

稀疏无线传感器网络的节点自定位算法

鲁旭阳, 张效义, 刘广怡

(信息工程大学信息工程学院, 郑州 450002)

摘 要: 针对基于 TOF 测距的节点定位算法在稀疏网络中定位覆盖率较低的问题, 对初始估计位置进行迭代求精, 达到精度门限的升级为锚节点。如果网络中存在不良节点, 对节点进行估计分类, 并实现对不良节点的定位。仿真结果表明, 在适当增加节点计算量和通信开销的条件下, 可提高改进算法的定位覆盖率。

关键词: 无线传感器网络; TOF 测距; 不良节点; 定位覆盖率; 迭代求精; 泰勒级数

Node Self-localization Algorithm for Sparse Wireless Sensor Network

LU Xu-yang, ZHANG Xiao-yi, LIU Guang-yi

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

【Abstract】 Two steps are put forward to improve the poor localization coverage of the Time of Flight(TOF) range-based algorithm in the sparse network. The initial values of estimated node locations which achieve the accuracy threshold with the iterative refinement method upgrade to anchor nodes. If there is adverse nodes in the network, estimate their classification and compute the position. Simulation results show that the improved algorithm has obviously better localization coverage at the cost of increasing appropriate communication and computation.

【Key words】 Wireless Sensor Network(WSN); Time of Flight(TOF) ranging; adverse node; localization coverage; iterative refinement; Taylor series

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.18.022

1 概述

目前, 无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)已经广泛应用于军事国防、医疗卫生、农业生产、环境监测等诸多领域^[1]。对于大多数应用, 知道传感器节点的位置是至关重要的。全球定位系统 GPS 是目前比较常用的定位系统, 但是考虑到节点成本、能耗、布设环境等因素, 在传感器网络中并不适宜在节点上大范围配置 GPS。目前, 无线传感器网络节点定位算法可分为 2 类^[1-2]: 基于测距技术的定位(range-based)和无需测距技术的定位(range-free)。常见的测距方式包括 TDOA、AOA、RSSI、TOF 等, 其中, TOF 测距技术具有测距范围广、无需额外硬件、测距精度较高等特点^[3]。range-free 定位则无须距离和角度信息, 仅根据网络连通性等信息即可实现。

基于 TOF 测距的 WSN 节点定位算法具有能耗和计算量低、定位精度较高等特点, 是目前应用最广泛的定位算法之一。近年来, 一些文献在传统算法的基础上从不同的角度对其定位精度进行了提高。文献[4]给出了 TOF 测距误差的 CRLB, 利用 UWB 信号作为传输信号提高 TOF 测距精度; 文献[5]在 TOF 测距协议的基础上提出了反向测

量求平均的方法, 降低了时钟偏移误差; 文献[6]运用改进的无迹卡尔曼滤波(UKF)技术对估计结果进行求精等。在稀疏网络中节点随机分布, 连通度较低, 这时传统的基于 TOF 测距的定位算法对一些未知节点无法定位。本文以提高定位覆盖率为目标, 提出了改进方案, 并通过仿真, 比较验证改进方案的性能。

2 基于 TOF 测距的定位算法

基于 TOF 测距的节点定位算法实现包括 2 个阶段。

第 1 阶段: 通过 TOF 测距技术计算未知节点与锚节点之间的距离。

在 TOF 测距时, 未知节点向锚节点发送信号, 锚节点收到信号自动向对方发送回应信号, 未知节点接收到信号, 计算出从发送信号到接收的时间, 除去锚节点反应时间就是双方信号传递中的往返时间, 根据传输信号的传播速度得到未知节点到锚节点的距离。

第 2 阶段: 未知节点利用获取的测量信息, 以及锚节点的位置信息, 采用多边定位法估计自身的位置。

假设节点的坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, 它们到未知节点 S 的距离分别为 d_1, d_2, \dots, d_n , 根据以上条件有

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03006-002)

作者简介: 鲁旭阳(1987—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 无线传感器网络; 张效义, 教授; 刘广怡, 博士研究生

收稿日期: 2011-11-10 **修回日期:** 2012-01-06 **E-mail:** lulu123yiyi@126.com

如下关系式^[1]:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = d_2^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n^2 \end{cases} \quad (1)$$

