

文章编号: 2095-4980(2013)06-0902-10

基于分簇传感网的 RSSD/TDOA 协同定位方法

汪子嘉, 于宏毅, 胡赞鹏

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 针对基于能量有限的分簇传感网实现对非配合辐射源的高精确度无源定位问题, 提出了一种适用于传感网的接收信号强度差(RSSD)定位方法, 并在其相关性能分析基础上提出了以 RSSD 定位为辅、到达时间差(TDOA)定位为主的两轮协同定位方案, 即以 RSSD 定位结果作为目标位置初估计, 并根据各簇在该初估计位置处的 TDOA 定位 CRB, 选择部分预期定位精确度较高的簇参与进一步的 TDOA 定位, 最后通过对这些簇定位结果的加权平均得到最终的目标位置估计。仿真结果表明, 相比基于 GDOP 的簇选择标准和定位融合方法, 提出的改进措施提高了定位精确度, 而 RSSD/TDOA 协同定位方案在保证较高定位精确度的同时, 有效地减轻了网络负载, 延长了网络生命周期, 具有较好的工程应用前景。

关键词: 无源定位; 接收信号强度差; 到达时间差; 克拉美罗界

中图分类号: TN97

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201306.0902

RSSD/TDOA cooperative location based on clustering sensor network

WANG Zi-jia, YU Hong-yi, HU Yun-peng

(School of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: A kind of RSSD(Received Signal Strength Difference) location method is proposed aiming at locating the uncooperative radiation source passively with high accuracy based on energy limited clustering sensor network. Two rounds cooperative location scheme relying on TDOA(Time Difference Of Arrival) location is proposed, in which RSSD is subsidiary and TDOA location is the main method. The preliminary estimation of target position is made by RSSD location method; then some clusters are selected with high expected accuracy to make further locating according to the CRB(Cramer-Rao Bound) of TDOA. Final estimation of target position is made by weighted averaging of these TDOA locating results. Simulation results show that, the proposed modified measures can improve the locating accuracy compared with clusters selection rule and locations fusion method based on GDOP(Geometry Dilution of Precision); and RSSD/TDOA cooperative location scheme can alleviate network loading effectively, extend network lifecycle, and achieve high accuracy of locating, therefore it has good application prospects in engineering practice.

Key words: passive location; Received Signal Strength Difference; Time Difference Of Arrival; Cramer-Rao Bound

无源定位在社会、军事等众多领域有着广泛应用^[1], 而基于无线传感网的无源定位成为近年来国内外的研究热点^[2], 如美国国防高级研究规划局研制的“狼群”系统具有对非配合电磁信号辐射源的定位功能^[3]。基于无线传感网实现无源定位理论上可以充分发挥分布式协同定位的优势, 利用节点的冗余尽可能地提高定位的精确度。基于信号到达时间差(TDOA)的定位机制具有较高的定位精确度, 被广泛应用于各种传统的定位系统中, 然而 TDOA 定位机制要求定位系统的各个协作单位之间必须共享接收信号的数据, 这样必然会带来较大的能耗和时延。无线传感网的传感器节点具有十分有限的能量供应和处理能力, 同时又面临执行多任务的要求, 因此, 不能盲目一味地追求利用尽可能多的节点来改善定位精确度。文献[4-5]在节点严格两两成对的场景设置下, 提出了基于 TDOA 的两轮定位方案, 即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位置估计的费舍尔信息(Fisher Information, FI)的大小, 选择半数节点对参与最终的精细定位, 从而逼近使用全部节点对的定位

收稿日期: 2012-10-24; 修回日期: 2012-11-01

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03006-002)

精确度,同时有效延长网络生命周期。在实际中,基于分簇结构的无线传感网比较常见,并且也更容易实现分布式协同定位。文献[6]提出了基于分簇结构无线传感网的两轮定位方案,即以簇为基本定位单元,讨论了最优簇规模的问题,并提出了基于几何精确度稀释因子(Geometry Dilution Of Precision, GDOP)的簇选择标准和定位融合方法。

在以上的两轮定位方案中,第一轮 TDOA 粗定位所需交互的数据量依然较大,而对接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)的测量不会增加系统的额外负担,同时在节点间传输 RSS 测量值的能量和时间开销远小于传输信号数据,但在非配合条件下由于参考节点信息的缺失导致无法应用现有的 RSS 定位方法对辐射源进行定位。另外,各簇进行第二轮 TDOA 精细定位的结果优劣应由具体算法的性能而不是简单的 GDOP 来反映。

本文首先推导利用接收信号强度差(RSSD)进行定位的克拉美罗界(CRB),并在相关分析比较基础上,提出以 RSSD 定位机制为辅、TDOA 定位机制为主的两轮协同定位方案,其次给出 RSSD 定位的一种最小二乘算法,然后根据 Chan 算法的性能特点提出了改进的基于 CRB 的簇选择标准,最后给出了基于分簇传感网的 RSSD/TDOA 协同定位流程。仿真结果表明,改进的簇选择标准和定位融合方法提高了定位精确度,同时提出的 RSSD/TDOA 协同定位方案更加显著地延长网络生命周期。

1 RSSD 定位机制的性能分析

1.1 RSSD 定位机制的 CRB 推导

RSS 是一个容易测量和传输的参数,不会增加系统的额外负担,适用于节点资源、能力十分有限的无线传感器网络。尽管在许多实际环境中,电波传播路径损耗模型比较复杂,但对于距离辐射源较近的自由空间和全向天线的假设,经典的对数模型^[7]是适用的,表达式如下:

$$P(d) = P_0 - 10n_p \lg(d/d_0) + v \quad (1)$$

式中: $P(d)$ 为距离辐射源 d 处的 RSS (dB), P_0 为参考距离 d_0 处的 RSS, n_p 为路径损耗因子,根据经验对其取值,一般有 $2 \leq n_p \leq 4$, v 为 RSS 的测量误差,服从零均值高斯分布。在非配合条件下,参考节点信息的缺失,导致不能直接利用 RSS 测量值对辐射源进行定位,然而可以借鉴 TOA 定位机制转化为 TDOA 定位机制的思想,将不同节点的 RSS 测量值转化为其差值,从而消除 P_0 和 d_0 的影响进行定位,将其称为 RSSD 定位机制。

