

基于自适应分簇的改进 RSSI 定位算法

夏侯凯顺¹, 余辉荣¹, 邬依林², 叶景志¹

(1 华南理工大学 控制与优化中心, 广东 广州 510640; 2 广东第二师范学院 计算科学系, 广东 广州 510310)

摘 要: 针对 RSSI 定位中 RSSI 值容易受外界环境干扰的数据源精度问题, 提出一种自适应分簇策略, 从锚节点中优选节点形成一个工作簇为定位算法提供可靠观测数据; 针对传统的 RSSI 最小二乘定位算法的不足, 提出一种改进的加权最小二乘法. 实验结果表明, 此算法的准确率和定位精度都有较大提高, 具有良好的定位效果.

关键词: RSSI; 自适应分簇; 节点定位; 加权最小二乘定位算法

中图分类号: TP212.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)05-0103-04

Improved RSSI Localization Algorithm Based on Adaptive Clustering

XIAHOU Kai-shun¹, YU Hui-rong¹, WU Yi-lin², YE Jing-zhi¹

(1 Center for Control and Optimization, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2 Department of Computer Science, Guangdong University of Education, Guangzhou 510310, China)

Abstract: Focusing on the problem of inaccurate RSSI (Received Signal Strength Indicator) data caused by the environment interference in RSSI localization, an adaptive clustering strategy is introduced in this paper. Anchor nodes with precise RSSI value are chosen to form a working cluster by using this strategy to provide the node localization algorithm with reliable measurement data. An improved weighted least squares algorithm is proposed to overcome the shortage of traditional least squares algorithm in RSSI localization. In addition, a positioning experiment platform was built to verify and testify the presented algorithm and strategy. The results show that the improved weighted least squares algorithm based on adaptive clustering greatly improve the positioning accuracy and performance.

Key words: RSSI; adaptive clustering; node localization; weighted least squares localization algorithm

1 引言

无线传感器网络节点定位在传感器网络中具有重要应用, 定位算法分为基于距离的 (Range-based) 定位算法和与距离无关的 (Range-free) 定位算法^[1]. 基于距离的定位算法通过测距技术测量节点间的距离, 再利用测量得到的距离信息计算出未知节点的坐标. RSSI 测距是一种常用的测距技术, 它通过传感器节点自身测量获得与距离相关的 RSSI 值, 是一种低功耗、低成本的测距方式^[2], 适用于大规模传感器网络.

基于 RSSI 的定位算法是目前的研究热点问题^[3-4], 但无线电信号受环境因素影响很大, 距离、天

线方位、节点高度和发射功率都会使 RSSI 值产生波动. 而多径、绕射、障碍物等因素的存在, 也使得无线电信号传播路径损耗模型变得十分复杂^[5]. 上述问题的存在导致基于 RSSI 测距的传统最小二乘 (Least Squares, LS) 定位算法定位准确度低、精度差. 本文提出了一种基于自适应分簇策略的改进 RSSI 定位算法, 通过搭建实验平台对算法的有效性 with 性能进行验证与测试.

2 RSSI 测距模型与参数辨识

室内无线电信号传播路径损耗模型^[6]如式 (1) 所示.

$$\text{RSSI} = A - 10 \lg d \quad (1)$$

收稿日期: 2013-06-29; 修回日期: 2013-08-20

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (S2012010008462); 国家自然科学基金项目 (61273109)

式中, RSSI 是接收信号强度因子, d 为接收端与发射端的距离, A 为距离 1 m 时的信号强度, n 为与环境密切相关的路径损耗指数. 将式(1)写成

$$d^2 = 10^{\frac{A - \text{RSSI}}{5n}} \quad (2)$$

式中, 参数 A 和 n 可以通过实验数据辨识得到, 根据式(2)将 RSSI 值转化为距离值 d .

为减小环境因素对 RSSI 信号的干扰, 在室内环境下, 使信号发射源和接收节点处于同一高度, 天线保持同一方向^[7-8], 中间无障碍物, 采集距离在 0 ~ 3 m 内的大量 RSSI 值进行参数辨识. 滤除偏差较大的测量值后取平均值, 并采用最小二乘拟合法绘出 RSSI 信号强度与距离 d 的关系曲线, 如图 1 所示. 辨识得到的参数为 $A = -57.07$, $n = 2.04$, 故 RSSI 值与距离值 d 的关系由式(3)表示.

