

基于分簇结构无线传感器网络的高效无源定位方法

李 协 张效义 曾 禹

(解放军信息工程大学信息工程学院, 郑州 450002)

摘 要: 针对基于节点通信能力和能量受限的无线传感器网络实现高精度无源定位的问题, 首先, 在分簇结构网络中, 通过折中单个簇的 TDOA 定位精度和运算复杂度, 确定了簇规模; 其次, 基于直达波环境中 TDOA 定位误差是按布站 GDOP 对测量误差放大的原理, 提出第一轮定位先使用网内所有节点以 RSSI 定位方法粗估计目标辐射源位置, 并根据各簇在该粗估计位置处的布站 GDOP 和测量误差估算 TDOA 定位标准差, 第二轮定位选择具有较低 TDOA 定位估计标准差的部分簇参与 TDOA 定位, 最后将这些簇的 TDOA 定位结果按估算的定位估计标准差加权平均, 求得最终定位解。仿真结果证明该方法有效的去除了冗余节点, 实现以半数节点接近使用全部节点的定位精度。

关键词: 无源定位; 簇规模; 到达时间差; 接收信号强度; GDOP

中图分类号: TN 958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)04-0587-08

An efficient passive location method based on clustering structure wireless sensor network

LI Xie ZHANG Xiao-yi ZENG Yu

(Information Engineering College, Information Engineering University of PLA, Zheng Zhou 450002, China)

Abstract: This paper presents an efficient method to optimize the passive location accuracy base on communication and energy constrained wireless sensor network. Trade off the location accuracy and the computational complexity by set the scale of single cluster; based on the theory of the target position estimation variance is scaling the measurements error by GDOP (geometry dilution of position), propose a two rounds passive location method; the first round, using RSSI location (Received Signal Strength Indicator) scheme by employ the whole sensor set to give the coarse estimation of target location. To estimate the TDOA location estimation variance by the product of GDOP (geometry dilution of position) of cluster and the measurements error; The second round, select a part of clusters which have lower variance in the coarse estimation of target location, then using these selected sensors' TDOA (Time Difference of Arrival) location solution weighted by location estimation variance to give the fine estimation of target location. Simulation results verify this method get rid of the redundant sensors efficiently, use half of sensors approach to the location accuracy of use all sensors.

Key words: passive location; scale of cluster; Time Difference Of Arrival; Received Signal Strength Indication; Geometry Dilution Of Position

1 引言

非合作射频信号的无源定位是传感器网络的重要应用, 如美国国防高技术研究局研制的“狼群”系统的定位功能^[1]。基于传感器网络实现无源定位, 从提高定位精度的角度, 希望传感网内所有的节点均参与定位, 但定位精度并不随着参与定位的节点数量的增加而线性增加^[2], 特别的, TDOA^[3]定位方法定位精度与待定位信号的时频结构、节点布放几何结构等因素有

关^[4], 因此某些节点对最终定位结果的贡献很小, 而这些节点同样需要传递时延差估计所需的信号采样值, 从而浪费了传感网有限的通信、能量资源, 减少了节点寿命^[5]。针对这一问题, 文献^{[4][5]}在节点严格两两成对 (pairs) 的场景设置下, 提出根据各个节点对与粗估计的辐射源位置间的几何关系所反映的定位估计的 Fisher 信息的大小, 选择部分节点对参与最终的 TDOA 定位。仿真证明其方法从节点全集中高效的选择出参与定位的子集, 以半数节点逼近使用全部节点的定位性能, 在

网络层面实现了传感网无源定位应用的数据压缩。

然而,文献^[4]提出的方法也存在一些问题:一是其设定并在后续研究^{[5][6]}沿用的“节点两两成对”这一场景条件过强,尤其在节点数量较多时,节点成对成为难点,且这种网络结构并不常见;二是其第一轮利用全部节点对目标辐射源进行的TDOA粗定位所传输的数据量仍然较大。为解决第一个问题,本文针对更贴近实际的分簇网络展开讨论,以簇为基本定位单位,通过分别分析单个簇内包含的节点数量与TDOA定位估计的标准差、与运算复杂度的关系,折衷二者性能,确定了单个簇规模;针对第二个问题,基于直达波环境中布站几何精度稀释因子(GDOP)^[8]和定位精度的CRLB等价的原理,提出了TDOA/RSSI联合两轮定位方法,即首先用网内所有节点以RSSI^[9]定位方法(不增加额外设施,交互数据很小),粗估计辐射源位置;其次,计算本簇在辐射源位置处一点的GDOP,并进一步估算TDOA定位估计标准差,去除在目标辐射源粗估计处TDOA定位估计标准差大,即对最终定位结果贡献小的簇,并对最终选择出的参与TDOA定位的各个簇的定位结果按TDOA定位估计标准差加权求精。该方法基于分簇结构传感网,高效的去除了无源定位应用中的冗余节点,在保持较高的定位精度和较小的计算开销的同时较大的延长了网络生存周期、减轻了数据负载。

2 问题描述

2.1 单个簇规模的讨论

随机布局的节点在成簇时,可认为其单个簇的几何结构趋于簇内节点环绕簇首,簇首居于中心的形式。对于平面二维定位,文献^[8]讨论了这种几何结构的最优化布局应如图1所示,(r 为目标到簇首的距离, l 为簇内节点到簇首的距离, K 为簇内节点数量):

