

无线传感器网络的锚节点优化布设算法

汪 晗^{1,2}, 王 坤¹, 路文进³, 汪 磊²

(1. 解放军理工大学 指挥信息系统学院, 南京 210007; 2. 94860 部队, 南京 210018; 3. 94789 部队, 南京 210018)

摘 要: 在无线传感器网络中, 为准确地定位待定位节点, 需要合理地布设锚节点。为此, 通过理论推导出锚节点与待定位节点构成的几何形状对定位精度的影响, 提出区域定位误差均界这一布设性能评价指标。分析锚节点布设质心、几何形状、几何面积对区域定位精度的作用, 据此给出静态锚节点优化布设的启发式算法, 并传统的锚节点搜索布设算法进行比较, 结果表明, 启发式算法与搜索布设算法的定位精度几乎相同, 但计算开销明显降低。

关键词: 无线传感器网络; 锚节点布设; 几何精度因子; 定位精度; 计算复杂度

中文引用格式: 汪 晗, 王 坤, 路文进, 等. 无线传感器网络锚节点优化布设算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(8): 105-111.

英文引用格式: WANG Han, WANG Kun, LU Wenjin, et al. Anchor node optimal deployment algorithm in wireless sensor network[J]. Computer Engineering, 2018, 44(8): 105-111.

Anchor Node Optimal Deployment Algorithm in Wireless Sensor Network

WANG Han^{1,2}, WANG Kun¹, LU Wenjin³, WANG Lei²

(1. College of Command Information System, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. 94860 PLA Troops, Nanjing 210018, China; 3. 94789 PLA Troops, Nanjing 210018, China)

[Abstract] In Wireless Sensor Network (WSN), in order to locate the nodes accurately, it is needed to deploy anchor nodes reasonably. The influence on positioning accuracy of geometry formed by anchor nodes and positioned nodes is derived in theory. This paper proposes the concept of average area localization error bound as the evaluation criterion of placement performance. The effect of deployment centroid, geometry and geometric area on area location accuracy of the anchor node is analyzed. Based on this, a heuristic algorithm for optimal deployment of static anchor nodes is given. Simulation results show that, compared with classical anchor node search deployment algorithm, the localization accuracy is similar while the computation cost of the proposed algorithm is reduced significantly.

[Key words] Wireless Sensor Network (WSN); anchor node deployment; geometric dilution of precision; localization accuracy; computation complexity

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0046523

0 概述

在无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 应用中, 针对微型传感器节点监测、感知和采集的各种环境或对象信息, 只有与特定的节点位置相结合才能为相关应用提供有效的决策支持。无线传感器网络在战场侦查^[1]、环境生态监测^[2-3]、人员跟踪定位^[4]等方面应用广泛。除了锚节点通过配备 GPS 接收机或人工手动配置等方法获得自身位置外, 剩余的大量节点通过测量与锚节点的距离信息, 并使用某些定位算法来间接获得自身的位置。由于静态锚节点一经布设其位置便不再移动, 且所有节

点的位置解算都要以锚节点的位置为参考, 因此, 锚节点的位置对节点的定位效果具有直接影响, 进而影响网络的应用性能, 例如提高监测区域的覆盖率^[5]、降低网络寿命^[6]等。

本文研究单跳定位的场景, 从理论分析入手, 研究分析锚节点几何形状对定位精度的影响, 以到达时间 (Time of Arrival, TOA) 测距为例, 给出几何精度因子 (Geometric Dilution of Precision, GDOP)^[7] 的计算公式, 揭示同一种定位算法下, 当测距误差相同时, 节点定位精度不同的本质原因。本文提出区域定位的概念, 并给出区域定位精度的评价指标, 即区域定位误差均界。通过仿真分析研究锚节点布设因

基金项目: 国家自然科学基金 (61273047, 61573376)。

作者简介: 汪 晗 (1984—), 女, 工程师、博士、博士后, 主研方向为无线传感器网络定位、数据分析与处理; 王 坤, 讲师、硕士; 路文进, 汪 磊, 助理工程师。

收稿日期: 2017-03-27

修回日期: 2017-07-04

E-mail: wanghanxuzhou@126.com

素(锚节点质心、几何形状、几何面积)对区域定位精度的影响,据此设计锚节点优化布设的启发式(Heuristic Optimization Anchor node Deployment, HOAD)算法。