假设 RSS 的测量误差 v 服从方差为 δ_R^2 的零均值高斯分布,路径损耗因子 n_p 已知,共有 m 个节点参与定位, (x_i, y_i) 为第 i 个节点的坐标, P_i 为第 i 个节点的 RSS 观测量,每个节点的坐标精确已知。结合式(1)得到新的 RSSD 定位机制 $m-1$ 维观测量向量 $\mathbf{P} = [P_{2,1}, P_{3,1}, \dots, P_{m,1}]^T$, 其中, $P_{i,1} = P_i - P_1$ ($i=2,3,\dots,m$)。设待定位辐射源的真实位置为 $\boldsymbol{\theta} = [x_0, y_0]^T$, 即为待估计向量。由各节点的 RSS 观测量相互独立可知 $\mathbf{P}$ 为 $m-1$ 维高斯随机变量,并有 $m-1$ 维均值向量:

$$\boldsymbol{\mu}_R = E\{\mathbf{P}\} = [10n_p \lg(d_1/d_2), 10n_p \lg(d_1/d_3), \dots, 10n_p \lg(d_1/d_m)]^T \text{ 和协方差矩阵: } \mathbf{Q}_R = \delta_R^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 2 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 2 \end{bmatrix}_{(m-1) \times (m-1)},$$

其中 $d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$ ($i=1,2,\dots,m$), 于是可得到 $\mathbf{P}$ 的概率密度函数如下:

$$f(\mathbf{p}; \boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{(2\pi)^{(m-1)/2} (\det \mathbf{Q}_R)^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{p} - \boldsymbol{\mu}_R)^T \mathbf{Q}_R^{-1} (\mathbf{p} - \boldsymbol{\mu}_R) \right\} \quad (2)$$

于是, $\boldsymbol{\theta}$ 的 Fisher 信息矩阵为:

$$\mathbf{I}_R(\boldsymbol{\theta}) = -E \left\{ \nabla_{\boldsymbol{\theta}} \left(\nabla_{\boldsymbol{\theta}} \ln(f(\mathbf{p}; \boldsymbol{\theta})) \right) \right\} \quad (3)$$

由链式法则可得:

$$\mathbf{I}_R(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{H}_R \mathbf{Q}_R^{-1} \mathbf{H}_R^T \quad (4)$$

$$\text{其中, } \mathbf{H}_R = \frac{10n_p}{\ln 10} \begin{bmatrix} \frac{x_2 - x_0}{d_2^2} - \frac{x_1 - x_0}{d_1^2} & \cdots & \frac{x_m - x_0}{d_m^2} - \frac{x_1 - x_0}{d_1^2} \\ \frac{y_2 - y_0}{d_2^2} - \frac{y_1 - y_0}{d_1^2} & \cdots & \frac{y_m - y_0}{d_m^2} - \frac{y_1 - y_0}{d_1^2} \end{bmatrix}_{2 \times (m-1)}。$$

最终, 得到 RSSD 定位机制下对待定位辐射源的位置估计 $\hat{\theta}$ 的 CRB 为:

$$\sigma_{\text{CRB}_{\text{RSSD}}} = \sqrt{\text{tr}\{\mathbf{I}_{\mathbf{R}}(\theta)^{-1}\}} \quad (5)$$

1.2 RSSD 定位机制的 CRB 仿真与分析

首先对 RSS 定位机制^[8]和 RSSD 定位机制的 CRB 进行比较分析。根据无线传感网分簇结构的基本特点, 设传感器节点坐标分别为(0,0),(200,0),(0,200),(-200,0),(0,-200), 单位为 m, 取 $n_p/\delta_R=0.83$, 在节点所围区域 RSS 定位机制和 RSSD 定位机制的 CRB 分别如下图所示。

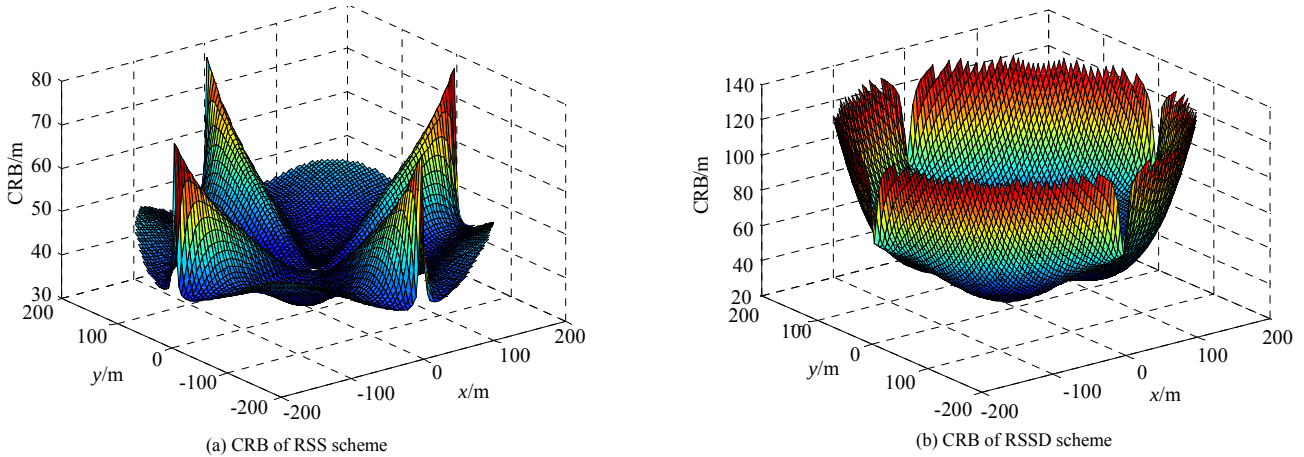


Fig.1 CRB of RSS scheme and RSSD scheme
图 1 RSS 定位机制与 RSSD 定位机制的 CRB

由图 1 可以看出, RSSD 定位机制与 RSS 定位机制的 CRB 存在明显差异, 且 RSSD 定位机制的 CRB 要高于 RSS 定位机制, 即 RSSD 定位机制的性能要略差于 RSS 定位机制, 这是因为前者相比后者缺少了参考节点信息。