使用多边形定位法可以得到未知节点 S 的估计坐标矩阵形式^[1]:

$$\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (2)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ 2(x_2 - x_n) & 2(y_2 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

在算法的第 2 阶段中,对未知节点进行定位至少需要 3 个锚节点。而无线传感器节点通常随机布设在监控区域,节点分布不均匀,尤其在稀疏网络中,节点平均连通度较低,容易出现未知节点因获取的定位信息的不足而无法进行定位的情况。

3 算法的改进和补充

针对基于 TOF 测距节点定位算法在锚节点密度不高、节点连通性较低的网络中的局限性,本文在传统算法的基础上分 2 个步骤对其进行改进:(1)对初始估计位置进行迭代求精,达到精度门限的升级为锚节点,提高网络的锚节点密度。(2)如果网络中存在不良节点,对不良节点进行估计分类,并实现了对不良节点的定位。

3.1 初始估计坐标的优化

为了缓解锚节点密度较低的问题,可以将已定位的节点升级为锚节点,但由于多边形定位法受测距误差影响较大,定位精度不高,会造成比较严重的误差累计^[7]。因此,本文采用基于泰勒级数展开的最小二乘法对初始估计结果进行迭代求精,提高定位精度,降低误差积累。令:

$$f(x, y) = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} \quad (3)$$

将式(3)在点 (x_0, y_0) 处泰勒展开,忽略高阶偏导数的影响,得到:

$$f(x_0 + h, y_0 + k) = \sqrt{(x_0 - x_n)^2 + (y_0 - y_n)^2} + \frac{(x_0 - x_n)}{\sqrt{(x_0 - x_n)^2 + (y_0 - y_n)^2}} h + \frac{(y_0 - y_n)}{\sqrt{(x_0 - x_n)^2 + (y_0 - y_n)^2}} k$$

将上式代入式(1), (x_0, y_0) 的初始值取式(2)的估计位置坐标,采用最小二乘法解此方程组。解得 h 、 k 后,判断式(4)是否成立。

$$\sqrt{h^2 + k^2} < \eta_{\text{threshold}} \quad (4)$$

若成立,停止计算;否则,将 (x_0, y_0) 增加步长 $\left(\frac{h}{2}, \frac{k}{2}\right)$

后代入重新计算,直到式(4)满足,解得的 (x_0, y_0) 即为所求节点的坐标。

尽管升级后的锚节点经过了迭代求精,但仍存在定位误差。在接下来有升级后锚节点参与的定位过程中,采用加权最小二乘进行解算^[8]:

$$\hat{X} = (A^T W A)^{-1} A^T W b$$

其中, W 为权值矩阵,它由节点自身的定位误差 μ 和节点间的测距误差 δ 共同决定,锚节点相对于未知节点的权值为 $\frac{1}{\sqrt{\mu^2 + \delta^2}}$ 。

3.2 对不良节点的定位

3.2.1 不良节点的分类

不良节点是指在无线传感器网络中,待定位节点获得定位信息不足,不能确定位置的节点。除孤立节点(未知节点通信范围内没有其他节点)外,主要有以下 3 种情况:

(1)在未知节点 B 的通信范围内仅存在一个已确定位置的节点 A ,如图 1 所示。显然,只通过一个测距信息是无法对未知节点进行定位的,因为未知节点 B 可能在 B_1 B_2 B_3 等圆周上任意一点。

(2)在未知节点 B 的通信范围内只有 2 个已确定位置的节点 A 和 C ,利用测距结果进行定位会得到关于 AC 轴对称的 2 个坐标点 B_1 B_2 ,如图 2 所示,而这 2 个点都有可能是未知节点 B 的坐标。

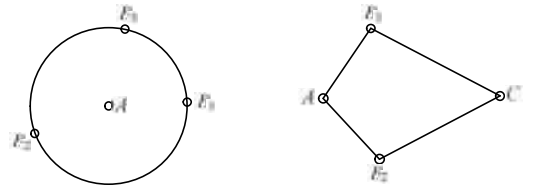


图 1 不良节点情况(1)示意图 图 2 不良节点情况(2)示意图

(3)与未知节点相邻的已确定位置的节点不少于 3 个,但是位置比较特殊,所有锚节点在一条直线上,这样也无法对位置节点进行定位。

在网络平均连通度较低的情况下,不良节点出现的概率比较大,而传统的基于 TOF 测距的定位算法是无法解决不良节点的定位问题的。第(1)种情况的不良节点获得定位信息严重不足,可以对其粗略地估算,无法获得精确的定位结果^[9]。为了提高整体定位覆盖率,将对第(2)种、第(3)种不良节点进行位置估计,实现精度较高的定位。