1 相关工作

关于锚节点布设的工作较多。文献[8]提出了以每个节点至少被 3 个锚节点覆盖为约束,在一个规则网络中计算定位所需的最少锚节点数目。文献[9-10]给定一些已布设的锚节点,并在此基础上利用人或移动的机器人增加额外的锚节点,以扩大锚节点的覆盖区域。这些工作主要着眼于确保节点的可定位,未考虑锚节点布设的几何形状对定位精度的影响。相关定位算法的研究大多着眼于给定锚节点的数量和在网络中的布设位置后,如何尽可能地提高算法的定位精度^[11]。然而从定位系统架构的角度上看,当锚节点布设不佳时,例如锚节点与待定位节点构成的几何形状较差时,无论采用何种定位算法,节点定位精度的提高都将受限。

目前从提高定位精度角度优化锚节点的布设大多基于搜索方法^[12-14]。给定待布设的锚节点个数 M ,先设定优化目标函数,再将待定位区域进行离散划分,将离散点作为锚节点的候选位置,从中任选 M 个进行穷尽组合,计算每种组合下的目标函数值,将最小值对应的位置组合作为锚节点的最终位置。这类基于搜索的方法虽能确保定位精度,但计算复杂度非常高,在锚节点个数多、网络布设区域大、形状复杂时,难以实现准确的定位。因而有必要提出一种复杂度低、易于实现的启发式锚节点优化布设策略,在给定待布设的锚节点个数和区域形状的情况下,从区域中选择锚节点的优化位置,在确保待定位节点定位精度的前提下降低计算复杂度。

2 锚节点对定位精度的影响

2.1 定位误差界和几何精度因子

定位误差的克拉美罗下界(Cramer-Rao Lower Bound, CRLB)^[15]是节点位置无偏估计的误差协方差下界,通常用于衡量定位算法所能达到的性能。GDOP 表征了当存在测量误差时,锚节点和目标节点的几何排列 Ψ 对定位误差的影响。本文基于 TOA 测距进行定位问题的描述和定位误差界及 GDOP 的推导。

考虑二维空间(即 $D=2$)中单个目标节点的定位问题, M 个锚节点的位置表示为 $\mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^D$ ($i=1, 2, \dots, M$),目标节点 O 的位置表示为 $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^D$,锚节点与目标节点构成的几何形状称为一个几何排列 Ψ ,第 i 个锚节点与目标节点 O 之间的距离为 $d_i(\mathbf{p}) = \|\mathbf{p} - \mathbf{q}_i\|$, $i=1, 2, \dots, M$,定位情形如图 1 所示。

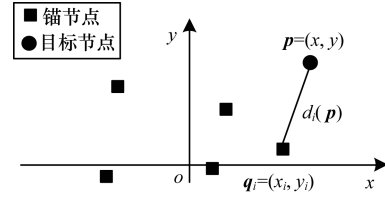


图 1 二维中的定位情形

由于在测量中受环境噪声、时钟同步误差等因素的影响,锚节点 i 与目标节点之间的信号 TOA 测量值 τ_i 含有误差,表示为:

$$\tau_i = \frac{1}{v} d_i(\mathbf{p}) + n_i \quad (1)$$

其中, v 表示信号传播速度, n_i 表示信号的 TOA 测量误差。

假设 TOA 的测量误差 n 服从均值为零的高斯分布,并且 n 的协方差矩阵 \mathbf{C} 满秩,那么 TOA 的测量值 $\boldsymbol{\tau}$ 的概率密度函数(Probability Density Function, PDF)可以表示为^[16]:

$$f(\boldsymbol{\tau}; \mathbf{p}) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} \sqrt{\det(\mathbf{C})}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}(\boldsymbol{\tau} - d(\mathbf{p}))^T \mathbf{C}^{-1}(\boldsymbol{\tau} - \frac{1}{v} d(\mathbf{p}))\right] \quad (2)$$

据此可以求出对应的费希尔信息矩阵 \mathbf{J} :

$$\mathbf{J} = \mathbf{E}\{\left[\nabla \ln f(\boldsymbol{\tau}; \mathbf{p})\right]\left[\nabla \ln f(\boldsymbol{\tau}; \mathbf{p})\right]^T\} \quad (3)$$

其中, ∇ 表示对 \mathbf{p} 求梯度, $\mathbf{E}(\cdot)$ 表示对 $\boldsymbol{\tau}$ 求期望。

根据定义及式(2)、式(3),单目标节点的定位误差 CRLB 可以表示为:

$$\sigma_{\text{CRLB}}^2 = \text{tr}(\mathbf{J}^{-1}) = v^2 \text{tr}((\mathbf{G} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{G}^T)^{-1}) \quad (4)$$