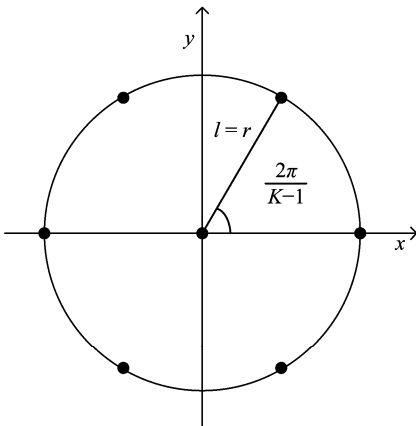


图1 TDOA定位传感器节点最优布局

Fig. 1 Optimum sensor array in TDOA location

即当簇内普通节点均匀的分布在以簇首为圆心的圆上时,可得到目标位置坐标估计的最小GDOP。GDOP与簇内节点数量 k 的关系^[8]如式(1):

$$GDOP \geq \frac{2}{\sqrt{K}}; \quad K \geq 3 \quad (1)$$

定位估计标准差为^[8]:

$$\sqrt{\text{var } x + \text{var } y} = c \delta_r \cdot GDOP \quad (2)$$

其中, δ_r 为时延估计标准差, c 为光速。由公式(1)、(2)可知,目标位置坐标估计的标准差与最优布局下传感器节点的数目成反比;设 $c \cdot \delta_r = 1.8$, $r = l = 100\text{m}$,计算最优布局簇的簇首位置附近 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 区域内的TDOA定位目标位置坐标估计的标准差的最小值(图2为含5个节点的情况),与公式(1)所示理论值作对比,见图3。由图3可知,单个簇内节点数的增加的确会提高TDOA定位的精度极限,但是节点数的进一步增加带来TDOA定位的精度极限的改善越来越小,这符合经济学中的“边际递减效应”理论,即当单个簇内节点达到一定数目后,就不必要继续无止境的增加节点的数目了。然而,如何确定最优的群内节点数量,还需要考虑节点数目增加带来的运算量的增加。

TDOA定位的运算量主要由时差估计和定位解算两部分组成,以使用广义互相关法^[10]估计达到时间差,并用chan氏算法^[12]做定位解算为例进行分析。则一个含有 K 个节点的簇,进行一次TDOA定位所需的乘法运算量为:

$$S = S_1 + S_2 = (K-1) \times (b \times 2^{b+1}) + (K-1)^3 + 3^3 + 3 \times [(K-1)^2 \times 3] + (K-1)^2 + 3^2; \quad K \geq 3 \quad (3)$$

其中, $S_1 = (K-1) \times (b \times 2^{b+1})$ 为 $K-1$ 次时差估计的工程算法的乘法运算量^[10]。 2^b 代表用于互相关的信号数据块的大小,取 $b = 6$ ^[10],则节点数目与TDOA定位运算量关系见图4。

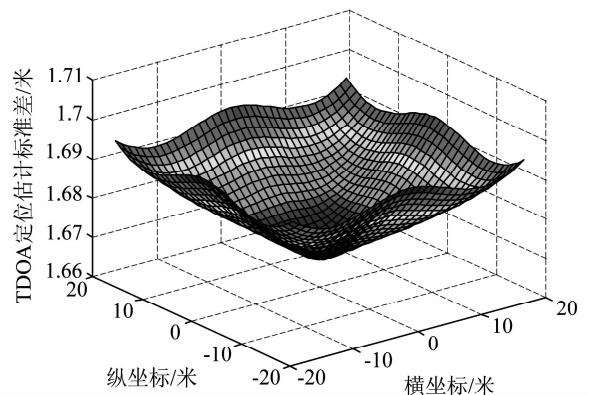


图2 含5个节点最优布局的簇,簇首位置附近区域TDOA定位标准差

Fig. 2 Optimum Geometry cluster(5 sensors)'s TDOA location standard deviation

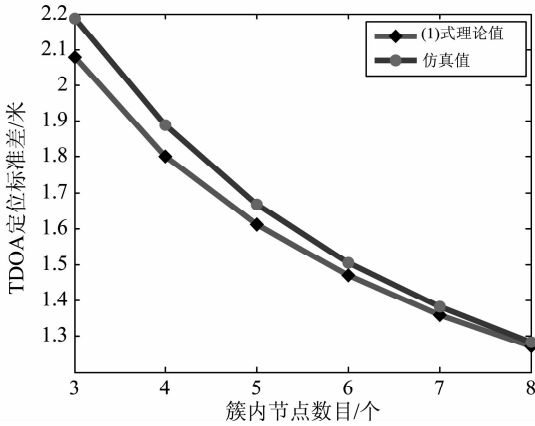


图 3 最优布局的簇,节点数目与 TDOA 定位标准差的关系
Fig. 3 Relationship between optimum Geometry cluster's scale and TDOA location standard deviation