3.2.2 对不良节点的解决方案

不良节点情况(3)可以转化为情况(2),在 3 个锚节点中选择其中 2 个参与定位。未知节点仅与 2 个锚节点能够通信,通过 TOF 测距技术分别计算未知节点到每个锚节点距离 d_1 、 d_2 ,以下将根据测距结果分 3 种情况对未知节点进行定位。

(1)当其中一个测距结果相对比较小(小于某个门限值 ε_1)时,说明未知节点靠近其中一个锚节点。测距过程中

往往存在误差, 如果测距结果在测距误差范围内, 可以将该锚节点近似作为未知节点的估计位置。因此, 设定门限值 $\varepsilon_1 = \delta'$, 其中, δ' 为测距误差。

(2) 当测距结果都大于门限值 ε_1 时, 分别以锚节点坐标为圆心, 其相应的测距结果为半径作圆。如果两圆没有交点, 用直线连接两圆心, 会产生 4 个交点, 取其中 2 个距离最近的 2 个交点的中点作为未知节点位置^[9]。当两圆相交于两点时, 求解方程组(1)分别得两点坐标:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, y = \frac{(t_1 - xt_2)}{t_3}$$

其中, $a = t_2^2 + t_3^2$; $b = 2(y_1 t_2 t_3 - t_3^2 x_1 - t_1 t_2)$; $c = t_3^2 x_1^2 + t_1^2 - 2y_1 t_1 t_3 + y_1^2 t_3^2 - d_1^2 t_3^2$; $t_1 = r_2^2 - r_1^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2$; $t_2 = 2(x_1 - x_2)$; $t_3 = 2(y_1 - y_2)$ 。

如果两交点之间距离相对比较小(小于门限值 ε_2), 取两交点连线的中点作为未知节点位置。一般情况下 $\varepsilon_2 = 2\varepsilon_1$, 因为这时中点到两点的距离在测距误差范围内。

(3) 当两交点之间距离大于门限值 ε_2 时, 需要在 2 个交点中排除一个错误结果。查找 2 个锚节点一跳范围内所有已确定位置的节点, 其坐标为 p_i , $3 \leq i \leq n$ 。由于未知节点一跳范围内只有 2 个锚节点 p_1 和 p_2 , 因此未知节点必然在节点 p_i 的通信范围之外, 即: $\|p - p_i\| \geq R$ 。其中, $\|\cdot\|$ 表示节点间欧式距离; R 表示节点的通信半径。将 2 个交点坐标分别代入该约束条件, 选出符合要求的其中一点作为未知节点坐标。

4 仿真比较

本文利用 Matlab 软件对上述算法进行仿真, 并对仿真结果进行比较分析。在 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的区域内随机布设 100 个传感器节点, 假设测距误差服从均值为 0、标准差为 3 的正态分布^[10], 迭代门限值 $\eta_{\text{threshold}}$ 设为 0.5, 门限 ε_1 和 ε_2 分别为 3 m、6 m。仿真的实现流程如图 3 所示。

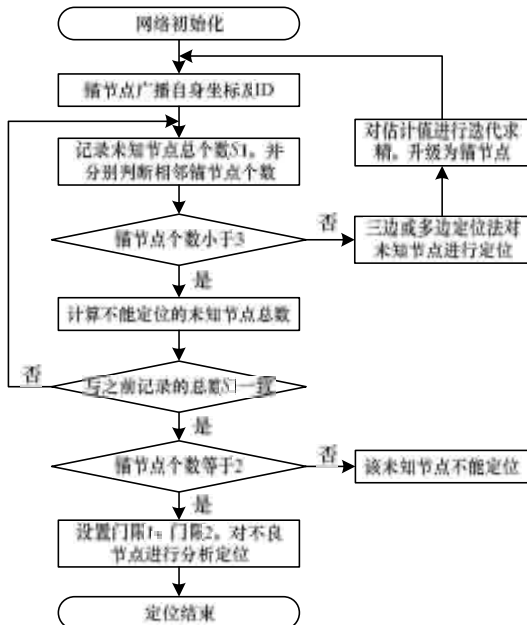


图3 改进算法流程

$$\text{定位误差: } e_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

$$\text{平均定位误差: } p = \frac{\sum_{i=1}^m \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2}}{mR}$$