其中:

$$\mathbf{G} = \nabla \mathbf{d}^T = [\mathbf{g}_1 \ \mathbf{g}_2 \ \cdots \ \mathbf{g}_M] \quad (5)$$

$$\mathbf{g}_i = \nabla d_i(\mathbf{p}) = \frac{\mathbf{p} - \mathbf{q}_i}{\|\mathbf{p} - \mathbf{q}_i\|}, i=1, 2, \dots, M$$

\mathbf{g}_i 是单位长度矢量, $\|\mathbf{g}_i\| = 1$, 方向从锚节点 \mathbf{q}_i 指向目标节点 \mathbf{p} , \mathbf{G} 是 $D \times M$ 矩阵,由目标节点和锚节点的几何位置决定, $\text{tr}(\cdot)$ 表示求迹运算。

将式(4)开根号可得到定位误差的 CRLB:

$$\sigma_{\text{CRLB}} = v \sqrt{\text{tr}((\mathbf{G} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{G}^T)^{-1})} \quad (6)$$

GDOP 概念来自卫星几何学^[17], 定义为:

$$\sigma_{\text{GDOP}} = \sigma_p / \sigma_m \quad (7)$$

其中, σ_p 和 σ_m 分别表示位置估计和距离测量的均方根(Root Mean Square, RMS)误差。当 TOA 的测量误差 n 服从均值为零、方差为 σ^2 的高斯独立同分布时, $\sigma_m = v\sigma$, 且 n 的协方差矩阵 \mathbf{C} 具有如下形式:

$$\mathbf{C} = \sigma^2 \mathbf{I}_{M \times M} \quad (8)$$

其中, σ^2 表示高斯分布的方差, \mathbf{I} 表示单位方阵。

对于无偏估计的定位算法而言, σ_p 可以用定位误差下界 σ_{CRLB} 来近似表示^[16,18]:

$$\sigma_p \approx \sigma_{\text{CRLB}} = v \sqrt{\text{tr}((\mathbf{G} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{G}^T)^{-1})} \quad (9)$$

将 $\sigma_m = v_\sigma$ 和式(8)、式(9)代入式(7)可得到 GDOP 的表达式:

$$\sigma_{\text{GDOP}} = \sqrt{\text{tr}((\mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1})} \quad (10)$$

对式(7)进行变形得到式(11):

$$\sigma_p = \sigma_m \cdot \sigma_{\text{GDOP}} = \sigma_m \sqrt{\text{tr}((\mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1})} \quad (11)$$

由式(10)可知, GDOP 仅由矩阵 \mathbf{G} 决定, \mathbf{G} 由几何排列 Ψ 决定。从式(11)可以更直观地看出定位误差与几何精度因子的关系: GDOP 表征了当存在测距误差 σ_m 时, 在定位误差 σ_p 中几何排列 Ψ 对 σ_m 的放大作用。

2.2 区域定位问题和搜索布设算法

第2.1节研究了锚节点和单个目标节点构成的几何形状对定位精度的影响, 下面研究区域定位问题, 即多个目标节点在凸区域 A 内随机均匀布设时, 锚节点对多个目标节点平均定位精度的影响。给定锚节点的个数 M , 从区域 A 内选出 M 个锚节点的位置 $\mathbf{q}_i, i=1, 2, \dots, M$, 使得随机布设的目标节点在 A 内的平均定位精度最高。

从第2.1节可知单个目标节点的定位精度可用定位误差 CRLB 表示。对于区域定位问题, A 内随机布设的每个目标节点都对应一个几何排列和 CRLB, 因此, 平均定位精度可用 CRLB 均值来表示, 称该均值为区域定位误差均界。

目标节点 O 的位置为 $(x, y), (x, y) \in A$, 对应的 CRLB 为 $\text{CRLB}(x, y)$, A 内随机布设的目标节点 CRLB 总和用积分形式表示为 $\int_{(x,y) \in A} \text{CRLB}(x, y) dx dy$, 区域定位误差均界 F 定义如下:

$$F = E(\text{CRLB}_A) = \frac{\int_{(x,y) \in A} \text{CRLB}(x, y) dx dy}{\int_{(x,y) \in A} 1 dx dy} \quad (12)$$

其中, $E(\cdot)$ 表示求均值, 当随机布设的目标节点在区域 A 内将所有位置都取遍时, $\int_{(x,y) \in A} 1 dx dy$ 表示求区域 A 的面积。