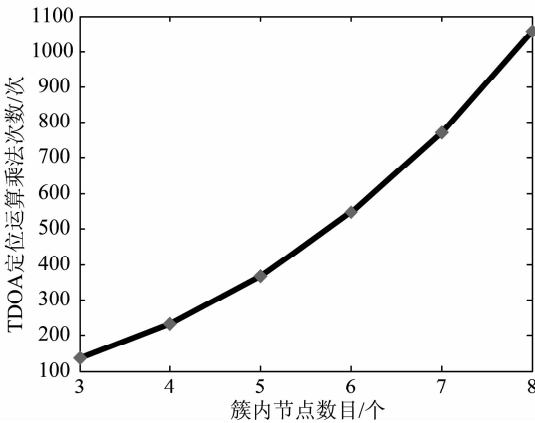


图 4 最优布局的簇,节点数目与 TDOA 定位运算量关系
Fig. 4 Relationship between optimum geometry cluster's scale and TDOA location estimation computational complexity

综上,折衷考虑实际工程中所能提供的运算资源和对定位精度的需求,来确定单个簇的规模,即求解关于如下式所示目标函数的最优化问题:

$$\min_M f(K) = \Delta_1 f_1(K) + (1 - \Delta_1) f_2(K); \quad K \geq 3$$

$$0 \leq \Delta_1 \leq 1 \quad (4)$$

式(4)中,将 TDOA 定位 CRLB 与簇内节点数量 K 的关系,做归一化处理表述为 $f_1(K)$;将节点数目与 TDOA 定位运算量关系,做归一化处理表述为 $f_2(K)$, Δ_1 为权值。为防止目标函数 $f(K)$ 仅倚重于 $f_1(K)$ 或 $f_2(K)$,取 $0.4 \leq \Delta_1 \leq 0.6$,得 $f(K); K=3, 4, 5 \cdots 8$,如图 5, X 轴代表簇内节点数目 K , Y 轴权值系数 Δ_1 , Z 轴代表 $f(K)$ (即目标函数,无量纲),可确定本文场景最优的单个簇的规模为簇内含 3-5 个节点。当然,采用本节的方法所确定单个簇的规模可能会由于采用不同的算法和硬件而改变,但就该方法本身而言是适用的。

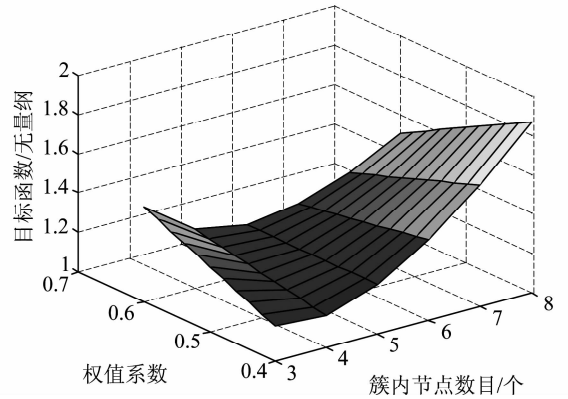


图 5 权值系数为 $0.4 \leq \Delta_1 \leq 0.6$ 时,最优布局簇节点数目与目标函数关系

Fig. 5 Relationship between optimum geometry cluster's scale and objective function ($0.4 \leq \Delta_1 \leq 0.6$)

2.2 簇选择标准

设本文涉及的应用场景如图 6,在 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 的二维平面内空投随机布放 $n=40$ 个节点,全网严格同步,节点自身位置已知。按本文 2.1 所述,按 LEACH^[11]路由协议,优先均衡簇规模,由三至五个节点构成一个簇,簇间无共用节点,簇内数据一跳传输。目标辐射源射频信号按直达波传播。

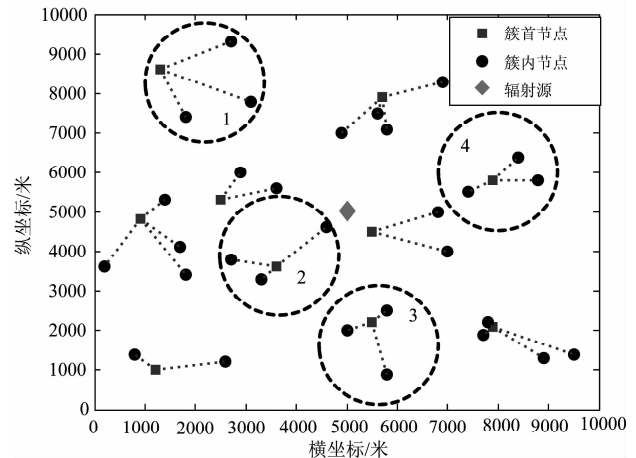


图 6 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 的二维平面内随机布局的 40 个节点

Fig. 6 Random deployed 40 sensors in 2D scenario covering a $10\text{km} \times 10\text{km}$ area

设全网共有 N 个簇,每个簇内含 $K (3 \leq K \leq 5)$ 个节点。其中,第 i 个簇内的第 j 个节点位置坐标为 $[x_{i,j}, y_{i,j}]$, $i=1, 2, \cdots, N$; $j=1, 2, \cdots, K$;辐射源坐标为 $\theta^T = [x_0, y_0]$,且在传感网覆盖范围内。对应的,第 i 个簇的 GDOP 如下式:

$$GDOP_i = \sqrt{G_i(1,1) + G_i(2,2)} \quad (5)$$

其中,

$$G_i = \frac{1}{(c\delta_{r,i})^2} (H_i^T Q_i^{-1} H_i)^{-1} \quad (6)$$

(6)式中, H_i 是测量值对未知量的偏导:

$$H_i = (c\delta_{r,i})^2 \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta R_{i,2}}{\partial x} & \frac{\partial \Delta R_{i,2}}{\partial y} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta R_{i,N}}{\partial x} & \frac{\partial \Delta R_{i,N}}{\partial y} \end{bmatrix}_{(K-1) \times 2} \quad (7)$$