下面对 RSSD 定位机制和 TDOA 定位机制^[8]的 CRB 进行比较分析。节点布局不变, 取 $n_p/\delta_R=0.83$, TDOA 测量误差的标准差 $\delta_T=10\text{ ns}$, 在节点所围区域 RSSD 定位机制与 TDOA 定位机制的 CRB 分别如下图所示。

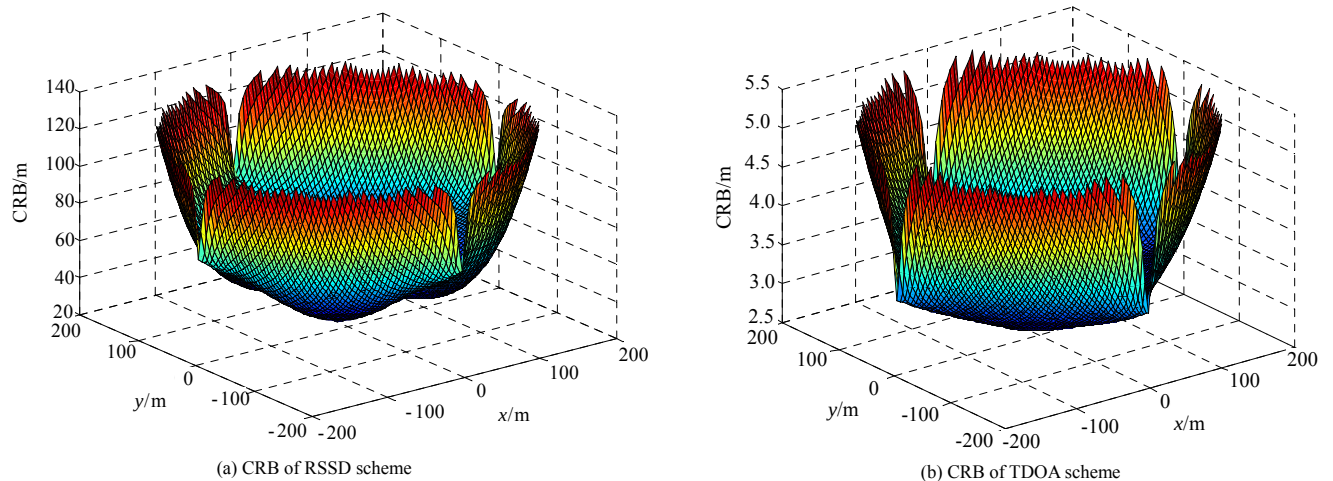


Fig.2 CRB of RSSD scheme and TDOA scheme
图 2 RSSD 定位机制与 TDOA 定位机制的 CRB

由图 2 可以看出, RSSD 定位机制的 CRB 明显高于 TDOA 定位机制, 即 RSSD 定位机制的性能远差于 TDOA 定位机制, 一是因为 RSS 测量的误差通常较大, 二是 RSSD 定位机制相比 TDOA 定位机制对距离更加敏感。因此, 要获取对非配合辐射源比较准确的位置估计, 采用 TDOA 定位机制是必要的, 而鉴于 RSSD 定位机制的节能、省时和容易实现等优点, 可采用一种以 RSSD 定位机制为辅、TDOA 定位机制为主的两轮协同定位方案。

2 RSSD 定位的一种最小二乘算法

文献[9]在不考虑传感器网络结构的情况下, 提出在全网范围内对 RSS 测量值之差小于一定阈值的传感器节

点进行两两配对,利用各个节点与连线中垂线相交对辐射源进行定位。该方法具有一定的定位精确度,计算复杂度也不高,但对于更加贴近实际的基于分簇结构的无线传感器网络,若将每个簇作为基本定位单元,则无法保证该方法的适用性。因此,需要研究 RSSD 定位的几何原理,从而寻找一种具有普遍适用性的定位算法。

设待定位辐射源坐标为 (x_0, y_0) , 参与定位的某个簇共有 m 个传感器节点, (x_i, y_i) 为第 i 个节点的坐标, (x_1, y_1) 为簇首节点坐标, p_i 为第 i 个节点的 RSS 实际测量值, 令 $p_{i,1} = p_i - p_1$, 在暂不考虑存在测量误差的情况下, 由式(1)可以得到以下关系式:

$$p_{i,1} = 10n_p \lg \left(\frac{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}} \right), i = 2, 3, \dots, m \quad (6)$$

令 $k_i = 10^{\frac{p_{i,1}}{10n_p}}$ ($i = 2, 3, \dots, m$), 式(6)可以转换为以下关系式:

$$(x_0 - \frac{x_1 - k_i^2 x_i}{1 - k_i^2})^2 + (y_0 - \frac{y_1 - k_i^2 y_i}{1 - k_i^2})^2 = \frac{k_i^2 [(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2]}{(1 - k_i^2)^2} \quad i = 2, 3, \dots, m \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 待定位辐射源其实位于由两节点坐标和其接收信号能量差值所确定的圆曲线上, 因此, RSSD 定位从几何原理上可归结为圆交叉定位问题, 即将以上 $m-1$ 个圆方程联立, 求解该非线性超定方程组。

首先对非线性方程组进行线性化处理。将每个圆方程展开并整理得到:

$$\begin{cases} (1 - k_2^2)^2 (x_0^2 + y_0^2) - 2(1 - k_2^2)(x_1 - k_2^2 x_2)x_0 - 2(1 - k_2^2)(y_1 - k_2^2 y_2)y_0 \\ = k_2^2 [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2] - (x_1 - k_2^2 x_2)^2 - (y_1 - k_2^2 y_2)^2 \\ (1 - k_3^2)^2 (x_0^2 + y_0^2) - 2(1 - k_3^2)(x_1 - k_3^2 x_3)x_0 - 2(1 - k_3^2)(y_1 - k_3^2 y_3)y_0 \\ = k_3^2 [(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2] - (x_1 - k_3^2 x_3)^2 - (y_1 - k_3^2 y_3)^2 \\ \vdots \\ (1 - k_m^2)^2 (x_0^2 + y_0^2) - 2(1 - k_m^2)(x_1 - k_m^2 x_m)x_0 - 2(1 - k_m^2)(y_1 - k_m^2 y_m)y_0 \\ = k_m^2 [(x_m - x_1)^2 + (y_m - y_1)^2] - (x_1 - k_m^2 x_m)^2 - (y_1 - k_m^2 y_m)^2 \end{cases} \quad (8)$$

