} = p_{rx} TF_s (T_{rx_s1}^{new} + T_{rx_s2}^{new} + T_{rx_s3}^{new}) = p_{rx} TF_s (2d_3/v - d_2/v - d_1/v + 3T_{rf2} + T_{sat} + 2T_{data} - 2T_{burst}) \quad (6)$$

因此，在单位时间 T 内，逆向求解时间差声源定位方法的通信总能耗为

$$E_{total}^{new} = E_{tx}^{new} + E_{rx}^{new} \quad (7)$$

对比式(4)与式(7)，可以初步得出以下结论。

1) 传统TDOA声源定位方法只与声音事件发生频率 F_s 有关，频率越低，总能耗越小，但即使没有声音事件发生 $F_s = 0$ ， $E_{total}^{tradition} = 3Tp_{rx}$ ，网络中的节点需要始终监听射频同步信号，能量浪费较严重。

2) 本文所述协议总能耗除了与 F_s 有关，还与声源到各节点的距离有关。首先分析能耗与 F_s 的关系。由式(5)，作为表达式的乘性因子，随着 F_s 的减小，发送射频信号的能耗会迅速减小；同理，由式(6)，接收射频信号的能耗也会迅速减小。当没有声音事件发生时 $F_s = 0$ ，本文协议的通信总能耗为零，远小于传统方法的 $3Tp_{rx}$ 。其次分析能耗与声源到各节点的距离的关系。在式(5)中， E_{tx}^{new} 与距离无关；在式(6)中，距离对能耗 E_{rx}^{new} 的影响体现在因子 $(2d_3/v - d_2/v - d_1/v)$ 上。由于 d_1 、 d_2 、 d_3 本身相差并不大，从统计学角度分析，上述距离的波动对于总能耗影响甚微。

综上，2种方法的总能耗主要取决于 F_s 。随着 F_s 的减小，2种方法的总能耗都会降低，但本文所述协议的能耗降低更快，且在相同 F_s 情况下能耗更低。在 5.1 节实验结果中，将给出 2 种方法总能耗的量化比较结果。

3.3 大规模网络情况下的能量有效性

3.3.1 传统 TDOA 方法

设在大规模实际监测网络中有 N 个节点 ($N \gg 3$)。设每次声音事件触发的平均节点数为 N_1 ($N_1 < N$)。

在 T 时间内，所有节点处于 T_x 状态（发送时间差数据）的总时长为

$$T_{multi_tx}^{tradition} = N_1 T F T_{data} \quad (8)$$

所有节点处于侦听状态的总时长为

$$T_{multi_rx}^{tradition} = N_1 T (1 - F T_{data}) + (N - N_1) T$$

在单位时间 T 内，传统 TDOA 方法对应的网络通信总能耗为

$$E_{total}^{tradition} = p_{tx} T_{multi_tx}^{tradition} + p_{rx} T_{multi_rx}^{tradition} = N_1 T [p_{tx} F T_{data} + p_{rx} (1 - F T_{data})] + p_{rx} (N - N_1) T \quad (9)$$

对比于式(4)，在大规模网络情况下传统 TDOA 方法对应的网络通信总能耗成倍增加。

3.3.2 逆向捕获时间差的方法

按照 2.3 节所述协议，当某个节点获得的时间差数据的数目 2（说明它距离声源最近）时，它将广播“Satisfied”信号，且持续足够长的时间，一方面是启动数据汇聚过程，另一方面是抑制网络中距离声源较远的节点，避免过度触发的现象。那些被抑制的节点在收到脉冲音之后开启射频模块，侦听到“Satisfied”消息，会立即回归 Sleeping 状态，其短暂的射频开启能耗可以忽略不计。可见，在大规模网络情况下本文逆向捕获时间差协议的网络通信总能耗没有明显增加，仍然趋于 3.2 节讨论的结果。在声音事件发生频率较低的情况下尤其如此。

综上，在大规模网络情况下本文协议较传统方法的节能效果更显著。

4 Voronoi 增强的牛顿迭代搜索算法

设监测区域内 3 个传感器节点 S_1 、 S_2 、 S_3 （如图 7 所示），它们的坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 和 (x_3, y_3) ；声源 S 的坐标 (x, y) 为待求解的值。