$$d^2 = 10^{\frac{-57.07 - \text{RSSI}}{10.2}} \quad (3)$$

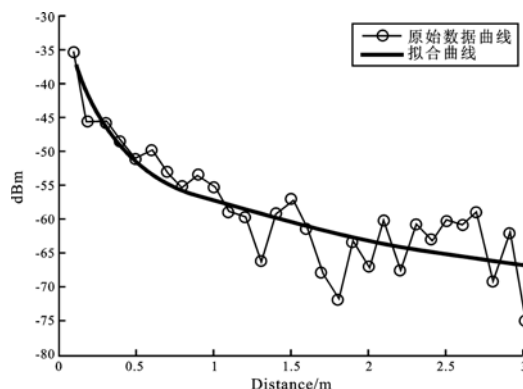


图 1 信号传输模型参数辨识曲线

3 自适应分簇策略

如图 2 所示, 锚节点均匀分布组成感知区域, 由于 RSSI 值具有跳变性, 随机变化幅度较大. 因此, 需要从大量锚节点中择优进行定位. 本文提出一种自适应分簇策略, 根据锚节点分布及其 RSSI 观测值对所有节点择优筛选动态形成一个含 4 个节点的簇, 簇内成员节点为定位算法提供坐标信息和可靠的观测值. 结合图 2 中处于 A 点的未知节点的簇 1 对该策略步骤详细说明如下:

(1) 从所有锚节点中选取 RSSI 观测值最大的一个节点作为簇的第一个成员节点(记为 C_1), 以确定距离未知节点最近的锚节点. 然后选择与 C_1 邻近的 8 个锚节点, 与 C_1 一起形成以 C_1 为中心的方形监测区域(图 2 中虚线所示), 9 个锚节点组成一个观测集 $O_{\text{set}} = \{N_i, i = 1, 2, \dots, 9\}$, N_i 表示观测集中的第 i 个观测节点, 同时监测区域被划分为 4 个网

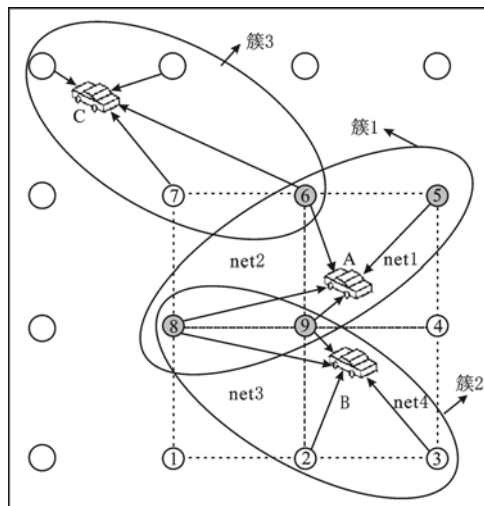


图 2 未知节点处于不同位置时的自适应分簇示意图

格, 记为 $Net_j (j = 1, 2, 3, 4)$. 如图 2 所示, N_9 节点的 RSSI 观测值最大, 故 $C_1 = N_9$.

(2) 从 N_1 到 N_8 观测节点中选择 RSSI 值最大的节点作为簇的第二个成员节点(记为 C_2), 以进一步确定未知节点位置. 如图 2 所示, 除 N_9 外的其余 8 个节点中, N_6 节点的 RSSI 值最大, 故 $C_2 = N_6$.

(3) 以上述选取的簇成员节点 C_2 为参考点, 对比它的属于观测集的相邻节点的 RSSI 值, 选取观测值最大的作为簇的第三个成员节点(记为 C_3), 从而可确定未知节点位于 C_1, C_2, C_3 所在网格中. 如图 2 所示, N_5 和 N_7 节点是 C_2 节点的相邻节点, N_5 的观测值大于 N_7 的观测值, 故 $C_3 = N_5$.

(4) 在 C_1, C_2, C_3 所在网格的相邻两个网格中分别找出与 N_6 节点距离最远的两个观测节点, 比较两个节点的观测值, 选择观测值小的节点作为簇的第四个成员节点, 记为 C_4 , 以确保选取的数据组合有足够的梯度差, 提高 RSSI 值分辨率. 如图 2 所示, Net_1 是 C_1, C_2, C_3 所在网格, 与 Net_1 相邻的 Net_2 和 Net_3 中与 N_6 节点距离最远的两个观测节点分别是 N_8 和 N_3 , N_3 的观测值比 N_8 观测值小, 故 $C_4 = N_3$.

(5) 上述步骤选取的 4 个观测节点形成一个工作簇 $Cluster = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$, 根据簇内节点坐标信息及其 RSSI 观测值, 利用定位算法可求出未知节点的坐标.

(6) 每次定位算法计算得到坐标后, 重复(1) ~ (5)的步骤.