当锚节点位置 \mathbf{q}_i 改变时, 对于目标节点 (x, y) 而言, $\text{CRLB}(x, y)$ 会发生变化, 对应的目标函数 F 值亦发生变化。为了在区域内寻找锚节点的最优布设位置, 使目标函数 F 值最小, 最直观的方法是搜索法, 将区域 A 离散化, 将其均匀划分为 N 个小格, 小格的端点代表锚节点的位置候选点, 从中任选 M 个位置组合 B_i 作为锚节点的坐标, 然后计算在该组合 B_i 下, N 个点的平均 CRLB 值, 作为区域定位误差均界, 从

而将式(12)的积分转化为式(13)的求和:

$$F = E(\text{CRLB}|B_i) = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{CRLB}_i|B_i)}{N} \quad (13)$$

锚节点搜索布设算法即对 C_N^M 种组合计算目标函数 F 的相应值, 从中选择 F 最小值对应的组合 B_i 作为锚节点的最佳布设位置, 算法描述如下:

算法1 锚节点搜索布设算法

```

B_opt = null;    % 最优的锚节点位置组合
F_opt = inf;     % 最优的目标函数值为无穷大
For C_N^M 种锚节点组合中的第 t 个组合 B_t
    用式(13)计算区域内 N 个点的平均 CRLB 值 F_t;
    If F_t < F_opt
        B_opt = B_t;
        F_opt = F_t;
    End
End

```

End

从算法1可见, 搜索布设算法可以保证锚节点的优化布设, 但其复杂度很高, 当区域 A 划分为 N 个格子时, 计算复杂度为 $N \cdot C_N^M$, 即使只布设3个锚节点, 复杂度也为 $O(N^4)$ 。

3 启发式优化布设算法

鉴于锚节点搜索布设算法的计算复杂度较高, 有必要提出启发式的布设方式。对锚节点布设的构成因素, 例如锚节点质心、锚节点几何形状、锚节点几何面积等进行仿真分析, 给出定性结论, 并在此基础上提出锚节点的启发式优化布设算法。

3.1 仿真分析

以3个锚节点为例, 在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的正方形区域内进行布设, 假设测距误差 $\sigma = 1 \text{ m}$, 探讨锚节点质心的位置、锚节点的面积、锚节点的几何形状3个因素对区域定位误差均界的影响。

3.1.1 质心因素

仿真配置为: 由锚节点构成正三角形, 极径 20 m , 保持几何形状和角度不变, 仅改变锚节点在区域内的质心。锚节点和质心的移动示意图如图2所示。

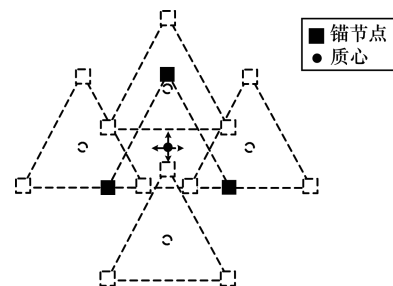


图2 锚节点和质心的移动

将正方形区域离散化,使其划分为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的小格,每个小格的端点作为待定位点的位置,然后利用式(13)计算锚节点、质心位于不同位置处的区域定位误差均界,仿真结果如图3所示。

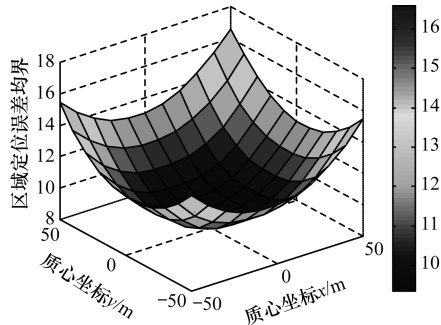


图3 锚节点质心对定位误差的影响

从图3可知,锚节点几何质心从区域中心向区域边缘移动的过程中,定位误差均界呈单调增加的趋势,当锚节点几何质心与区域中心(0,0)重合时,区域定位误差均界达到最小值。因此,为了降低区域定位误差,锚节点的几何中心要尽量与区域中心重合。

3.1.2 几何形状因素

仿真配置为:锚节点位于以区域中心为原点的圆周上,圆半径20 m,其中一个锚节点位于x轴正方向上,坐标为(20,0)不变,第2个锚节点保持极角为 120° 不变,改变第3个锚节点对应的极角 θ ,在 $[150^\circ, 330^\circ]$ 范围内每隔 30° 变化一次 θ 。锚节点的几何形状如图4所示。