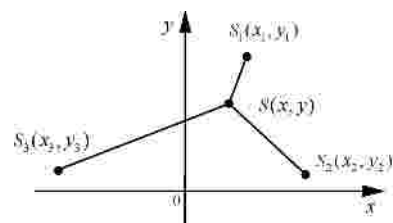


图 7 监测区域内的传感器节点和声源位置

上述传感器节点基于 2 节所提出的协议捕获的声音到达时间差数据分别为 T_{12} 、 T_{23} 和 T_{13} ，则可以列出以下方程组

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}-\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}=T_{12}v \\ \sqrt{(x+x_3)^2+(y-y_3)^2}-\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}=T_{23}v \\ \sqrt{(x+x_3)^2+(y-y_3)^2}-\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}=T_{13}v \end{cases} \quad (10)$$

采用常规方法求解式(10)并不容易,可采用牛顿迭代法加以求解。

4.1 牛顿迭代法搜索求解声源位置

牛顿迭代法是牛顿在 17 世纪提出的一种在实数域和复数域上求方程近似解的方法^[25]。为了解式(10),首先将其改写为以下形式

$$\begin{cases} f(x,y)=\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}-\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-T_{12}v \\ g(x,y)=\sqrt{(x+x_3)^2+(y-y_3)^2}-\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}-T_{23}v \\ h(x,y)=\sqrt{(x+x_3)^2+(y-y_3)^2}-\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-T_{13}v \end{cases} \quad (11)$$

采用牛顿迭代法求解式(11)的步骤设计如下:

Step1 选择初始迭代点 (x_0, y_0) ;

Step2 从式(11)的 3 个多项式中任选 2 个,假设选择 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$;

Step3 分别计算 $\partial f/\partial x, \partial f/\partial y, \partial g/\partial x, \partial g/\partial y$,组成雅克比矩阵,记为

$$Y = \begin{bmatrix} \partial f/\partial x & \partial f/\partial y \\ \partial g/\partial x & \partial g/\partial y \end{bmatrix}$$

Step4 解得

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = Y^{-1} \begin{bmatrix} -f(x_k, y_k) \\ -g(x_k, y_k) \end{bmatrix}, \quad k = 0, 1, 2, L$$

即得到

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + \Delta x \\ y_{k+1} &= y_k + \Delta y \end{aligned}$$

Step5 若满足终止条件(达到最大迭代次数或迭代点位置在多次迭代过程中几乎不变化),迭代停止;否则令 $x_k = x_{k+1}$, $y_k = y_{k+1}$,并转 Step4。

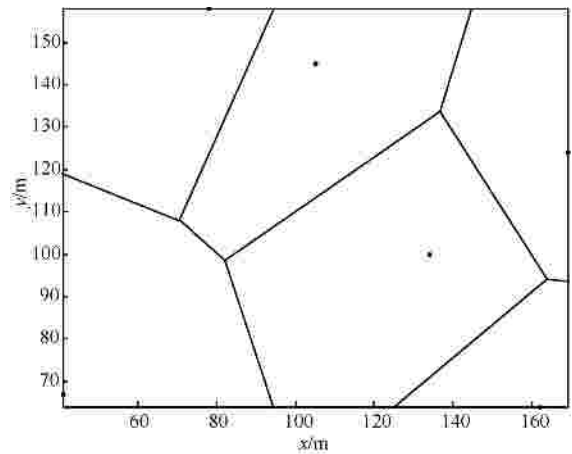
牛顿迭代法在具体应用中会出现算法无法收敛或者收敛到局部最优解的情况。从理论上讲,初始迭代点以及搜索范围越接近真实解,算法收敛效

果越好,因此,裁剪算法搜索空间,并优化初始迭代点的选择对算法求解性能的提高具有重要意义。

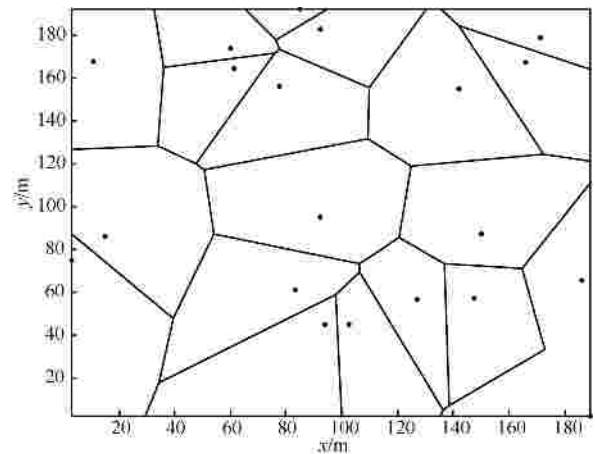
4.2 基于 Voronoi 图的搜索空间裁剪

本文引入 Voronoi 图理论对算法搜索空间进行裁剪,从而提高算法搜索效率和成功率。Voronoi 图又叫泰森多边形或 Dirichlet 图,是计算几何中重要的几何结构,有很强的实用价值^[26-29]。它是由一组连接两邻点线段的垂直平分线组成的连续多边形组成。 N 个在平面上有区别的点,按照最邻近原则划分平面;每个点与它的最近邻区域相关联。