令 $R = x_0^2 + y_0^2$, $a_i = (1 - k_i^2)^2$, $b_i = -2(1 - k_i^2)(x_1 - k_i^2 x_i)$, $c_i = -2(1 - k_i^2)(y_1 - k_i^2 y_i)$,

$d_i = k_i^2 [(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2] - (x_1 - k_i^2 x_i)^2 - (y_1 - k_i^2 y_i)^2$, $i = 2, 3, \dots, m$, 则方程组(8)可简写为:

$$\begin{cases} a_2 R + b_2 x_0 + c_2 y_0 = d_2 \\ a_3 R + b_3 x_0 + c_3 y_0 = d_3 \\ \vdots \\ a_m R + b_m x_0 + c_m y_0 = d_m \end{cases} \quad (9)$$

将 R, x_0, y_0 视为未知量, 则式(9)成为线性方程组。其次, 在实际存在测量误差的情况下, 可采取最小二乘算法对待定位辐射源进行位置估计。

$$\text{设 } \theta = [x_0, y_0]^T, \quad Z = [R, \theta]^T, \quad \text{令: } A = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_m & b_m & c_m \end{bmatrix}_{(m-1) \times 3} \quad \text{和 } b = [d_2, d_3, \dots, d_m]^T, \quad \text{由式(9)得到:}$$

$$\hat{Z}_{LS} = [\hat{R}, \hat{\theta}]^T = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (10)$$

式(10)中的 $\hat{\theta}$ 即为 RSSD 定位机制下待定位辐射源位置的最小二乘估计。

另外, 由式(9)也可以看出, 定位簇的簇规模应为 4 个以上节点, 否则将可能出现定位模糊。

3 改进的簇选择标准

基于分簇结构无线传感网实现对电磁信号辐射源的 TDOA 定位, 理论上可以充分发挥各簇分布式协同定位的优势, 利用尽可能多的定位结果进行融合从而提高定位精确度, 然而实际中, 若每进行一次全网范围的 TDOA

定位,必将带来巨大的能量消耗,这样会使得能量供应十分有限的无线传感网的网络生命周期急剧缩短。因此,在动态变化的定位任务下,如何去除参与定位的冗余节点,在定位精确度和网络生命周期之间取得较好折衷,成为一个关键问题。文献[6]在不考虑具体 TDOA 定位解算算法的情况下,提出了基于 GDOP 的簇选择标准, GDOP 反映了辐射源与传感器节点之间的几何关系对定位精确度的影响程度,而实际中若采取某一种具体 TDOA 定位解算算法,定位精确度应由该算法性能决定,而算法性能与 GDOP 之间一般会存在较大差异。

Chan 算法是一种高效的 TDOA 定位算法,计算量较小,结果具有解析表达式,因此该算法被广泛地应用于各种 TDOA 定位系统中。文献[10]给出了 Chan 算法的性能分析,根据其给出的坐标估计协方差矩阵可以计算利用 Chan 算法进行定位的均方根误差,而实际该计算过程比较冗长。在 TDOA 观测量误差较小且服从零均值高斯分布的情况下,Chan 算法的均方根误差能有效逼近 CRB,而 TDOA 定位机制的 CRB 计算比较简便,因此,可以用 TDOA 定位机制的 CRB 近似 Chan 算法的定位精确度。

假设应用场景如图 3 所示,在 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 的二维平面内随机布设 50 个传感器节点,全网严格时间同步,节点自身位置精确已知。按照 LEACH 路由协议^[11],由 4~6 个节点构成一个簇,簇间无共用节点,簇内通信一跳可达。目标辐射源信号按直达波传播。

设全网除汇聚节点外,共有 N 个簇,第 i 个簇含 K_i 个节点 ($4 \leq K_i \leq 6$),第 j 个节点的坐标为 $(x_{i,j}, y_{i,j})$, $(x_{i,1}, y_{i,1})$ 为簇首节点坐标,辐射源真实位置为 $\theta = [x_0, y_0]^T$ 。在 TDOA 定位机制下,第 i 个簇对辐射源进行位置估计的 CRB:

$$\sigma_{CRB_i} = \sqrt{\text{tr}\{I_i(\theta)^{-1}\}} = \sqrt{A_i(1,1) + A_i(2,2)} \quad (11)$$

式(11)中的 $I_i(\theta) = A_i^{-1}$ 为第 i 个簇关于 θ 的 Fisher 信息矩阵,满足下式:

$$I_i(\theta) = H_i Q_i^{-1} H_i^T \quad (12)$$

$$\text{式中: } H_i = \frac{1}{c} \begin{bmatrix} \frac{x_{i,2}-x_0}{d_{i,2}} - \frac{x_{i,1}-x_0}{d_{i,1}} & \dots & \frac{x_{i,K_i}-x_0}{d_{i,K_i}} - \frac{x_{i,1}-x_0}{d_{i,1}} \\ \frac{y_{i,2}-y_0}{d_{i,2}} - \frac{y_{i,1}-y_0}{d_{i,1}} & \dots & \frac{y_{i,K_i}-y_0}{d_{i,K_i}} - \frac{y_{i,1}-y_0}{d_{i,1}} \end{bmatrix}_{2 \times (K_i-1)}, \quad d_{i,j} = \sqrt{(x_{i,j}-x_0)^2 + (y_{i,j}-y_0)^2} \quad (j=1,2,\dots,K_i),$$

$$Q_i = \delta_i^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 2 \end{bmatrix}_{(K_i-1) \times (K_i-1)}, \quad \delta_i^2 \text{ 为第 } i \text{ 个簇的 TDOA 测量误差方差,实际中可用时差估计的 CRB}^{[12]} \text{ 进行近似。}$$