4 定位算法

4.1 传统最小二乘(LS)定位算法

如图 3 所示, 第 $i (i = 1, 2, \dots, n)$ 个锚节点 $(x_i,$

y_i) 获取到未知节点 (x_0, y_0) 发射的电磁波信号强度值为 RSSI_i , 将 RSSI_i 值代入式(3) 求出锚节点到未知节点的距离 d_i , 由距离公式得到非线性方程组(4).

$$\begin{cases} d_1^2 = (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \\ d_2^2 = (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 \\ \dots \\ d_n^2 = (x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 \end{cases} \quad (4)$$

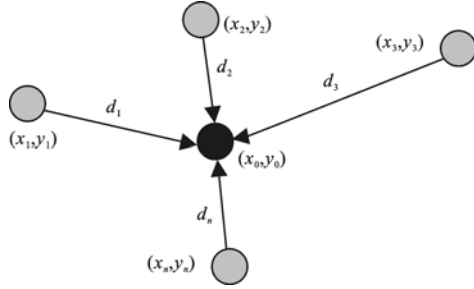


图3 最小二乘定位算法原理图

以第 n 个方程作为基准方程, 将方程组(4) 中的前 $n-1$ 个方程分别减去基准方程, 可将上述非线性方程组简化为线性方程组:

$$X = H\theta \quad (5)$$

$$\text{其中, } H = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ 2(x_2 - x_n) & 2(y_2 - y_n) \\ \dots & \dots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix},$$

$$\theta = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} -d_1^2 + d_n^2 + x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 \\ -d_2^2 + d_n^2 + x_2^2 - x_n^2 + y_2^2 - y_n^2 \\ \dots \\ -d_{n-1}^2 + d_n^2 + x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 \end{bmatrix}.$$

极小化性能指标 $J(\theta) = (X - H\theta)^T (X - H\theta)$, 得到线性最小二乘估计量:

$$\hat{\theta}_{ls} = (H^T H)^{-1} H^T X \quad (6)$$

多径、绕射、障碍物等因素导致无线电信号衰减模型十分复杂, 模型(1) 中参数 A 和 n 处于动态变化中, 尤其是参数 A 的变化范围较大. LS 定位算法通过确定的衰减模型(3) 将 RSSI 值转化为距离值 d 对目标进行定位, 存在较大的模型误差. 针对 LS 算法在 RSSI 定位中的不足, 提出一种改进的最小二乘 (Improved Least Squares, ILS) 定位算法.

4.2 改进最小二乘(ILS) 定位算法

通过大量实验数据对模型参数进行辨识, 得到

参数 A 的取值范围为 $R_A = [-54, -60]$, 衰减指数 n 的取值范围为 $R_n = [1.9, 2.1]$. 鉴于 n 的变化范围不大, 取 $n = 2$, 根据 RSSI 和参数 A 的实际数值大小, 为便于程序的数值计算, 对式(2) 做以下处理:

$$d^2 = 10^{\frac{-(\text{RSSI}+A)}{10}} = 10^{\frac{-A}{10}+6} \cdot 10^{\frac{-\text{RSSI}}{10}-6} = \frac{K}{P} \quad (7)$$

式中, $K = 10^{\frac{-A}{10}+6}$, $P = 10^{\frac{\text{RSSI}}{10}+6}$. 根据 A 的取值范围, 可知 K 值的取值范围为 $R_K = [0.25, 1]$. 第 i 个锚节点获取到未知节点 (x_0, y_0) 发射的无线电信号的强度值为 RSSI_i , 由公式 $P_i = 10^{\frac{\text{RSSI}_i}{10}+6}$ 转换得到 P_i , 根据式(7) 得到非线性方程组(8).

$$\begin{cases} d_1^2 = (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 = \frac{K}{P_1} \\ d_2^2 = (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 = \frac{K}{P_2} \\ \dots \\ d_n^2 = (x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 = \frac{K}{P_n} \end{cases} \quad (8)$$

将 n 个方程相加求平均值得到基准方程(9):

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{K}{P_i} \quad (9)$$

将 n 个方程分别减去基准方程整理可得线程方程组:

$$X = H\theta \quad (10)$$

$$\text{其中, } H = \begin{bmatrix} 2(x_1 - \bar{x}_i) & 2(y_1 - \bar{y}_i) & \frac{1}{P_1} - \bar{P} \\ 2(x_2 - \bar{x}_i) & 2(y_2 - \bar{y}_i) & \frac{1}{P_2} - \bar{P} \\ \dots & \dots & \dots \\ 2(x_n - \bar{x}_i) & 2(y_n - \bar{y}_i) & \frac{1}{P_n} - \bar{P} \end{bmatrix},$$