根据 n 个传感器节点的位置,按照 Voronoi 图划分区域的方法,可以将整个监测区域划分成 n 个子区域。2 个基于传感器节点位置生成的 Voronoi 图结构如图 8 所示。



(a) 6 个传感器节点, 6 个子区域



(b) 20 个传感器节点, 20 个子区域

图 8 基于传感器节点位置生成的 Voronoi 图

由第 2 节所提出的协议可知,当某个节点获得的时间差数据的数目 ≥ 2 ,说明它是距离声源最近

的节点，那么声源一定在其所辖的 Voronoi 子区域内(如图 9 所示)，因为如果声源在其他子区域，其他节点则会距离声源更近。既然声源存在于该节点所辖的 Voronoi 子区域，那么算法搜索区域即可从整个监控区域缩减为该 Voronoi 子区域(图 9 阴影区域)，初始迭代点也可以在该区域内选择。上述算法搜索空间的裁剪效果是显著的，当监控区域较大，节点数较多时尤为明显。由此，算法的搜索求解的效率和成功率可以得到有效提高。

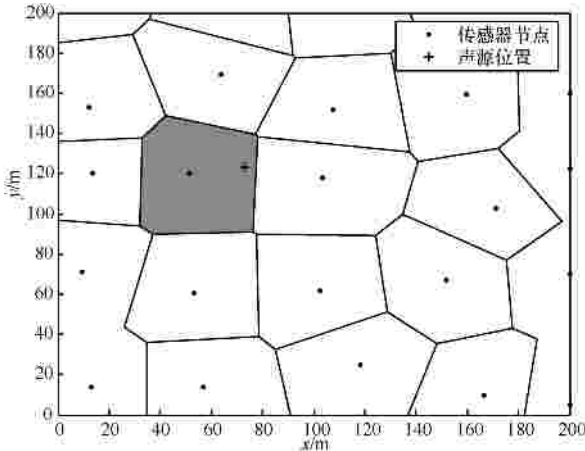


图 9 算法搜索空间裁剪示意

4.3 搜索空间的膨胀

考虑到传感器节点在声音信号接收和处理过程中的观测噪声，可以对裁剪后的搜索空间进行适当地膨胀，以保证算法稳定求解到最优解。

第 2 节所提出的协议不仅可以确定距离声源最近的节点，而且可以确定距离声源次近的和较远的第三个节点，因此根据上述传感器节点距离声源的距离，对裁剪后的搜索空间进行不同级别的膨胀。

图 10 为一个示例。其中，距离声源最近的节点所在的区域(深灰色) + 距离次近的节点所在的区域(浅灰色)构成了一级膨胀；上述区域 + 距离较远的第三个节点所在区域(淡灰色)构成了二级膨胀。

在一级/二级膨胀后的区域内搜索声源位置，算法可以稳定地搜索到最优解，从而具有噪声环境下的顽健性。以上就是本文构造的 Voronoi 增强的牛顿迭代声源定位算法。

5 实验结果

5.1 仿真实验

为了验证本文逆向捕获时间差的 Voronoi 声源

定位协议和算法的性能，在 MATLAB 平台上进行了一系列仿真实验，分别验证了算法的声源定位性能和协议的能量有效性。实验参数设置如表 2 所示。

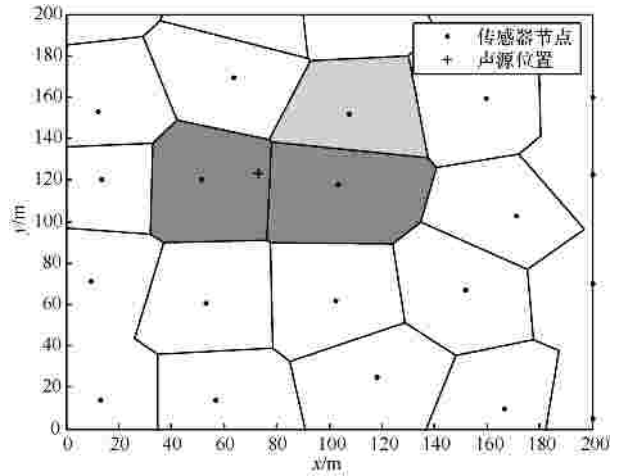


图 10 算法搜索空间裁剪后再膨胀

表 2 仿真实验参数设置

参数符号	参数值
v	340 m/s
D_{reg}	150 μ s
T_{rf1}	200 μ s
T_{rf2}	300 μ s
T_{burst}	500 μ s
T_{sat}	1000 μ s
R_{tr}	34.7 kbit/s
L_c	150 bit
P_{tx}	120 mW
P_{rx}	68 mW
T	3 600 s