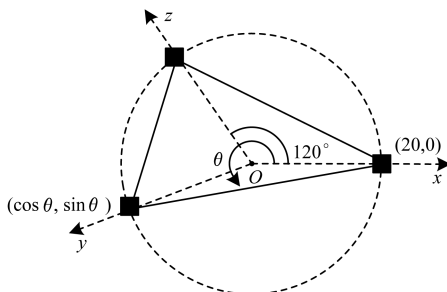


图4 锚节点的几何形状

将正方形区域离散化,使其划分为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的小格,每个小格的端点作为待定位点的位置,然后利用式(13)计算第3个锚节点对应的极角 θ 在 $[150^\circ, 330^\circ]$ 范围内每隔 30° 变化一次时的区域定位误差均界。几何形状对定位误差的影响结果如图5所示。其中,x轴表示第3个锚节点的极角 θ ,对应三角形的几何形状,y轴表示区域定位误差均界。

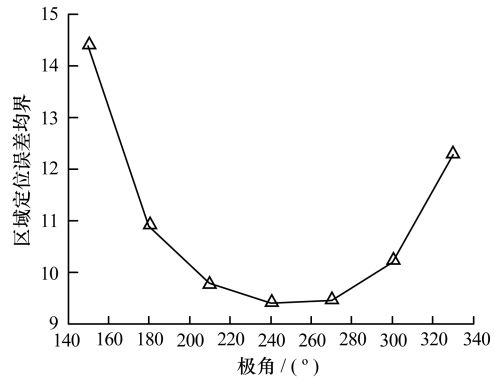


图5 几何形状对定位误差的影响

从图5可知,当锚节点间的夹角($120^\circ, \theta - 120^\circ, 360^\circ - \theta$)越接近时,区域定位误差越小。当 $\theta = 240^\circ$ 时,区域定位误差均界达到最小值,此时锚节点呈均匀等角布设。因此,为了降低区域定位误差,锚节点间的夹角要尽量接近;在同等条件下,当夹角相等时,区域定位误差均界最小。

3.1.3 几何面积因素

仿真配置为:由锚节点构成正三角形,质心与正方形的中心重合,逐步增大三角形对应的半径 r 。锚节点几何面积变化示意图如图6所示,通过改变三角形的几何面积,将正方形区域离散化,使其划分为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的小格,每个小格的端点作为待定位节点的位置,然后利用式(13)计算锚节点半径 r 取不同值时对应的区域定位误差均界。仿真结果如图7所示。

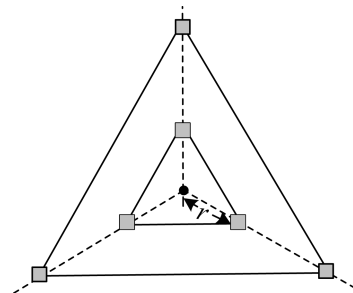


图6 锚节点几何面积的变化

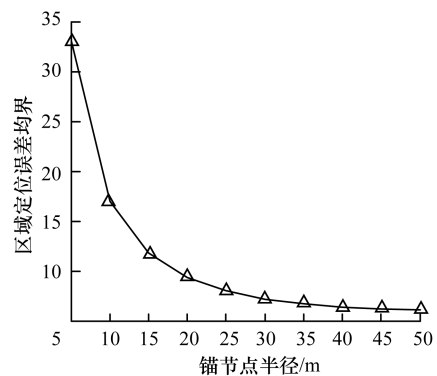


图7 几何面积对定位误差的影响

从图7可知,随着锚节点面积的增大,区域定位误差逐渐变小。因此,为了降低区域定位误差,锚节点的几何面积要尽量大,覆盖尽可能广的待定位区域。

当锚节点不构成正三角形时,考察锚节点几何形状与几何面积对区域定位误差均界的影响。锚节点间的夹角保持 120° 不变,为保持锚节点三角形(正三角形、非正三角形)的几何面积相等,非正三角形的极径设置如图8所示。