由于在本文场景中设置传感器节点为随机布设,因此各簇的拓扑结构会有所不同,同时与同一目标辐射源的相对位置关系也各有不同,并且由于各簇的信噪比不同等因素,各簇的 TDOA 测量误差方差也会存在较大差异。综合以上这些因素,各簇对同一目标辐射源进行位置估计的 CRB 会存在明显差异。以图 3 中的带数字标号的 4 个虚线圈内的簇为例,设 $\delta_1 = 5\text{ ns}$, $\delta_2 = 45\text{ ns}$, $\delta_3 = 50\text{ ns}$, $\delta_4 = 5\text{ ns}$, 它们在传感网覆盖范围内的 CRB 等高线图分别如图 4 所示。以图 4 中坐标为 $(5\ 000, 5\ 000)$ 的目标辐射源为例,对 TDOA 定位机制下的以下 3 种结果进行比较:一是以上 4 个簇对该辐射源利用 Chan 算法进行位置估计的均方根误差;二是以上 4 个簇对该辐射源进行位置估计的 CRB;三是以上 4 个簇在该辐射源位置处的 GDOP。计算结果如表 1 所示。

如表 1,不同簇在同一目标辐射源处利用 Chan 算法进行位置估计的预期精确度存在较大差异,同时,CRB 能有效近似均方根误差,准确地反映这一差异,而 GDOP 无法做到。在 TDOA 定位过程中,通过在全网范围选择少量预期定位精确度较高的簇,实现对参与定位的冗余节点的有效去除,既能保证最终定位性能基本不变,同时又能大幅度减少网络能耗,有效延长网络生命周期。因此,基于 CRB 的簇选择标准比较合理。

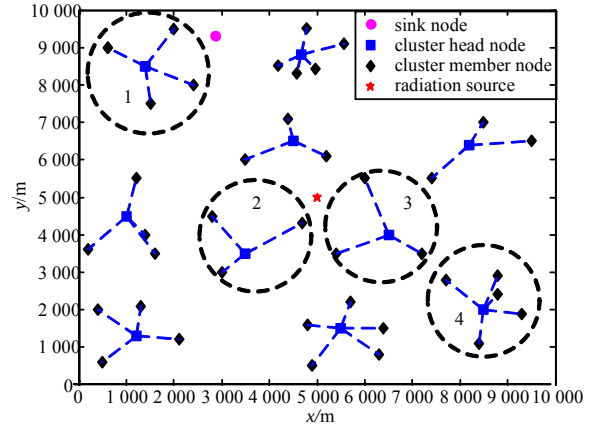


Fig.3 Random deployed 50 sensor nodes in 2D scenario covering a $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ area

图3 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 的二维平面内随机布设的 50 个传感器节点

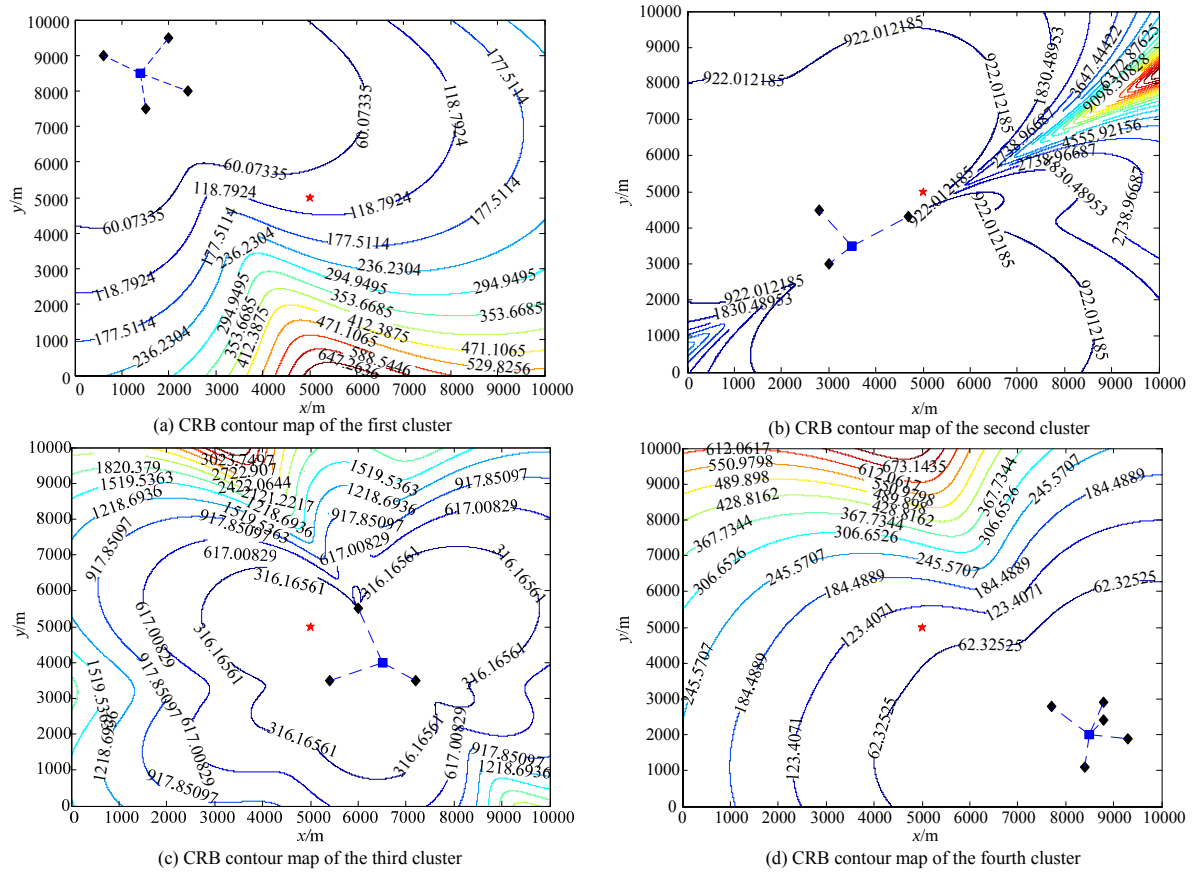


Fig.4 CRB contour maps of different clusters
图4 不同簇的CRB等高线图

4 协同定位流程

根据上节的分析,设决策变量 c_i ($i=1,2,\dots,N$):