1) 定位性能

在 200 m×200 m 的监测区域内进行了 4 组实验，传感器节点规模分别为 9、16、25 和 36 个。采用本文 Voronoi 增强的牛顿迭代法求解声源位置，评估算法的定位精度、求解成功率和收敛性。为了模拟实际传感器节点的硬件计数器误差，对每一组时间差数据引入不大于 5% 的误差。

图 11 示出了节点数为 16 和 36 时的定位结果。可见，在这 2 组实验中，算法定位结果均非常接近声源位置，且节点数越多定位精度越高，这是因为节点数越多搜索空间裁剪效果越好，算法的初始迭代点和搜索过程更接近声源，可以快速收敛到更精

确的结果。

4 组实验的统计结果如表 3 所示，并与未采用 Voronoi 增强的牛顿迭代法进行了比较。可见，本文算法的定位精度和求解成功率均有明显改善。

图 12 分别给出了在本文 Voronoi 增强的牛顿迭代法和单纯的牛顿迭代法进行声源定位的大量实验结果比较。传感器节点数为 36；2 种方法均运行 200 次。图中，“-”号代表成功的定位；“×”号表示不成功的定位；横坐标表示程序收敛的代数；纵坐标表示定位结果的误差，即定位结果到声源的距离。

组别	节点数	是否采用 Voronoi 增强	平均定位误差/m	求解成功率 ^{注1}
1	9	否	6.824	53%
		是	2.281	72%
2	16	否	5.436	62%
		是	2.019	81%
3	25	否	4.784	68%
		是	1.533	88%
4	36	否	3.408	76%
		是	0.907	92%

注：平均定位误差为 200 次实验的平均误差值。

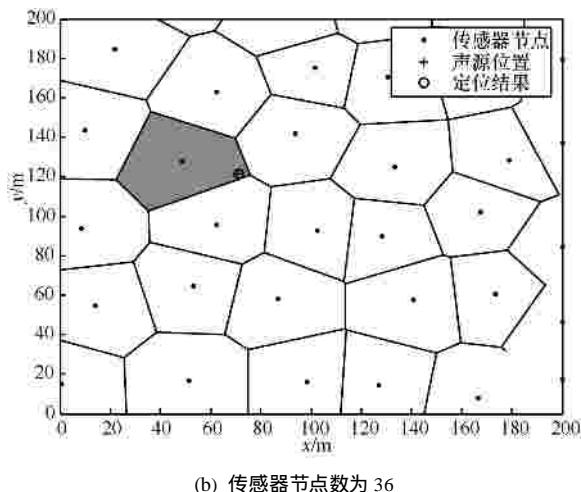
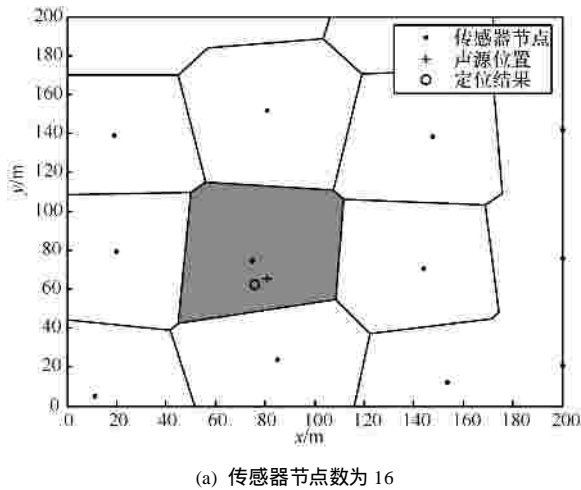


图 11 Voronoi 增强的牛顿迭代法定位结果

通过比较可见，本文 Voronoi 增强的牛顿迭代法不仅求解成功率高(·号较多)，定位结果误差小(·号接近坐标系底部)，而且绝大部分成功的收敛在 40 代之前完成。综上，基于 Voronoi 图的搜索空间裁剪策略有效提高了算法的求解精度、成功率和收敛性。