$$\theta = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ K \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 - \bar{x} - \bar{y} \\ x_2^2 + y_2^2 - \bar{x} - \bar{y} \\ \dots \\ x_n^2 + y_n^2 - \bar{x} - \bar{y} \end{bmatrix}. \quad \text{而 } \bar{x}_i =$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{P_i}, \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2. \text{ 线性最小二乘估计量为}$$

$$\hat{\theta}_{ls} = (H^T H)^{-1} H^T X \quad (11)$$

每个系统周期, 系统获得观测集中所有观测节

点的 RSSI 观测值后调用自适应分簇策略,得到工作簇 $\text{Cluster} = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$, 根据簇内成员节点提供的坐标和观测信息利用 ILS 定位算法求出未知节点坐标 (x_0, y_0) 和 K 值. 若 $K \in R_K$ (K 在取值范围内), 本次计算得到的未知节点坐标有效, 保存数据; 若 $K \notin R_K$ (K 不在取值范围内), 本次计算得到的坐标无效, 不保存数据.

ILS 算法避免了将 RSSI 值通过确定的信号衰减模型转化为距离值 d , 减小了模型误差, 提高了定位的精度; 通过本次计算得到的 K 值来判断计算得到的未知节点坐标的有效性, 提高了定位的准确度. 但是 ILS 算法的定位精度仍不理想, 因为其性能指标同等对待每次观测量, 实际系统各次观测噪声的强度是不一样的, 所得的各次观测量的精度也不同, 因此同等对待各次观测量是不合理的. 故在 ILS 算法的基础上提出一种改进加权最小二乘 (Improved Weighted least squares localization algorithm, IWLS) 定位算法, 根据每个锚节点的位置精度, 在最小二乘估计中用不同的加权系数进行定位计算, 以提高定位精度.

4.3 改进加权最小二乘 (IWLS) 定位算法

引入加权矩阵 $\mathbf{W}$, 极小化性能指标 $J_w(\hat{\theta}) = (X - H\hat{\theta})^T \mathbf{W} (X - H\hat{\theta})$ 得到的线性最小二乘加权估计量为

$$\hat{\theta}_{lsw} = (H^T \mathbf{W} H)^{-1} H^T \mathbf{W} X \quad (12)$$

取加权矩阵 $\mathbf{W} = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$, ω_i 表示第 i 个簇成员节点在定位中的权重, 由式 (13) 计算可得

$$\omega_i = \frac{1}{d_i^2} = \frac{P_i}{K} \quad (13)$$

考虑系统的连续性, K 值在同一周期或相邻周期基本不变, 可采用上一周期计算得到的有效值 K 代入式 (13) 求出本周期定位所需的权重 ω_i .

5 结束语

本文提出了一种基于自适应分簇的改进加权最小二乘定位算法, 并结合实验平台系统验证相关算法和策略的有效性. 实验结果证实了本文提出的策略的有效性, IWLS 算法定位准确率达 86.5%, 在 $300 \text{ cm} \times 300 \text{ cm}$ 的监测区域定位的平均误差为 30

cm 左右, 具有良好的定位效果.

参考文献:

- [1] Kumar P, Reddy L, Varma S. Distance measurement and error estimation scheme for RSSI based localization in Wireless Sensor Networks[C]//2009 Fifth IEEE Conference on Wireless Communication and Sensor Networks (WCSN), Allahabad, India; IEEE, 2009: 1-4.
- [2] Gu Yan-ying, Lo Anthony, Niemegeers I. A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1): 13-32.
- [3] 李福芳, 罗飞, 齐德昱, 等. 无线传感网节点自适应优化定位研究[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(10): 18-21.
- [4] 冯秀芳, 曹美丽, 孙超. 无线传感器网络基于 APIT 的混合定位算法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(6): 58-61.
- [5] 罗炬锋, 邱云周, 付耀先. 研究片内多径分离技术在基于 RSSI 定位中的应用[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 891-895.
- [6] Rappaport T S. Wireless communications principles and practices second edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [7] Heurtefeux K, Verimag Grenoble. Is RSSI a good choice for localization in wireless sensor network? [C]//2012 IEEE 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), Fukuoka; IEEE, 2012: 732-739.
- [8] Alippi C, Vanini G. Wireless sensor networks and radio localization: a metrological analysis of the MICA2 received signal strength indicator[C]//29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks. [s. l.]: IEEE, 2004: 579-580.

作者简介:

夏侯凯顺 男, (1991—), 硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络、机器人协同编队控制.

余辉荣 男, (1988—), 硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络、多智能体协同控制.

郭依林 男, (1970—), 副教授. 研究方向为分布式参数系统、非线性控制、网络控制等.

叶景志 男, (1988—), 硕士研究生. 研究方向为网络控制、移动机器人控制.