$c_i = \begin{cases} 0, & \text{当第} i \text{个簇被去除时} \\ 1, & \text{当第} i \text{个簇被选择时} \end{cases}$, 簇选择问题可以被描述为 0-1 整数规划问题:

$$\min \left(\sum_{i=1}^N c_i \sqrt{\text{var } \hat{x}_{0,i} + \text{var } \hat{y}_{0,i}} \right), \text{ s.t. } \sum_{i=1}^N c_i = M (M \leq N), c_i = 0 \text{ 或 } 1 (i=1,2,\dots,N) \quad (13)$$

式中: N 为网络总的簇个数, M 为预选择的簇个数, $(\hat{x}_{0,i}, \hat{y}_{0,i})$ 为第 i 个簇对坐标为 (x_0, y_0) 的目标辐射源的 TDOA 定位估计。根据基于 CRB 的簇选择标准, 式(13)可等价表示为:

$$\min \left(\sum_{i=1}^N c_i \sigma_{\text{CRB}_i} \right), \text{ s.t. } \sum_{i=1}^N c_i = M (M \leq N), c_i = 0 \text{ 或 } 1 (i=1,2,\dots,N) \quad (14)$$

其中, σ_{CRB_i} 为第 i 个簇对目标辐射源的 TDOA 定位估计 CRB。

为保证定位性能,根据信息融合的思想,可以选择多个簇参与 TDOA 定位,最终在汇聚节点对多个簇不同的 TDOA 定位结果进行融合处理,从而进一步提高定位精确度。本文根据加权平均的思想,得到对目标辐射源如下的最终位置估计:

$$\hat{x}_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \hat{x}_{0,i} (\sqrt{A_i(1,1)})^{-1}}{\sum_{i=1}^M (\sqrt{A_i(1,1)})^{-1}}, \hat{y}_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \hat{y}_{0,i} (\sqrt{A_i(2,2)})^{-1}}{\sum_{i=1}^M (\sqrt{A_i(2,2)})^{-1}}, i=1,2,\dots,M \quad (15)$$

其中, A_i 为第 i 个簇关于 (x_0, y_0) 的 Fisher 信息矩阵的逆,即 $A_i(1,1)$ 为第 i 个簇对 $\hat{x}_0$ 进行估计的方差, $A_i(2,2)$ 为第 i 个簇对 $\hat{y}_0$ 进行估计的方差。

表1 不同簇在给定目标位置处的定位精确度

sequence of cluster	RMSE of locating by Chan algorithm	CRB	GDOP
1	91.957 6	91.061 1	60.707 4
2	132.847 1	131.694 2	9.755 1
3	47.105 8	45.029 7	3.002 1
4	93.648 3	92.709 2	61.806 2

在进行簇选择和定位融合之前,需要估算各簇对目标辐射源进行 TDOA 定位估计的 CRB,而这又需要事先知道目标辐射源的大概位置。根据第 1 节的分析,本文提出采用 RSSD 定位方法对目标辐射源做出位置初估计。综上, RSSD/TDOA 协同定位流程总结如下:

步骤 1: 全网范围采用 RSSD 定位方法对目标辐射源进行第一轮粗略定位。各簇成员节点将 RSS 测量值发送给簇首节点,由簇首节点按照第 2 节给出的 RSSD 定位最小二乘算法对目标辐射源做出位置估计,并将结果发送给汇聚节点。汇聚节点对各簇的 RSSD 定位结果进行简单平均,得到对目标辐射源的位置初估计。

步骤 2: 汇聚节点将第一步中的位置初估计结果发送给各簇簇首节点,各簇簇首节点根据该结果估算本簇的 TDOA 定位 CRB,并将结果回传给汇聚节点。汇聚节点根据最终定位精确度要求和网络能量供应状况,按照式(14)确定参与第二轮精细定位的簇,并予以通知。

步骤 3: 被选中的簇采用 TDOA 定位方法对目标辐射源进行第二轮精细定位。各簇簇首节点将接收的辐射源信号数据在簇内广播给成员节点,由各成员节点分别对信号到达时差做出估计,并将结果回传给簇首节点。各簇首节点按照 Chan 算法对目标辐射源做出位置估计,并将结果发送给汇聚节点。汇聚节点按照式(15)得到对目标辐射源的最终位置估计。协同定位流程如图 5 所示,图中标有数字的带箭头的线条示意协同定位流程中对应步骤所涉及的数据交互过程。

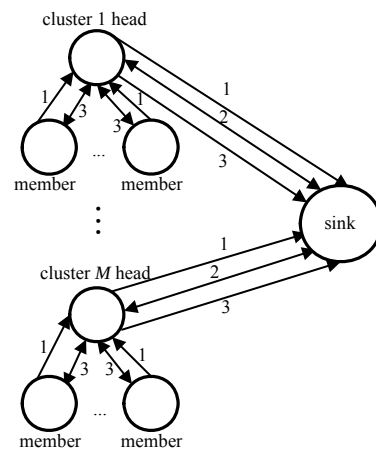


Fig.5 Cooperative location procedure
图 5 协同定位流程

5 仿真分析

5.1 RSSD 定位最小二乘法的性能仿真分析

仿真软件环境为 Windows XP 系统,硬件配置为 Pentium 2.7 GHz $\times$ 2、内存 2G 的联想台式机。设单个簇的簇首节点坐标为(0,0),成员节点坐标分别为(200,0),(0,200),(-200,0),(0,-200),目标辐射源真实坐标为(40,50),单位为 m,在距离目标辐射源 1 m 处的接收信号强度为 40 dB,取 $n_p=3$,各节点的 RSS 测量值符合式(1)所示的对数模型。采用本文提出的最小二乘法对目标辐射源进行 RSSD 定位, δ_R 从 1 dB 变化至 10 dB,在 Matlab 2009 环境下对每种情况进行 2 000 次蒙特卡洛仿真,取定位均方根误差为估计位置与真实位置之间的平均距离,实验结果如图 6 所示。