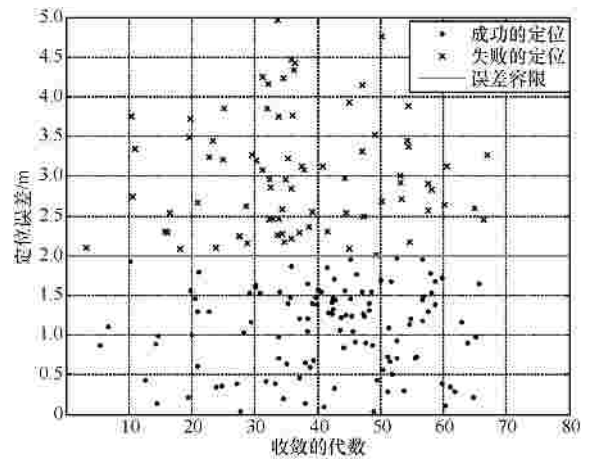
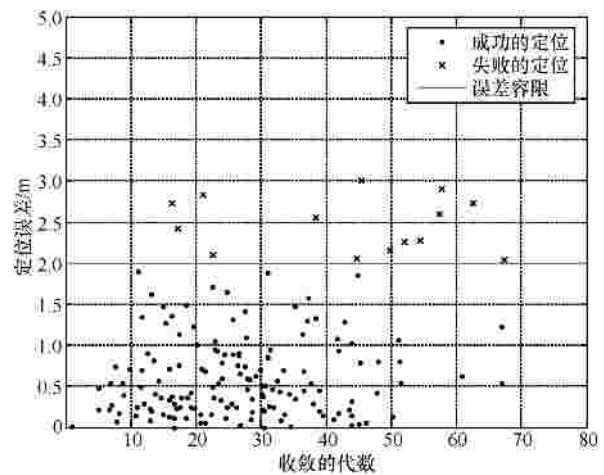


图 12 算法收敛性分析(传感器节点数 36)

2) 能量有效性

本文 3 节的理论分析指出：1) 逆向捕获时间差

注1：“求解成功”定义为当算法定位结果到声源的距离 监测区域边长的 1% 时，此次定位是成功的。

的声源定位协议与传统 TDOA 协议,它们的网络通信总能耗主要取决于声音信号的频率 F_s , 随着 F_s 的减小, 2 种协议的总能耗都会降低, 但本文协议的能耗降低更快, 且在相同 F_s 情况下能耗更低; 2) 在大规模网络情况下传统 TDOA 协议的总能耗成倍增加; 而本文协议的总能耗不会有明显增加, 节能效果显著。

以下通过数值仿真给出 2 种协议能耗性能的数量比较。图 13 示出了 4 组实验(节点规模分别为 9、16、25 和 36 个)中, 2 种协议的能耗情况。在每一组实验中, 依次仿真了 5 种声音信号频率^{注2}下协议的网络通信总能耗, 计算时间是 $T=3\ 600\text{ s}$ 。

首先可以看出, 随着节点规模的扩大, 2 种协议的网络总能耗均在增加, 但传统 TDOA 协议能耗增加明显, 而本文协议只是略有增加。这是因为在本文协议中, 距离声源最近的节点通过广播 “Satisfied” 信号可以抑制网络中距离声源较远的节点, 避免了过度触发的现象, 从而有效节约了网络的总能耗。虽然较远处的节点会短暂开启射频, 但增加的能耗甚微。这证明了本文协议在大规模网络情况下显著的节能效果。

同时, 在每一组实验中, 随着声音信号发出频率的增加, 2 种协议的网络总能耗都会增加, 但是在

相同频率点上, 本文协议的能耗明显低于传统 TDOA 协议的能耗。这是因为在本文协议中, 节点在大部分时间里处于 Sleeping 状态, 只有收到声音信号才会激活射频模块, 并以逆向方式捕获声音到达时间差信息, 所以网络能耗较低, 而传统 TDOA 协议要求节点始终处于射频 Rx 状态, 以监听射频同步信号, 因此网络能耗较大。

综上, 数值仿真的结果验证了本文逆向捕获时间差的声源定位协议较传统协议具有明显的节能优势, 特别是在大规模网络情况下节能效果更显著。这对延长传感器网络的生存时间具有现实意义。

5.2 实际应用测试

如今, 越来越多的停车场装备了视频监控系统以提高安全等级和服务质量。但是, 由于摄像机数量有限及其视角受限, 发生在停车场的犯罪或异常事件难以被有效记录。将本文提出的声源定位协议和算法应用于停车场的声源定位, 并将定位结果发送给最近的或方位最优的摄像机以控制其云台指向声音事件, 从而捕获更具价值的视频信息。停车场的声音事件可能是合法开车、非法破车而入, 或撞车事故等。这些应该作为摄像机拍摄的重点内容。

