

# WSN 中存在测距误差的无锚点分布式自定位方法

李颖<sup>1</sup>, 陈彭<sup>2</sup>, 袁飞<sup>3</sup>, 杨光松<sup>2</sup>, 蒋起极<sup>2</sup>

(1. 集美大学诚毅学院, 福建 厦门 361021; 2 集美大学信息工程学院, 福建 厦门 361021;  
3. 厦门大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361005)

**[摘要]** 无线传感器网络中, 采用 RSSI 方法进行自定位时, 测距误差会影响定位精度。提出了一种分布式的无锚点定位方法, 在对测距误差进行正确估计的基础上, 求得各节点的相对位置。首先将测距误差定义为一个目标函数, 使用最速下降法来分布式地求解全局非线性优化问题, 以使这个目标函数最小化, 然后利用节点间的估计距离与实际测量距离的偏差值来修正节点的估计坐标。仿真实验对各种影响参数进行了评估, 结果证明: 在无锚节点且距离测量值存在误差的情况下, 满足一定的节点连通度时, 能够提高节点定位精度。

**[关键词]** 无锚点; 无线传感网; 测距; 误差; 分布式定位

**[中图分类号]** TP 393; TN 915

## Anchor-free Distributed Self-localization Method in Wireless Sensor Network with Range Errors

LI Ying<sup>1</sup>, CHEN Peng<sup>2</sup>, YUAN Fei<sup>3</sup>, YANG Guang-song<sup>2</sup>, JIANG Qi-ji<sup>2</sup>

(1. Chengyi University College, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Information Engineering College, Jimei University, Xiamen 361021, China; 3. School of Information Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** In wireless sensor networks, the existing range errors will affect the position accuracy when using RSSI method to locate the nodes' position. Based on the correct estimation of range errors, a distributed location method is proposed, to found the node's position. By using the steepest descent method, an object function of range errors is defined to solve the global nonlinear optimization problem and hence minimize this object function. Due to the estimated distance between the nodes and the deviation value of the actual measurement distance one can update the estimated coordinates of the node. With the existence of range errors and certain requirement of connectivity of nodes, the result shows that the nodes position will be distributed estimated correctly.

**Keywords:** anchor free; WSN; range; error; distributed location

## 0 引言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)作为一种全新的信息获取和处理技术在目标跟踪、入侵监测及一些定位相关领域有广泛的应用前景。定位技术在无线传感器网络中有着非常重要的

[收稿日期] 2015-12-30

[修回日期] 2016-03-15

[基金项目] 福建省自然科学基金(2015J01267); 福建省教育厅科研项目(JA15650, JA15257); 厦门市科技局项目(2014S0884, 3502Z20153010)

[作者简介] 李颖(1983—), 女, 硕士生, 从事无线传感器网络方向研究. 通信作者: 杨光松(1968—), 男, 教授, 从事无线通信方向研究, E-mail: gsyang@jmu.edu.cn.

作用。掌握节点位置分布,不仅可以对目标领域进行数据跟踪,而且有助于提高路由效率,均衡负载和拓扑控制。由于无线传感器设备价格、功耗和硬件条件的限制以及对定位精度的要求,如何实现低成本、低功耗和高精度的定位方法一直是研究者们关注的课题。最简单的定位方法是采用卫星定位技术,这种方法精度高,但受限于成本高、功耗大、扩展性有限等实际问题,并且在室内等特殊区域无法实现有效定位。因此需要采用一定的机制与算法来实现 WSN 的自身定位。

WSN 中的自定位技术,通常分有锚点和无锚点的定位两种<sup>[1]</sup>。有锚点的定位又分为基于测距方式和无需测距方式。前者从信号到达时刻 (time of arrival, TOA)、到达时间差 (time difference of arrival, TDOA)、接收信号强度 (received signal strength, RSS) 等<sup>[2]</sup>几方面,推测节点之间的距离和信号到来的方向 (angle of arrival, AOA); 后者依靠锚节点及交互信息,从相互之间位置关系、跳数等来推测节点的位置,如质心法、DV-HOP 法、APIT 法等<sup>[2]</sup>。无锚点的协议,不需要通过 GPS 或锚节点提供定位标准,而是通过测量通信节点对彼此间的距离和连通性关系来确定节点位置,来决定整个网络的相对坐标和拓扑结构<sup>[3]</sup>,它计算的是相对问题,是采用概率分布等方法计算相对距离,可以在路由协议中应用,也可以在少量锚节点的情况下转换成绝对位置。常用的无锚节点算法有 AFL<sup>[4]</sup>、ABC<sup>[5]</sup>、MDS<sup>[6]</sup>等。