由图 6 可知,本文提出的 RSSD 定位最小二乘法在 RSS 测量误差较小的情况下具有较高的定位精确度,在上文给出的仿真条件下,当 RSS 测量值的标准差小于 6 dB 左右时,定位误差能控制在 100 m 范围以内,而随着 RSS 测量误差的增大,定位精确度下降比较明显。但是,基于无线传感网实现无源定位对能耗和时延都会有所要求,而在两轮协同定位方案中,采用该方法对非配合目标辐射源进行粗略定位,不失为一种有效可行的措施。

5.2 协同定位精确度仿真分析

假设仿真场景如图 3 所示,目标辐射源在网络覆盖范围内随机均匀出现,在距离目标辐射源 1 m 处的接收信号强度为 40 dB,取 $n_p=3$, $c=3 \times 10^8$ m/s,每个簇的 RSS 测量误差标准差在 1 dB ~ 5 dB 之间变化, TDOA 测量误差标准差在 5 ns ~ 50 ns 之间变化,采用本文提出的最小二乘法进行 RSSD 定位解算,采用 Chan 算法进行 TDOA 定位解算,在不同的簇选择个数下分别观察两种情况的定位精确度:一是文献[6]提出的基于 GDOP 进行簇选择和定位融合;二是本文提出的基于 CRB 进行簇选择和定位融合,即利用式(14)、式(15)。对每种簇选择个数进行 2 000 次蒙特卡洛仿真,实验结果如图 7 所示。

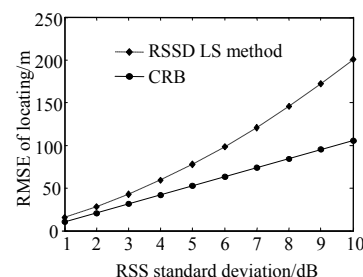


Fig.6 Locating accuracy of RSSD least square method

图 6 RSSD 最小二乘法的定位精确度

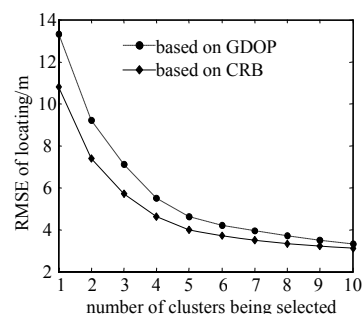


Fig.7 Performance of two methods for clusters selection and locations fusion

图 7 两种簇选择和定位融合方法的性能

由图 7 可知,相比基于 GDOP 的簇选择标准和定位融合方法,本文提出的方法进一步提高了定位精确度,这是因为在采用 Chan 算法进行 TDOA 定位解算的情况下,CRB 能够更加准确地反映各簇的预期定位精确度。另外,仿真结果还表明,当簇选择个数仅为 5 或 6 的时候,就已经接近使用全部 10 个簇的定位精确度,在上文给出的仿真条件下,定位误差能控制在 40 m 范围以内。

5.3 协同定位流程能耗、时延仿真分析

首先引用一阶无线电模型^[11]对协同定位流程的能耗进行分析。根据该模型,在距离 d 上发送 L 比特(即一个分组长度)数据所消耗的能量如下式:

$$E_{TX} = \begin{cases} L \cdot \varepsilon_{el} + L \cdot \varepsilon_{fs} \cdot d^2, & d \leq d_0 \\ L \cdot \varepsilon_{el} + L \cdot \varepsilon_{mp} \cdot d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: ε_{el} 是发射或接收电路每发送或接收 1 bit 数据所消耗的能量; ε_{fs} 和 ε_{mp} 取决于实际信号放大器模型;

$d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}}$ 。接收 L 比特数据所消耗的能量为:

$$E_{RX} = L \cdot \varepsilon_{el} \quad (17)$$

假设发送某个测量值或计算值仅需要使用一个分组,每个簇由 K 个节点组成。在协同定位流程的第 1 步中,各簇成员节点的能耗可表示为:

$$E_{CM_1} = E_{RX} + E_{TX} \quad (18)$$

式(18)等号右边的部分分别代表成员节点测量 RSS 和将 RSS 测量值发送给簇首节点的能耗。簇首节点的能耗可表示为:

$$E_{CH_1} = E_{RX} + (K-1) \cdot E_{RX} + E_{RSSD} + E_{TX} \quad (19)$$

式(19)等号右边的部分分别代表簇首节点自身测量 RSS、接收成员节点的 RSS 测量值、进行 RSSD 定位解算和将定位结果发送给汇聚节点的能耗。

在第 2 步中,各簇簇首节点的能耗可表示为:

$$E_{CH_2} = E_{RX} + E_{CRB} + E_{TX} + E_{RX} \quad (20)$$

式(20)等号右边的部分分别代表簇首节点接收初定位结果、进行 CRB 估算、将 CRB 估算值返回汇聚节点和接收是否参与 TDOA 定位通知的能耗。

在第 3 步中,假设参与 TDOA 定位的节点接收的信号数据长度为 $w \cdot L$ 比特,参与 TDOA 定位的各簇成员节点的能耗可表示为:

$$E_{CM_3} = E_{RX} + w \cdot E_{RX} + w \cdot E_{RX} + E_{TDE} + E_{TX} \quad (21)$$

式(21)等号右边的部分分别代表成员节点接收参与 TDOA 定位通知、自身采集信号数据、接收簇首节点广播的信号数据、进行时差估计和将估计结果发送给簇首节点的能耗。簇首节点的能耗可表示为:

$$E_{CH_3} = E_{TX} + w \cdot E_{RX} + w \cdot E_{TX} + (K-1) \cdot E_{RX} + E_{TDOA} + E_{TX} \quad (22)$$

式(22)等号右边的部分分别代表簇首节点通知本簇成员节点参与 TDOA 定位、采集信号数据、簇内广播信号数据、接收成员节点返回的时差估计结果、进行 TDOA 定位解算和将定位结果发送给汇聚节点的能耗。

假设网络共有 N 个簇,选择参与 TDOA 定位的簇个数为 M 。在不考虑汇聚节点能耗的情况下,按照协同定位流程进行一次定位的网络总能耗为:

$$E = N \cdot (K-1) \cdot E_{CM_1} + N \cdot E_{CH_1} + N \cdot E_{CH_2} + M \cdot (K-1) \cdot E_{CM_3} + M \cdot E_{CH_3} \quad (23)$$