$\Delta R_{i,j}$ 是第 i 个簇内的第 j 个节点到辐射源的距离与该簇内簇首到辐射源的距离差:

$$\Delta R_{i,j} = R_{i,j} - R_{i,1} = c \cdot \Delta t_{i,j} \quad (8)$$

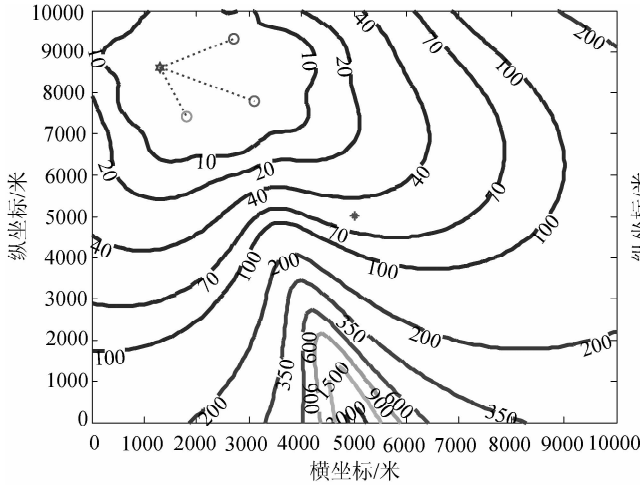
辐射源与各个节点间的距离为:

$$R_{i,j} = \sqrt{(x-x_{i,j})^2 + (y-y_{i,j})^2} \quad (9)$$

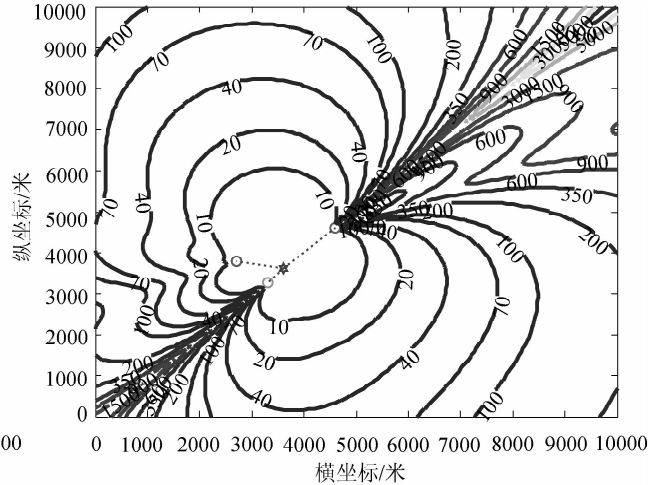
(8)式中 $\Delta t_{i,j}$ 为 TDOA 测量值, 即接收的辐射源信号到达第 i 个簇内的第 j 个节点与到该簇内簇首的时间差。在高斯环境中, $\Delta t_{i,j}$ 误差与很多因素有关, 可假设第 i 个簇内的测量距离差是均值为 0, 方差为 $(c\delta_{r,i})^2$ 的独立同分布的随机变量, 其协方差矩阵为^[12]:

$$Q_i = (c\delta_{r,i})^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 2 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 & 2 \end{bmatrix}_{(K-1) \times (K-1)} \quad (10)$$

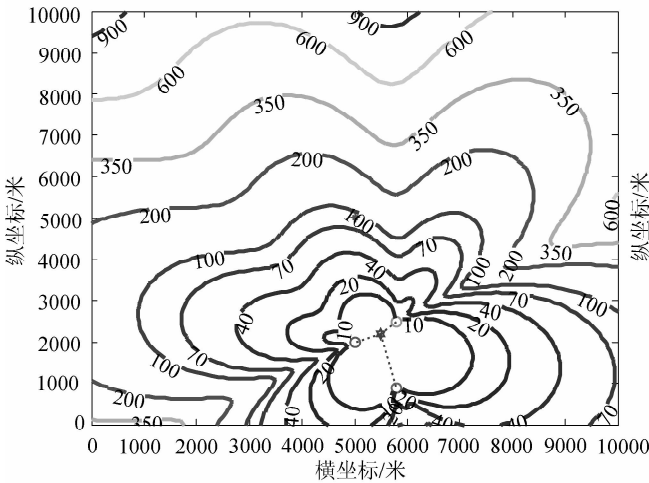
由于在本文场景中各节点随机分布, 因此每个簇的几何形状也各不相同, 以图 6 中从左至右带数字标号的四个虚线圈内的簇为例, 他们在受控区域内的 GDOP 等高线图依次如图 7 所示:



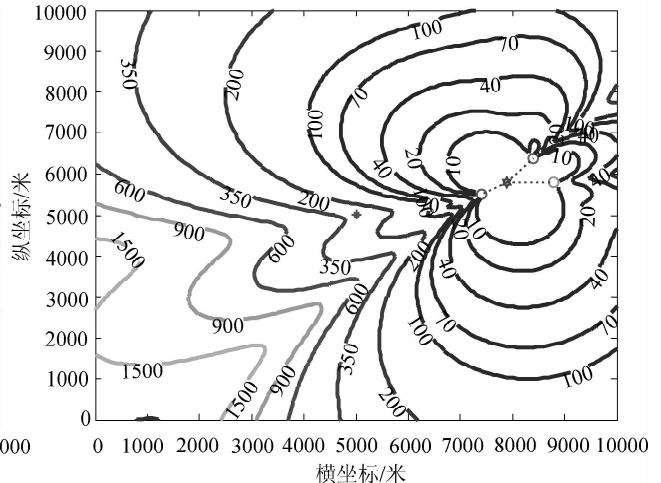
(a) 1号簇的GDOP等高线图



(b) 2号簇的GDOP等高线图



(c) 3号簇的GDOP等高线图



(d) 4号簇的GDOP等高线图

图7 不同簇的GDOP等高线图

Fig. 7 Different cluster with different GDOP contour map

这四个簇在目标辐射源位置处的 GDOP 如表 1:

表 1 不同簇在目标辐射源位置处 GDOP

Tab. 1 Different cluster's GDOP at the target position

簇序号	1	2	3	4
目标辐射源位置处 GDOP	53.5762	572.0168	88.9961	299.5032

如表 1,不同簇在目标辐射源位置处的 GDOP 值差异巨大,代表了不同的簇几何结构对同一目标定位的精度影响不同。据此原理, GPS 系统中以 GDOP 最小为原则选择定位卫星^[15]、蜂窝网移动终端定位应用中以 GDOP 最小为原则选择定位基站^[16]。由此,自然的想到,在第二轮的精确定位时,去除那些在目标辐射源位置处定位估计标准差较大的簇,从而方便的冗余节点,实现对参加 TDOA 定位的节点的选择。

3 RSSI/TDOA 两轮定位流程设计

在基于分簇结构的传感器网络中,如何高效去除定位应用时冗余节点的问题,就是从网内全部的簇中选取尽量少的簇,使定位精度尽可能的接近使用全部簇的定位精度的问题。该问题可用公式表述为:

$$\min_{c_1, \dots, c_N} \text{var} \left(\left\| \boldsymbol{\theta} - F \left(\sum_{i=1}^M c_i \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_i \right) \right\| \right) \quad i = 1, 2, N$$

$$s.t., c_1 + c_2 + \dots + c_N = M \leq N, \quad c_i \in \{0, 1\} \quad (11)$$

其中, $c_i = 1$ 表示该簇被选择, $c_i = 0$ 表示该簇未被选择, $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i$ 为第 i 个簇的定位结果。本文按各个簇的 TDOA 定位估计标准差的倒数为权值,选择参加定位的簇,使得这些簇在目标辐射源位置处一点的 TDOA 定位估计标准差的和最小,如下式:

$$\min_{c_1, \dots, c_N} \left(\sum_{i=1}^N c_i \cdot \sqrt{\text{var } x_{0,i} + \text{var } y_{0,i}} \right) =$$

$$\min_{c_1, \dots, c_N} \left(\sum_{i=1}^N c_i \cdot (c \delta_{T,i} \cdot GDOP_i) \right)$$

$$s.t., c_1 + c_2 + \dots + c_N = M \leq N, \quad c_i \in \{0, 1\} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

由于最终参与 TDOA 定位的簇通常有多个 ($M \geq 1$),则这些簇的 TDOA 定位结果还能够且应该在传感器网络 Sink 节点(汇聚节点,本文场景中,可通过车载或者无人机载方式移动)处做相应的处理,以进一步提高估计精度,该处理方法用公式表述为式(11)中

$F(\cdot)$ 。 $F(\cdot)$ 在本文中为按这些簇在目标辐射源位置处一点的 TDOA 定位估计标准差的倒数为权值做加权平均,得最终定位结果为:

$$\hat{x}_0 = \sum_{i=1}^M \hat{x}_{0,i} \cdot (c \delta_{T,i} \cdot G_i(1,1)^{-1})$$

$$\hat{y}_0 = \sum_{i=1}^M \hat{y}_{0,i} \cdot (c \delta_{T,i} \cdot G_i(2,2)^{-1}) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (13)$$

目前,在基于无线传感器网络的各种联合定位机制中,关于 AOA/TDOA^[18]和 TDOA/FDOA^{[5][6][7]}联合定位的研究较多,关于 TDOA/RSSI^[19]联合定位的研究较少。RSSI 定位法^[9]中的观测量 RSSI 是一个容易测量的指标;此外, RSSI 定位方法在近距离定位中有着较好的性能,对节点间的时间同步要求较低,但对噪声比较敏感且远距离定位精度较差^[19];TDOA 机制能提供较高的定位精度但需要在节点间传递同步接收的辐射源信号以估计信号到达时延差。根据两种定位机制的特点,本文以 RSSI 定位方法做第一轮粗略定位,簇内成员节点向簇首传递的 RSSI 观测值仅占约 1 字节左右的数据量,远小于文献[4]设计的第一轮 TDOA 粗定位所传递的 256 个信号样值;第二轮由经过式(12)选取的部分簇参与最终的 TDOA 定位,并对各簇定位结果按式(13)进行加权平均。

将本文 RSSI/TDOA 两轮定位流程总结如下:

- step1、用网内所有簇以 RSSI 方法对目标辐射源位置做粗估计。各簇内节点(i, j)将 RSSI 观测值发送至簇首($i, 1$),由簇首完成 RSSI 定位解算,并将定位结果传递至汇聚 Sink 节点,做进一步融合处理;
- step2、Sink 节点将第一步获得的目标辐射源位置粗估计结果分发至全网所有簇首,各簇计算其在该位置处一点的 GDOP 值,并将此 GDOP 值回传给 Sink 节点; Sink 节点根据最终的定位精度要求和网内数据传输能力,按照式(12),确定最终并通知参加 TDOA 定位的簇;
- step3、选中参与第二轮 TDOA 定位的簇,首先由簇首在簇内广播其采集到的待定位信号样值;然后,簇成员利用自身和簇首采集的待定位信号样值估计到达时间差,并回传给簇首;
- step4、由簇首做定位解算,并将定位结果发送至 Sink 节点,并在 Sink 节点用式(13)获得最终的定位结果。

两轮定位流程如图 8 所示,图中标有 1-4 数字标号的带箭头的连线对应定位流程中四个步骤涉及的数据交互关系。

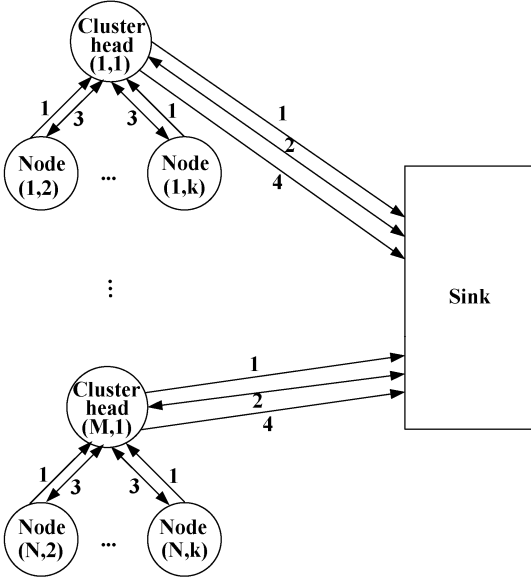


图8 RSSI/TDOA 联合定位流程

Fig. 8 RSSI/TDOA hybrid location scheme

4 仿真分析

4.1 新方法时延、能耗分析

与不进行簇选择的定位方法相比,本文设计的定位流程在簇选择阶段产生了额外的时延。这部分时延主要由各簇 GDOP 的计算时延、上传 GDOP 值以及汇聚节点下达各簇是否参与 TDOA 定位的信息所需的时延构成。其中, GDOP 的计算时延和具体算法以及器件选择有关,虽然从公式(5)、(6)来看, GDOP 的计算涉及矩阵的转置和求逆,但已有较多文献研究了 GDOP 的快速算法,如文献^[20]的提出的算法计算含 4 个定位节点的 GDOP,只需要 40 次乘法和 34 次加法即可完成;而簇选择过程涉及的数据交互的数据(GDOP 值、簇选择信息)很小,一般小于一个分组的长度。总的来说,簇选择过程带来的额外的时延十分有限。

援引 LEACH^[11]路由算法使用的能量消耗公式即一阶无线电模型(First Order Radio Model)分析本文设计定位方法的能耗。该模型在距离 d 上发送 L 比特(一个分组的长度)数据时消耗的能量为:

$$E_{TX}(L, d) = \begin{cases} L \cdot E_{elec} + L \cdot \varepsilon_{fs} \cdot d^2 & \text{if } d \leq d_0 \\ L \cdot E_{elec} + L \cdot \varepsilon_{mp} \cdot d^4 & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (14)$$

E_{elec} 是发射电路或者接收电路每发送或接受 1 比特信息所

消耗的能量, ε_{fs} 和 ε_{mp} 取决于信号放大器模型。在 $d = d_0$ 时, 上式等式右边上、下两部分相等, 从而有 $d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}}$ 。接收 L 比特数据要消耗的能量为: $E_{RX} = L \cdot E_{elec}$ 。

在第一轮 RSSI 定位, 含 K 个节点的簇, 簇首的能量消耗可表示为:

$$E_{CH_R} = (K-1) \cdot E_{RX} + E_{chan} + E_{TX} \quad (15)$$

(15) 式中等号右边加号相隔的三部分, 分别代表簇首接收簇内 $K-1$ 个簇成员发送的 RSSI 值、做 chan 式定位解算、发送本簇 RSSI 定位结果至汇聚节点所需的能耗;

RSSI 定位过程中簇成员的能耗公式可表示为:

$$E_{nonCH_R} = E_{RX} + E_{TX} \quad (16)$$

(16) 式中等号右边加号相隔的两部分, 分别代表非簇首节点采集 RSSI 值、并转发给本簇簇首节点的能耗;

在第二轮 TDOA 定位, 在簇选择过程中簇首的能量消耗可用以表示为:

$$E_{CH_selection} = E_{RX} + E_{GDOP} + E_{TX} \quad (17)$$

(17) 式中等号右边加号相隔的三部分, 分别代表簇首接收汇聚节点下发的目标辐射源位置粗估计值、求解本簇 GDOP 值、发送本簇 GDOP 值至汇聚节点所消耗的能量;