$$\text{定位覆盖率: } c = \frac{\text{loca_s}}{s}$$

其中, x_i 、 y_i 为第 i 个节点的真实位置; \hat{x}_i 、 \hat{y}_i 为第 i 个节点的估计位置; m 为已定位的未知节点个数; R 为通信半径; loca_s 和 s 分别为能够确定坐标位置的节点数和区域内的节点总数。

图 4 是在锚节点密度设定为 20%, 通过调节节点通信距离来控制平均连通度变化的情况下, 各算法定位覆盖率的比较。在图中定位覆盖率随着平均连通度的增加而变大, 改进后算法定位覆盖率大于传统算法。将已定位节点升级为锚节点可以很大程度上提高定位覆盖率, 但是在连通度较低的情况下, 不良节点出现的比例较大, 经过不良节点定位算法后, 定位覆盖率有了更大的提高, 当平均连通度接近 13 时, 改进后的算法定位覆盖率达 98%。

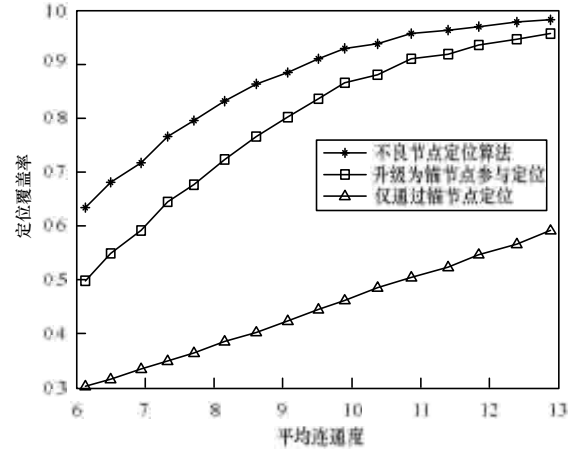


图4 定位覆盖率与平均连通度的关系

图 5 是在平均连通度设定为 6, 锚节点密度从 20% 线性增加的情况下, 各算法定位覆盖率的比较。定位覆盖率随着锚节点密度的增加而变大, 当锚节点密度达到 40% 的情况下, 改进后的定位覆盖率大约 91%。总体来说, 平均连通度对定位覆盖率的影响大于锚节点密度。

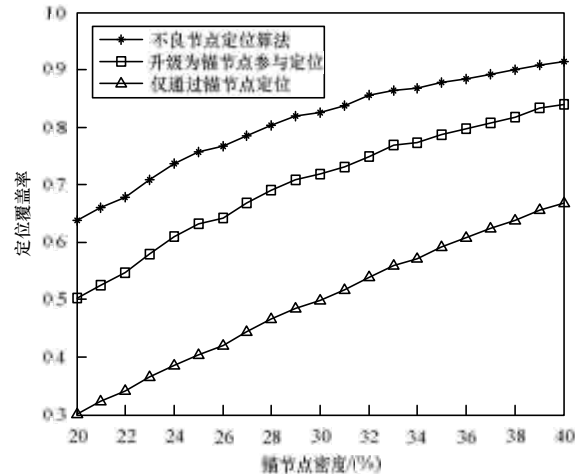


图5 定位覆盖率与锚节点密度的关系

图6为平均连通度设定为8,锚节点密度从20%线性增加的情况下,各算法平均定位误差的比较。图7为锚节点密度设定为20%,通过调节节点通信距离控制平均连通度变化的情况下,各算法平均定位误差的比较。