如图 14 所示, 8 个传感器节点被布置在停车场

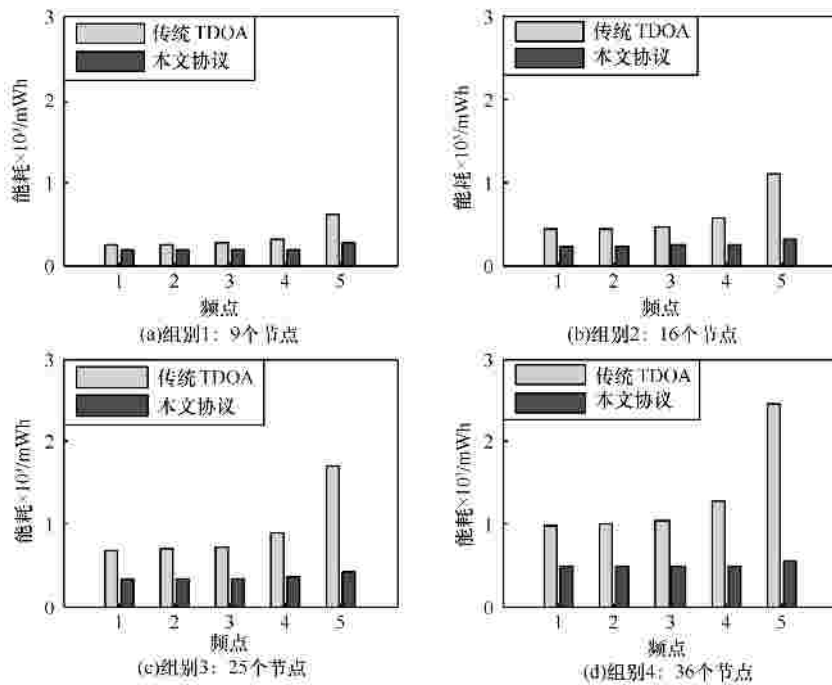


图 13 协议能耗性能分析

注2：频点 1~5 为 5^{-4}Hz 、 5^{-3}Hz 、 5^{-2}Hz 、 5^{-1}Hz 、 1Hz 。

边缘，将声源置于 3 个不同的位置进行 3 组实验，其中声源为扬声器产生的周期性“哔”声。声音信号的传播会被柱子和汽车阻碍，并且存在信号传播多径效应。在每一组实验中，记录 20 个定位结果(图 14 中的 + 号)。结果显示如下。

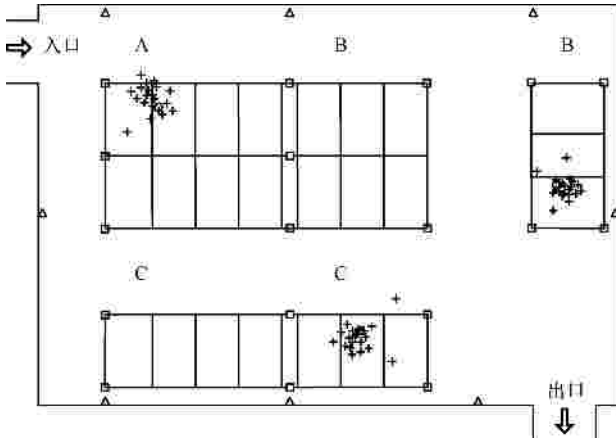


图 14 实验结果(“?”代表声源位置，“+”为定位结果，“Δ”传感器节点)

1) 绝大部分定位结果在真实声源周围,其定位误差统计如表 4 所示。3 组实验的平均定位误差分别为: 2.245 m、2.097 m、1.916 m。可见,本文声源定位算法定位精度较高,可以满足停车场辅助视频监控应用的需求。

表 4 定位误差统计结果

实验分组	最小定位误差/m	最大定位误差/m	平均定位误差/m
1	0.172	3.751	2.245
2	0.137	4.613	2.097
3	0.122	4.085	1.916

2) 每组定位结果都趋向于最近的传感器节点。这是因为本文算法会在离声源最近的节点所辖的 Voronoi 子区域内搜索最优解,其结果必然距离该节点较近。

3) 个别定位结果误差较大。这是环境中的噪声和干扰对算法定位结果造成了影响。但整体定位效果表明算法具有噪声环境下的顽健性。

为了验证本文声源定位机制的能量有效性,进行了以下测试。设置停车场中的 3 个声源轮流发声,发声间隔为 Δt ($\Delta t = 1\text{ s}, 5\text{ s}, 25\text{ s}$)。在采用电池供电的情况下^{注3},统计节点工作时间和网络生存时间。