假设仿真场景如图 3 所示,目标辐射源在网络覆盖范围内随机均匀出现,每个簇的 TDOA 测量误差标准差在 5 ns~50 ns 之间变化,取 $L=128$ (即一个分组长度为 128 bit),节点接收目标辐射源信号时共采集 2 048 个样点,对每次采样进行 14 bit 编码。根据参考文献[11,13],取仿真典型值: $\varepsilon_{el}=50$ nJ, $\varepsilon_{fs}=0.13$ pJ/m², $\varepsilon_{mp}=0.0013$ pJ/m⁴, $E_{RSSD} \approx E_{CRB} \approx E_{TDOA} \approx 5$ nJ, $E_{TDE} \approx 50$ nJ。假设传感器节点的电池容量为 12 V,5 000 mAh,分别对以下 3 种定位方案的网络生命周期进行仿真:一是全网单轮 TDOA 定位方案;二是簇选择比为 2:1 的两轮 TDOA 定位方案,同文献[4]将第一轮 TDOA 定位所需的节点间传输信号样点设为 256;三是簇选择比为 2:1 的本文提出的 RSSD/TDOA 协同定位方案。需要说明的是,第二、三种定位方案的簇选择过程均按照式(14)进行。当存活节点少于 4 个时,网络失去定位能力,仿真结束。在时间轴上以完成一次定位为一轮,仿真结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出, RSSD/TDOA 协同定位方案能够显著延长网络生命周期,在上文给出的仿真条件下,网络

生命周期达到了 82 轮,这是因为 TDOA 定位过程中能耗最大的部分是节点间对信号数据的传输,而 RSSD/TDOA 协同定位方案不仅在第二轮精细定位中进行了 2:1 的簇选择,而且在第一轮粗略定位中用 RSSD 定位替代了小数据量的 TDOA 定位,这两点改进明显减少了网络的通信开销。然后对协同定位流程的时延作简要分析。相比全网单轮 TDOA 定位方案, RSSD/TDOA 协同定位方案多出了第一轮 RSSD 定位和簇选择的过程,因此在完成一次定位的时间开销上会有所增加,但由于 RSSD 定位解算和 CRB 估算的计算量都比较小,并且在此期间的网络数据交互量也很小,所以带来的额外时延十分有限。另外,相比两轮 TDOA 定位方案, RSSD/TDOA 协同定位方案在第一轮初定位中所交互的 RSS 测量值远小于 14 bit 编码的 256 个信号样点,因此可以一定程度上减少时间开销。

6 结论

本文在参考节点先验信息未知的条件下提出了 RSSD 定位的概念,给出了一种最小二乘解算方法,并对 RSSD 定位机制做出了性能分析,在此基础上提出了一种基于分簇传感网的 RSSD/TDOA 协同定位方案,其中,给出了基于 CRB 的簇选择标准和定位融合方法。仿真结果表明,改进的簇选择标准和定位融合方法提高了定位精确度, RSSD/TDOA 协同定位方案在保证较高定位精确度的同时,有效地去除了冗余节点,显著地延长了网络生命周期。

参考文献:

- [1] 胡来招. 无源定位[M]. 北京:国防工业出版社, 2004:150–203. (HU Laizhao. Passive Locating[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2004:150–203.)
- [2] 王雪. 无线传感网络测量系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2007:326–360. (WANG Xue. Wireless Sensor Networks Measurement Systems[M]. Beijing:China Machine Press, 2007:326–360.)
- [3] Ames, Ben DARPA. BAE Systems set to develop unmanned electronic jamming network[J]. Military & Aerospace Electronics, 2003,14(5):28.
- [4] Chen Mo, Fowler M L. Geometry-Adaptive Data Compression for TDOA/FDOA Location[C]// Proceedings of the IEEE conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Philadelphia:IEEE, 2005:1069–1072.
- [5] Hu Xi, Chen Mo, 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:[s.n.], 2006:6315–6322.
- [6] 李协, 张效义, 曾禹. 基于分簇结构无线传感器网络的高效无源定位方法[J]. 信号处理, 2012,28(4):587–594. (LI Xie, ZHANG Xiaoyi, ZENG Yu. An efficient passive location method based on clustering structure wireless sensor network[J]. Signal Processing, 2012,28(4):587–594.)
- [7] Li Xinrong. RSS-Based Location Estimation with Unknown Pathloss Model[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006,5(12):3626–3633.
- [8] Amer Catovic, Zafer Sahinoglu. The Cramer–Rao Bounds of Hybrid TOA/RSS and TDOA/RSS Location Estimation Schemes[J]. IEEE Communications Letters, 2004,8(10):626–628.
- [9] 皮兴宇, 于宏毅, 贾广新. 一种用于无线传感器网络的新颖协作定位方法[J]. 计算机工程, 2007,33(14):86–88. (PI Xingyu, YU Hongyi, JIA Guangxin. Novel and Cooperative Localization Method in Wireless Sensor Networks[J]. Computer Engineering, 2007,33(14):86–88.)
- [10] Chan Y T, Ho K C. A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994,42(8):1905–1915.
- [11] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002,1(4):660–670.
- [12] Benjamin Friedlander. On the Cramer–Rao Bound for Time Delay and Doppler Estimation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1984,30(3):575–580.
- [13] Zhu Jijie. Calculation of geometric dilution of precision[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992,28(3):893–895.

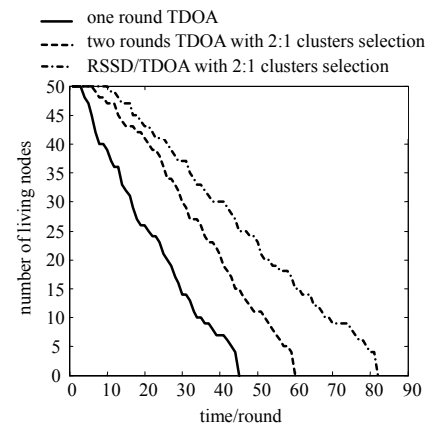


Fig.8 Lifecycle of network for only locating
图8 仅执行定位任务下的网络生命周期