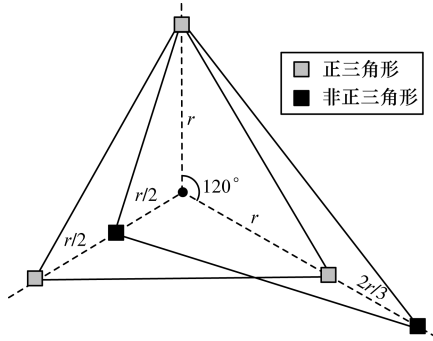


图8 不同的锚节点形状

改变极径 r 值大小,使不同形状三角形的几何面积同步增大,计算不同 r 值对应的区域定位误差均界,仿真结果如图9所示。

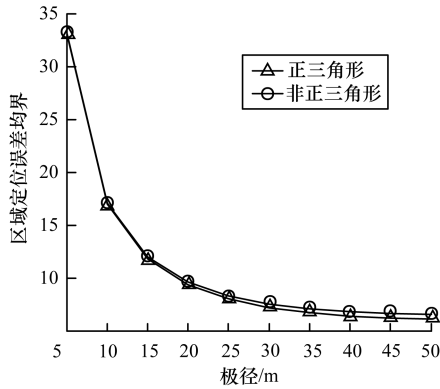


图9 几何面积相等时极径对锚节点形状的影响

从图9可知,不管是正三角形还是非正三角形,随着锚节点几何面积的增大,区域定位误差逐渐变小。将正三角形和非正三角形进行对比发现,当几何面积相等时,区域定位误差亦相差不大。虽然非正三角形的几何形态不如正三角形,但当其面积更大时,对应的误差均界更小。因此,为了提高区域定位精度,相较于锚节点的几何形状,锚节点的几何面积起到了更大的作用,因而在锚节点优化布设时,要优先考虑几何面积的大小,使之覆盖的待定位区域尽可能大。

3.2 算法设计

从上述仿真结果可知,锚节点几何中心的位置、

几何形状和几何面积对区域定位误差均界存在影响,且锚节点几何中心与区域质心越接近、锚节点几何形状越接近均匀等角、锚节点几何面积越大时,区域定位误差均界越小。与几何形状相比,几何面积的影响更大,因此,应该优先考虑锚节点的几何面积。据此,设计启发式的锚节点布设算法(Heuristic Optimized Anchor Deployment, HOAD)。

算法2 HOAD 算法

输入 给定一个凸区域 A 和待布设的锚节点个数 M

输出 将夹角 α_{\max} 对应的交点 $\{b_1, b_2, \dots, b_M\}_{\max}$ 作为 M 个锚节点的布设位置

步骤1 选取区域 A 的质心 c 。

步骤2 以点 c 为中心,均匀等角布设 M 个锚节点,第1个锚节点与水平正方向的夹角为 α 。相邻锚节点的夹角等于 $2\pi/M$,第 i 个锚节点与区域边界的交点记为 b_i 。

步骤3 改变 α 的大小,使之在 $0 \sim 2\pi/M$ 间变换。计算 $\alpha = \alpha_k$ 时,锚节点位置 $\{b_1, b_2, \dots, b_M\}_k$ 构成的几何面积 S_k ,从中选出最大面积 S_{\max} 对应的角度,将其标记为 α_{\max} 。

算法2的原理如图10所示。

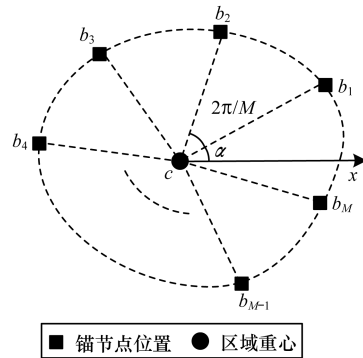


图10 HOAD 算法原理示意图

下面分析算法2的计算复杂度。在步骤1中,选取凸区域的质心 c ,由于区域的形状比较复杂,因此使用一个简便的近似方法来选取。先将区域离散化成 N 个小格,每个小格用一个位置坐标 (x_i, y_i) 表示,将 $(\sum_{i=1}^N x_i/N, \sum_{i=1}^N y_i/N)$ 作为区域的质心,其计算复杂度为 $O(N)$;步骤2的计算复杂度为常数 $O(1)$;在步骤3中,为选择几何面积最大的锚节点, α 要在 $0 \sim 2\pi/M$ 间变换,假设变换次数为 K ,那么计算复杂度为 $O(K)$ 。由于 $K \ll N$,因此启发式算法2总体的计算复杂度为 $O(N)$ 。

3.3 算法性能分析

为评价 HOAD 算法的性能,与算法 1 穷尽式搜索方法进行定位精度和运行时间的比较。考虑在一个不规则凸区域内,布设 3 个锚节点的情形。仿真使用 Matlab7.0,PC 机的 CPU 为 2.33 GHz 双核,内存为 4 GB。假设节点间的测距误差服从独立同高斯分布 $N(0, \sigma^2)$, 其中 $\sigma = 5$ m, 随机布设的节点数 $N = 1\ 000$, 搜索步长在 20 m ~ 40 m 之间变化。

定位精度的评价指标为区域均方根定位误差 r_{RMS} , 定义如下:

$$r_{\text{RMS}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(\hat{x}_i - x_i)^2 + (\hat{y}_i - y_i)^2}}{N}$$