注3: 传感器节点均采用同一批次蓄电池(6V12Ah)供电。

将统计结果与相同条件下的传统 TDOA 方法测试结果进行比较,结果如表 5 所示。另外,在停车场布置 16 个传感器节点,重复上述测试和比较,结果如表 5 所示。

表 5 能耗性能统计结果

节点数	发声间隔 Δt /s	网络生存时间/h	
		本文声源定位机制	传统 TDOA 方法
8	1	94.3	39.5
	5	122.5	44.6
	25	187.0	51.4
16	1	89.2	17.9
	5	119.8	21.1
	25	179.4	35.2

注: 网络生存时间定义为从网络初始化到第一个节点能量耗尽的时间。

1) 在相同发声间隔情况下,本文逆向捕获时间差的声源定位机制比传统 TDOA 方法具有更长的网络生存时间;而且发声间隔越大,本文声源定位机制的这种优势越明显,表现出良好的节能效果。

2) 当传感器网络规模从 8 个节点增加到 16 个节点时,传统 TDOA 方法的网络生存时间大幅度减小(39.5 h、44.6 h、51.4 h 分别减为 17.9 h、21.1 h、35.2 h),而本文声源定位机制的网络生存时间只是稍有减小(94.3 h、122.5 h、187.0 h 分别减为 89.2 h、119.8 h、179.4 h),表现出在大规模网络情况下显著的节能效果。

可见,实际测试结果与理论分析结果和数值仿真结果一致,表明本文声源定位机制具有能量有效性,尤其适用于大规模网络中低频声源的精确定位。

6 结束语

本文研究了无线传感器网络中能量有效的声源精确定位方法。提出了一种逆向捕获时间差的声源定位协议。该协议可以使传感器节点在大部分时间里处于射频 Sleeping 状态,因此节能效果明显,同时协议可以抑制网络中距离声源较远的节点被“过度触发”,因此在大规模网络情况下具有显著的节能效果。在利用时间差数据求解声源位置时,引入 Voronoi 图理论对搜索空间进行裁剪和膨胀,有效提高了算法求解的效率和成功率。大量仿真实验结果表明该声源定位机制具有能量有效性、定位解算的精确性、快速收敛性和噪声环境下的顽健性。在停车场环境下的应用测试也证明了该声源定

位机制的实际有效性。

文中的协议设计以最小定位组合(3 个传感器节点)展开,可以依据“逆向捕获时间差”的原理拓展出 k ($k \geq 3$)节点的声源定位协议。更多的时间差数据有助于提高 Voronoi 增强的牛顿迭代法定位解算的精度。