被选中参与 TDOA 定位的簇其簇首能耗为:

$$E_{CH_T} = m \cdot E_{TX} + K \cdot E_{RX} + E_{chan} + E_{TX} \quad (18)$$

(18) 式中等号右边加号相隔的四部分, 分别代表簇首在群内广播 $m \cdot L$ 个比特的样值数据、接收 $K-1$ 个簇成员发送的到达时差估计值和汇聚节点通知该簇参与 TDOA 定位通知信息、做 chan 式定位解算、发送本簇 TDOA 定位结果至汇聚节点所需的能耗;

TDOA 定位过程中簇成员的能耗公式可表示为:

$$E_{nonCH_T} = m \cdot E_{RX} + E_{TDOA} + E_{TX} \quad (19)$$

(19) 式中等号右边以加号相隔的三部分, 分别代表非簇首节点采集待定位辐射源信号样值、做到达时差估计、并发送时差估计值给本簇簇首节点的能耗;

对各种参数取典型值, $E_{elec} = 50\text{nJ}$, $\varepsilon_{mp} = 0.0013\text{pJ/bit} \cdot \text{m}^4$, L 取一个分组的长度为 128bit, 由于计算能耗与器件选取有关, 据本文 2.1 节的分析, 设 $E_{TDOA} = 50\text{nJ}$, $E_{GDOP} \approx E_{chan} = 5\text{nJ}$, 在假设节点间均匀分布的条件下, $d \approx 1581\text{m}$, TDOA 定位中采集的样点数为 1024 个, 每样值 12 比特编码, 代入(14)~(19)式。

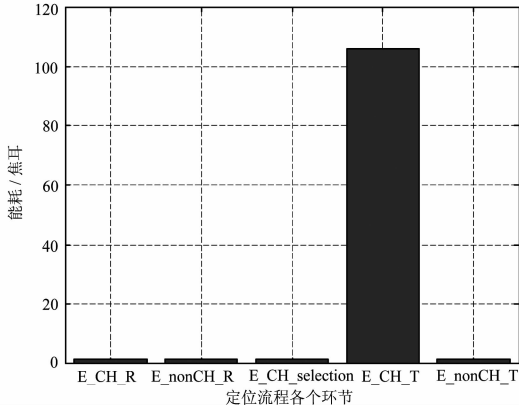


图9 联合定位流程各个环节的能耗

Fig. 9 The energy consumption during RSSI/TDOA hybrid location scheme

同文献^[11]的分析一致,不考虑汇聚节点的能耗,那么,本文设计的定位方法实现一次定位,需要的总的能耗为:

$$E_1 = N \cdot E_{CH_R} + n \cdot E_{nonCH_R} + N \cdot E_{CH_{selection}} + M \cdot E_{CH_T} + M \cdot K \cdot E_{nonCH_T} \quad (20)$$

若不进行簇选择,使用全部的簇进行 TDOA 定位,此时的能耗为:

$$E_0 = N \cdot E_{CH_R} + n \cdot E_{nonCH_R} + N \cdot E_{CH_T} + n \cdot E_{nonCH_T} \quad (21)$$

(20)、(21)两式做比,代入典型值得:

$$\frac{E_1}{E_0} \approx \frac{M}{N} \quad (22)$$

文献^[11]指出,在传感器网络中,执行 3000 条指令的能耗和在 100m 的距离上无线传输 1bit 数据的能耗相当,而在本文的场景中,由于节点间的距离较远、TDOA 定位所需的信号样值数据量大 (12288bit),因此消耗在 TDOA 定位信号样值数据传输阶段的能耗是整个定位流程中的主要能耗 (见图 9)。因此,簇的选取比例就是本文方法与不进行簇选择方法的能耗比,见(22)式。

4.2 定位精度分析

按图 8 所述的流程对图 6 描述的场景做计算机仿真。分别以(1)随机选择;(2)按信噪比选择;(3)本文方法,确定参与第二轮 TDOA 定位的簇,对所得最终定位结果的标准差进行对比。各个节点处的接收信噪比按该节点与目标辐射源之间距离在 10-15dB 范围内变动,以广义互相关法^[10]估计达到时间差、用 chan 氏算法^[12]做定位解算。每种簇选择方法做 1000 次蒙特卡洛仿真,求定位结果的归一化标准差。此处定位误差取 x 轴与 y 轴轴向误差之和^[4],归一化标准差中的

“一”是指式(11)中当 $M=N$,即全部 10 个簇都参与 TDOA 定位时的定位结果的标准差。

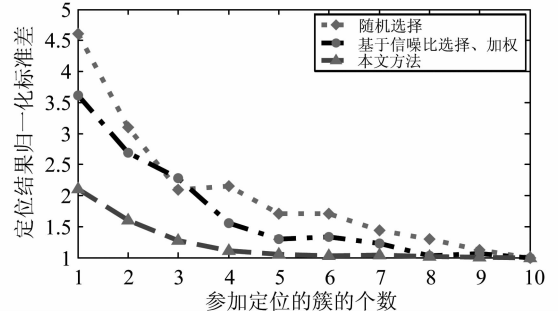


图10 三种簇选择方法的定位结果标准差对比

Fig. 10 Performance of 3 cluster select methods

如图 10,仿真结果说明:通过本文的簇选择方法,(1)可以仅使用 4-5 个簇就能接近或达到使用全部 10 个簇的定位精度;(2)选择参与 TDOA 定位的簇越少,本文提出的方法较之其他两种簇选择方法在最终定位精度上的优势越明显。