其中, (x_i, y_i) 表示节点 i 的真实位置, (\hat{x}_i, \hat{y}_i) 表示节点 i 的估计位置, N 是目标节点的个数。

图 11 表示采用启发式锚节点优化布设算法 HOAD 选取的锚节点位置, 其中, 实线表示区域边界。采用搜索法时首先将区域均匀划分为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的小格, 然后使用不同的搜索步长在离散的小格内穷尽式搜索锚节点的最优位置, 比较 HOAD 算法和搜索法的定位精度和计算复杂度, 结果如图 12 和图 13 所示。

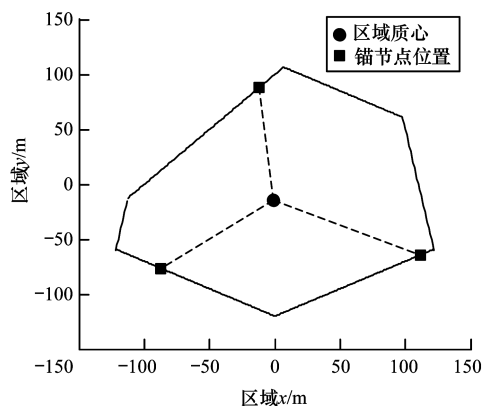


图 11 HOAD 算法运行结果

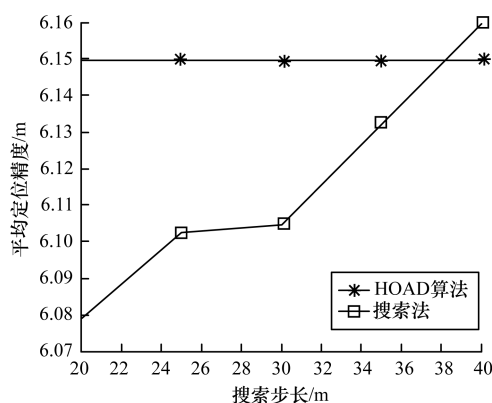


图 12 2 种算法定位精度对比

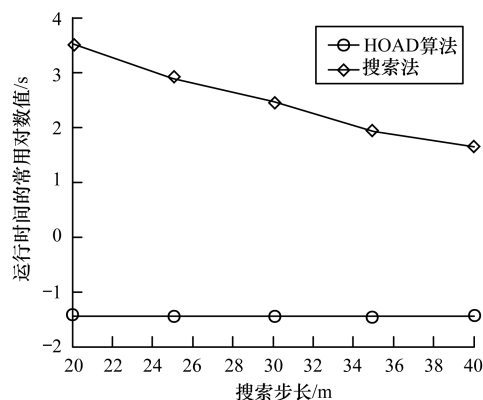


图 13 2 种算法运行时间对比

从图 12、图 13 看出, 对于搜索法本身而言, 随着搜索步长的增大, 算法运行时间下降很快。从图 13 可以看出, HOAD 的运行时间与搜索法存在 3 个 ~ 5 个数量级的差异。综合上述仿真分析可知, HOAD 算法兼具定位精度高、计算开销小的优势, 更能适用于实际应用场景。

4 结束语

在无线传感器网络中, 本文基于定位误差 CRLB 的推导, 揭示了锚节点与待定位节点构成的几何形状对节点定位精度的影响。从提高区域平均定位精度和降低计算复杂度的角度研究了锚节点优化布设问题, 提出了锚节点布设性能的评价标准, 即区域定位误差均界。采用仿真手段研究了锚节点质心、几何形状、几何面积对区域定位性能的影响, 据此提出了启发式的锚节点优化布设算法 HOAD, 并与经典的搜索法进行了定位精度和计算复杂度的比较。仿真结果表明, HOAD 算法的计算开销明显小于搜索法, 因而实用价值更高。

参考文献

- [1] HE Tian, KRISHNAMURTHY S, STANKOVIC J A, et al. VigilNet: an integrated sensor network system for energy efficient surveillance [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2006, 2(1): 1-38.
- [2] YANG Zheng, LI Mo, LIU Yunhao. Sea depth measurement with restricted floating sensors [C]// Proceedings of IEEE Real Time Systems Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007: 469-478.
- [3] MAINWARING A, POLASTRE J, SZEWCZYH R, et al. Wireless sensor networks for habitat monitoring [C]// Proceedings of ACM International Workshop on Wireless Sensor Network and Applications. New York, USA: ACM Press, 2002: 88-97.
- [4] LI Mo, LIU Yunhao. Underground coal mine monitoring with wireless sensor networks [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2009, 5(2): 10-19.