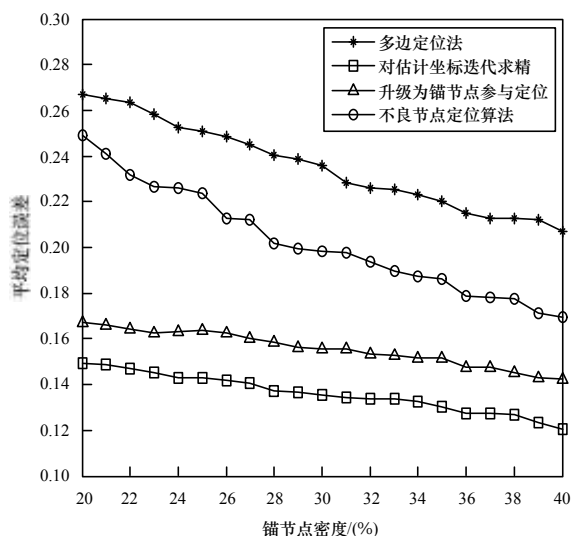


图6 平均定位误差与锚节点密度的关系

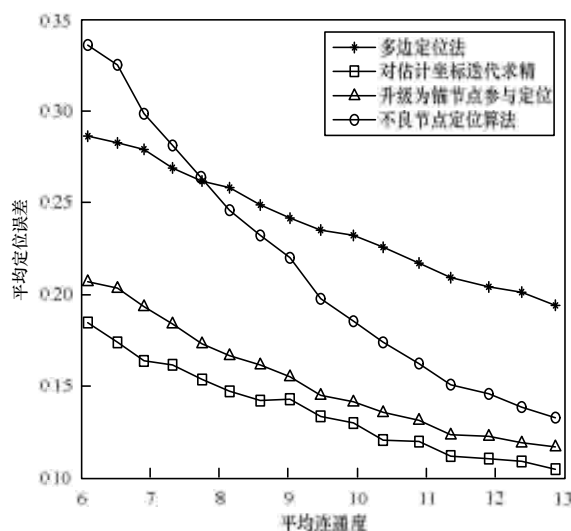


图7 平均定位误差与平均连通度的关系

图6和图7显示了改进前后的平均定位误差的变化情况,在图中改进后定位算法在定位误差方面不及经过求精的传统算法优异,但是结合图4和图5可以发现,在同等条件下定位覆盖率却有很大程度的提高,用适当的平均定位误差为代价换取了定位覆盖率的提高。图7中当平均连通度小于7.8时不良节点定位算法平均定位误差大于多边形定位法,这是由于不良节点获取的定位信息受限,对其进行了相对比较粗略的位置估计,定位精度较低,而平均连

通度低时不良节点在所有未知节点中的比例较大,造成了整体平均定位误差的增大,随着平均连通度的增大,未知节点通信范围内的锚节点数量增大,不良节点比例减少,不良节点定位算法的平均定位误差迅速下降。

5 结束语

基于TOF测距的节点定位算法计算简单、精度较高,在实际中有比较广泛的应用,本文针对其在稀疏网络中定位覆盖率较低的问题,从已定位节点和不良节点2个方面入手提出了改进算法。通过仿真比较,不良节点定位算法的平均定位误差较传统算法有所增大,但在节点定位覆盖率方面却有明显改善。

参考文献

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] 孔军,季海波. 基于加权变尺度法的无线传感器网络定位[J]. 计算机工程,2009,35(21): 108-110.
- [3] McCrady D D, Doyle L, Forstrom H. Mobile Ranging Using Low-accuracy Clocks[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(6): 951-958.
- [4] Lanzisera S, Lin D T, Pister K S J. RF Time of Flight Ranging for Wireless Sensor Network Localization[C]//Proc. of International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems. [S. l.]: IEEE Press, 2006: 1-12.
- [5] 常华伟,王福豹,严国强. 无线传感器网络的TOF测距方法研究[J]. 现代电子技术,2011,34(1): 35-38.
- [6] 梁玉琴,曾庆化,刘建业. 基于UKF滤波的WSN节点定位研究[J]. 传感技术学报,2010,23(6): 878-882.
- [7] Langendoen K, Reijers N. Distributed Localization in Wireless Sensor Networks: A Quantitative Comparison[J]. International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2003, 43(4): 499-518.
- [8] 于宁,万江文. 无线传感器网络定位求精方法[J]. 高技术通讯,2008,18(10): 1017-1022.
- [9] Chan F K W, So H C. Accurate Distributed Range-based Positioning Algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2009, 57(10): 4100-4105.
- [10] Karalar T C, Rabaey J. An RF ToF Based Ranging Implementation for Sensor Networks[C]//Proc. of IEEE International Conference on Communication. [S. l.]: IEEE Press, 2006: 3347-3352.

编辑 顾逸斐