参考文献：

- [1] SAYEESH K V, KUMAR K V, PHANI G L. Fault repair algorithm using localization and controlled mobility in WSN[A]. Proc of 2010 IEEE Global Telecommunication Conference (GLOBECOM 2010)[C]. Miami, Florida, USA, 2010. 1663-1667.
- [2] LIU Y, HU Y H, PAN Q. Decentralized robust acoustic source localization with wireless sensor networks for heavy-tail distributed observations[A]. Proc of 2010 IEEE Global Telecommunication Conference (GLOBECOM 2010)[C]. Miami, Florida, USA, 2010. 1-5.
- [3] MENG W, XIAO W D, XIE L H. Diffusion based projection method for distributed source localization in wireless sensor networks[A]. Proc of 2011 IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2011)[C]. Shanghai, China, 2011. 537-542.
- [4] WANG Q X, ZHENG R, TIRUMALA A, *et al.* Lightning: a hard real-time, fast, and lightweight low-end wireless sensor selection protocol for acoustic event localization[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(5): 570-584.
- [5] 夏娜, 唐树青, 赵娟. WSNs 中节点协同声源定位协议研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(10): 1492-1495,1600.
XIA N, TANG S Q, ZHAO J. Research on acoustic source localization protocol based on sensors collaboration in WSNs [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2011, 34(10): 1492-1495, 1600.
- [6] 夏娜, 郑语晨, 杜华争等. 刚性驱动水下传感器节点自组织布置[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 494-505.
XIA N, ZHENG Y C, DU H Z, *et al.* Rigidity driven underwater sensor self-organized deployment[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(3): 494-505.
- [7] DU H Z, XIA N, JIANG J G, *et al.* A monte carlo enhanced PSO algorithm for optimal QoM in multi-channel wireless networks[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2013, 28(3): 553-563.
- [8] XIA N, XU L N, NI C C. Optimal QoM in multichannel wireless networks based on MQICA[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 2013:1-14.
- [9] KIM W. Support vector learning approaches for object localization in acoustic wireless sensor networks[A]. Proc of 2010 IEEE International Conference on Intelligent Systems[C]. London, UK, 2010. 485-489.
- [10] KIM W. Event-driven Gaussian process for object localization in wireless sensor networks[A]. Proc of 2011 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. San Francisco, California, USA, 2011. 2790-2795.
- [11] VAGHEFI R M, GHOLAMI M R. RSS-based sensor localization with unknown transmit power[A]. Proc of 2011 International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing[C]. Prague, Czech Republic, 2011. 2480-2483.
- [12] YAN Y S, WANG H Y, SHEN X H. Efficient convex optimization method for underwater passive source localization based on RSS with WSN[A]. Proc of 2012 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing(ICSPCC)[C]. Hong Kong, China, 2012. 171-174.
- [13] ZENG W J, LI X L. High-resolution multiple wideband and nonstationary source localization with unknown number of sources[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(6): 3125-3136.
- [14] LU L, WU H C. New direction-of-arrival-based source localization algorithm for wideband signals[A]. Proc of 2011 IEEE Global Telecommunications Conference(GLOBECOM 2011)[C]. Houston, Texas, USA, 2011. 1-5.
- [15] YOON J Y, KIM J W, LEE W Y. A TDOA-based localization using precise time-synchronization[A]. Proc of 2012 International Conference on Advanced Communication Technology[C]. Chengdu, China, 2012. 1266-1271.
- [16] QU X M, XIE L H. Source localization by TDOA with random sensor positions errors -part I: static sensors [A]. Proc of 2012 International Conference on Information Fusion[C]. Singapore, 2012. 48-53.
- [17] MERHI Z, ELGAMEL M, BAYOUMI M. A lightweight collaborative fault tolerant target localization system for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(12): 1690-1704.
- [18] LIU Y, HU Y H. Robust maximum likelihood acoustic source localization in wireless sensor networks[A]. Proc of 2009 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2009)[C]. Hawaii, 2009. 1-6.
- [19] LU L, WU H C. Robust expectation-maximization algorithm for multiple wideband acoustic source localization in the presence of nonuniform noise variances[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(3): 536-544.
- [20] NAKAMURA K, NAKADAI K, ASANO F, *et al.* Intelligent sound source localization and its application to multimodal human tracking[A]. Proc of 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)[C]. San Francisco, California, USA, 2011. 143-148.
- [21] ZHANG C, HUANG Y. Research on acoustic source localization using time difference of arrival measurements[A]. Proc of 2012 International Conference on Measurement, Information and Control[C]. Harbin, China, 2012. 220-224.
- [22] KNAPP C H, CARTER G C. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Transactions on Acoustic, Speech and Signal Processing, 1976, 24(4): 320-327.
- [23] JIA J J, LIU M J, LI X F. Acoustic localization algorithm using wire-

less sensor networks[A]. Proc of 2009 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation[C]. Changsha, China, 2009. 434-437.

- [24] VAKULYA G, SIMON G. Fast adaptive acoustic localization for sensor networks[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(5): 1820-1829.
- [25] ALBANESE R, RUBINACCI G. Numerical procedures for the solution of nonlinear electromagnetic problems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(2): 1228-1231.
- [26] VORONOI G M. Nouvelles applications des parametres continus a theorie des formes quadratiques[J]. Deuxieme Memoire Recherches Sur Les Paralleloedres Primitives, Journal Für Die Reine Und Angewandte Mathematik, 1908, 34: 98-287.
- [27] FU N, IMAI H. Voronoi diagrams on periodic graphs[A]. Proc of 2010 International Symposium on Voronoi Diagram in Science and Engineering[C]. Quebec, Canada, 2010. 189-198.
- [28] XIA N, DU H Z, LI S J, *et al.* VSPSA for acoustic source localization in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2013, 19(3-4): 277-304.
- [29] MIRZARGAR M, ENTEZARI A. Voronoi splines[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(9): 4572-4582.



倪成春 (1989-), 男, 江苏宿迁人, 合肥工业大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统及其应用。



徐朝农 (1977-), 男, 安徽巢湖人, 博士, 中国石油大学 (北京) 副教授、硕士生导师, 主要研究方向为自组织无线网络、嵌入式系统。



丁胜 (1979-), 男, 安徽淮北人, 硕士, 合肥工业大学讲师, 主要研究方向为无线传感器网络、智能信息处理。

作者简介:



夏娜 (1979-), 男, 安徽芜湖人, 博士, 合肥工业大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、导航信息处理、计算智能及应用。



郑榕 (1975-), 女, 北京人, 博士, 加拿大麦克马斯特大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为网络监控和诊断、信息物理系统、序列学习和决策理论。