- [5] 方关林,李 平.一种能耗均衡的无线传感器网络覆盖协议[J].计算机工程,2011,37(8):97-98.
- [6] 廖 洁,张 磊,马飒飒.一种低能耗的WSN覆盖控制优化策略[J].计算机工程,2016,42(11):109-113.
- [7] LI Qun, ROSA M D, RUS D. Distributed algorithms for guiding navigation across a sensor network [C]//Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM Press, 2003:313-325.
- [8] CHEN Yingying, FRANCISCO J, TRAPPE W, et al. A practical approach to landmark deployment for indoor localization [C]//Proceedings of the 3rd Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2006:365-373.
- [9] BULUSU N, HEIDEMANN J, ESTRIN D. Adaptive beacon placement [C]//Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2001:489.
- [10] BULUSU N, HEIDEMANN J, BYCHKOVSKIY V, et al. Density-adaptive beacon placement algorithms for localization in ad hoc wireless networks [C]//Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2001.
- [11] 黄庆宇,刘新华.基于线性最小二乘估计的传感器网络节点三维测距定位算法[J].计算机工程,2016,42(12):11-15.
- [12] LI Xiaoli, SHI Hongchi, SHANG Yi. Selective anchor placement algorithm for ad-hoc wireless sensor networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2008:2359-2363.
- [13] BIAZ S, JI Yiming, AGRAWAL P. Impact of sniffer deployment on indoor localization [C]//Proceedings of International Conference on Collaborative Computing, Networking, Applications and Worksharing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2005:30-39.
- [14] JI Yiming, BIAZ S, WU Shaoen, et al. Optimal sniffers deployment on wireless indoor localization[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007:13-16.
- [15] CHAFFEE J, ABEL J. GDOP and the Cramer-Rao bound [C]//Proceedings of Position Location and Navigation Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2002:663-668.
- [16] YANG Bin, SCHEUING J. Cramer-Rao bound and optimum sensor array for source localization from time differences of arrival [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2005:961-964.
- [17] MISRA P, ENGE P. 全球定位系统—信号、测量与性能[M]. 罗 鸣,曹 冲,肖雄兵,等,译.北京:电子工业出版社,2008.
- [18] YANG Bin. Different sensor placement strategies for TDOA localization[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007:1093-1096.

编辑 顾逸斐

(上接第104页)

- [6] DAIAN D S, GIURA D H. Traffic shaping and traffic policing impacts on aggregate traffic behaviour in high speed networks[C]//Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2011:465-467.
- [7] 张圆圆,郭裕顺.流量监管和流量整形技术的实现和应用[J].中国水运,2010,10(11):78-80.
- [8] 刘宇翔.基于令牌桶算法的交换网流量控制方法[D].成都:电子科技大学,2014.
- [9] 李晓利,郭宇春. QoS 技术中令牌桶算法实现方式比较[J].中兴通讯技术,2007,13(3):56-60.
- [10] HARYADI S, ARDANA G. Differentiated services traffic conditioner based on token buckets and time sliding window[C]//Proceedings of International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012:92-96.
- [11] 黎晓亮.多层令牌桶重分配流量整形研究[D].长沙:国防科学技术大学,2010.
- [12] ZHANG Xiaotong, WANG Qin, LI Peiya, et al. A multi-service token bucket algorithm for MAC QoS system in HFC access network [C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Computer and Information Technology. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2008:213-217.
- [13] 涂文伟,张 进,张兴明.分级统筹令牌参数的流量整形算法[J].计算机应用,2006,26(9):2175-2177.
- [14] 骆建歆,梁 伟,刘 超.一个基于令牌桶的带宽动态分配研究[J].广东通信技术,2009,29(3):25-28.
- [15] 张晓彤,李培娅,王 沁,等.接入MAC层QoS系统的多业务令牌桶流量整形算法[J].计算机科学,2009,36(1):68-70.
- [16] 易发胜.基于服务的网络端系统QoS的研究[D].成都:电子科技大学,2008.
- [17] 韩 冰.网络公平性的区分服务分组标记和队列调度策略研究[D].长春:吉林大学,2007.
- [18] DU L, QIU Z Y, GUO Y L. An improved queue management algorithm in Diffserv networks[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Information and Computing Science. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2009:123-126.
- [19] 胡 啸.基于区分服务网络的改进RIO-C算法的研究与仿真[D].沈阳:东北大学,2009.
- [20] 刘治国,史二鑫,马 悦.基于动态令牌桶的卫星网络带宽分配方法[J].计算机工程,2016,42(2):93-97.

编辑 吴云芳