这种改善比较容易理解:Caffery 证明了在直达波环境中布站 GDOP 和定位精度的克拉美罗下界(CRLB)是等价的^[14]。简要来说,由(2)式可知布站 GDOP 反映了定位误差是对测量误差的放大。所以,本文提出的方法从全网中选择了布站结构和噪声水平决定其本身具有较高定位精度(具有较低定位估计 CRLB)的簇参与 TDOA 定位,从而以较少的节点接近使用全部节点时的定位精度。

5 结论

本文通过传感器网络节点间协作机制,设计了基于 RSSI 定位方法和 TDOA 定位方法各自特点的两轮联合定位流程,在保留较高定位精度的基础上,去除了冗余节点,有效的减轻了网络负载。今后可结合待定位辐射源信号的时频结构对定位精度的影响因素,在时延差估计阶段即实现一定的数据压缩,进一步减少无源定位任务所产生的网络负载,以推进工程实用。

参考文献

- [1] Ames, Ben DARPA, BAE Systems set to develop unmanned electronic jamming network [J]. Military & Aerospace Electronics, 2003, 14(5):28.
- [2] Yarlagadda. R., Ali. I., Al-Dhahir. N., Hershey. J., GPS GDOP Metric [J]. IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2000, 147(5):259-264.
- [3] Srdjan Ćapkun, Maher Hamdi and Jean-Pierre Hubaux. GPS-free position in mobile ad-hoc networks [C] // Pro-

- ceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Los Alamitos, California; Ralph H. Sprague, 2001. 3481-3490.
- [4] Chen. M. and Fowler. M. L. Geometry-Adaptive Data Compression For TDOA/FDOA Location [C] // in Proc. Proceedings of the IEEE Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Philadelphia, 2005;1069-1072.
- [5] Hu Xi, Chen Mo, and Fowler. M. L. Exploiting Data Compression Methods for Network-Level Management of Multi-Sensor Systems [C] // Mathematics of Data/Image Pattern Recognition, Compression, and Encryption with Applications IX, San Diego, California; Mark S. Schmalz, 2006;6315-6322.
- [6] Fowler M. L., Mo Chen. Data Compression for Multi-Parameter Estimation for Emitter Location [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, January 2010,46(1): 308-322.
- [7] 曲长文,徐征,李炳荣,苏峰. 一种新的基于角度和时差的稳健定位跟踪算法 [J]. 信号处理,2011,27(2): 230-235.
QU Chang-wen, XU Zheng, LI Bing-rong, SU Feng. A Novel Robust Algorithm for Passive Location and Tracking with Angles and Time Difference of Arrival Measurements [J]. Signal Processing, 2011, 27(2): 230-235. (in Chinese)
- [8] N. Ilevanov. Lowest GDOP in 2-D scenarios [J]. IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2000, 147(3):149-155.
- [9] Cesare Apippi, Giovanni, Wireless Sensor Networks and Radio Localization; a Metrological Analysis of the MIC2 received signal strength indicator [C] // 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'04). Washington, DC, USA; Sanjay Jha, 2004; 579-582.
- [10] 胡来招. 无源定位 [M]. 北京:国防工业出版社,2004: 165-174.
Hu lai Zhao. Passive Locating [M]. Bei Jing: National Defence Industrial Press, 2004;165-174. (in Chinese)
- [11] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002,1(4):660-670.
- [12] Y. T. Chan, K. C. Ho. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994,42(8):1905-1915.
- [13] Lee, H. B. A Novel Procedure for Assessing the Accuracy of Hyperbolic Multilateration Systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems, 1975, 11(1):2-15.
- [14] Caffery J, Abel J. GDOP and the Cramer-Rao Bound [C] // in Proc. IEEE Position Location and Navigation Symposium. Las Vegas, Nevada. 1994,663-668.
- [15] Jwo. D. J. and Lai. C. C. Neural Network-based GPS GDOP Approximation and Classification [J]. International Journal of GPS solutions, 2007, 11(1):51-60.
- [16] Lin-Chih Chu, Po-Hsuan Tseng, and Kai-Ten Feng. GDOP-Assisted Location Estimation Algorithms in Wireless Location Systems [C] // IEEE Global Telecommunications Conference. New Orleans, Louisiana. 2008. 1-5.
- [17] Krzysztof Bronk, Jacek Stefanski, Bad Geometry Influence on Positioning Accuracy in Wireless Networks [C] // The International Conference on "Computer as a Tool" Warsaw, 2007;9-12.
- [18] Broumandan. A., Lin. T., Nielsen. J., Lachapelle. G. Practical Results of Hybrid AOA/TDOA Geo-Location Estimation in CDMA Wireless Networks [C] // IEEE 68th Vehicular Technology Conference. Calgary, Canada, 2008;1-5.
- [19] Catovic. A. and Sahinoglu. Z. The Cramer-Rao bounds of hybrid TOA/RSS and TDOA/RSS location estimation schemes [J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(11):626-628.
- [20] Zhu Jijie. Calculation of geometric dilution of precision [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(3):893-895.

作者简介



李 协 (1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 基于传感器网络的无源定位技术。E-mail: lxie@ yahoo. cn



张效义 (1966-), 男, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向: 通信信号处理、无线传感器网络。



曾 禹 (1978-), 男, 博士研究生, 研究方向: 无线通信技术。