在上述技术中,通常需要测量节点间的距离并通过节点彼此间的信息交换来判定节点的相对坐标位置<sup>[7]</sup>,但是,由于信道条件的影响,这样会存在测距误差<sup>[8]</sup>。本研究将误差转化为目标函数,为使目标函数最小化,使用最速下降法求解非线性最优化问题来获得节点的精确位置。

# 1 系统模型及相关概念

假设通信区域内分布  $N$  个节点,部署网络时需对节点分配全网唯一的 ID 号,由于各节点能够向周围其他节点发送测距电波,采用基于 RSS 的测距方法,可通过邻节点实现测距。

## 1.1 测距误差

在实际无线通信环境中,由于多径衰减、绕射损耗、障碍物阻挡等非人为因素的干扰,测量出的距离存在误差。在节点  $i$  和节点  $j$  之间,测量距离  $d_{ij}$  和实际距离  $d_{ij}^0$  之间的关系可表示为:  $d_{ij} = d_{ij}^0(1 + e_{ij})$ , 其中,  $e_{ij}$  是  $[-e_{\max}, e_{\max}]$  之间随机生成的误差值,  $e_{\max}$  是最大误差界限。

## 1.2 相对位置转换

在二维无线传感器网络中,可以对某个节点建立相对坐标系。对于位于坐标  $w = (w_x, w_y)$  的某个节点,其相对位置变化可以用平移、正转、反转等三个变换进行描述,定义围绕原点正向旋转  $\alpha$  后的正转变换为:

$$T_{\alpha}(w) = (w_x \cos \alpha - w_y \sin \alpha, w_x \sin \alpha + w_y \cos \alpha); \tag{1}$$

定义  $w = (w_x, w_y)$  从  $x$ 、 $y$  方向分别移动  $p_x$ 、 $p_y$  的平移变换为:

$$T_p(w) = (w_x + p_x, w_y + p_y); \tag{2}$$

定义围绕  $x$  轴、 $y$  轴翻转的翻转变换为:

$$T_f(w) = (-w_x, w_y). \tag{3}$$

于是,节点的相对位置可描述为:网络中所有节点,同时使用其中的一种或者几种组合变换得到的位置坐标。

## 1.3 相对位置的估计及优化

假设网络中有  $N$  个节点,  $\hat{w}_i$  是节点  $i$  的位置估计值,  $d_{ij}$  是节点  $i$  和  $j$  之间用 RSS 测量得到的测量距离,  $M(i)$  是  $i$  节点通信范围内邻居节点的集合。定义网络内所有节点的估计误差  $\varepsilon(\hat{w}_1, \dots, \hat{w}_N) = \sum_{i=0}^N \sum_{j \in M(i)} (|\hat{w}_i - \hat{w}_j| - d_{ij})^2$ ,  $\varepsilon(\hat{w}_1, \dots, \hat{w}_N)$  是估计值和用 RSS 测量到的节点位置的方差和。

相对位置的估计问题,即使得  $\varepsilon(\hat{w}_1, \dots, \hat{w}_N)$  最小:

$$(\hat{w}_1, \dots, \hat{w}_N) = \operatorname{argmin}(\varepsilon(\hat{w}_1, \dots, \hat{w}_N)). \tag{4}$$

当所有的节点判断正确时,  $|\hat{w}_i - \hat{w}_j| - d_{ij} = 0$ , 从而  $\varepsilon(\hat{w}_1, \dots, \hat{w}_N) = 0$ 。

在求得相对坐标后, 可以用式 (1) — 式 (3) 变换坐标得到节点的绝对坐标, 例如, 对于旋转操作来说, 可以根据式 (1) 重新计算旋转角度:

$$\varepsilon_r(\alpha) = \sum_{k=0}^N \{ [w_{kx} - (\hat{w}_{kx} \cos \alpha - \hat{w}_{ky} \sin \alpha)]^2 + [w_{ky} - (\hat{w}_{kx} \sin \alpha + \hat{w}_{ky} \cos \alpha)]^2 \}。$$

求导可得  $\varepsilon_r(\alpha)/d\alpha = -2 \sum_{k=0}^N [w_{kx}(-\hat{w}_{kx} \sin \alpha - \hat{w}_{ky} \cos \alpha) + w_{ky}(\hat{w}_{kx} \cos \alpha + \hat{w}_{ky} \sin \alpha)]$ , 再用牛顿法求解, 可得

$$\alpha(n+1) = \alpha(n) - \varepsilon_r(\alpha(n))/[d\varepsilon_r(n)/d\alpha]。$$

用同样的方法, 可以进行相对坐标的平移变换和翻转变换。

## 2 基于最速下降法的无锚节点定位算法

### 2.1 最速下降法

最速下降法 (steepest descent method) 是一种无约束最优化方法 (unconstrained optimization method, UOM), 其目的是找到一个最优值  $x^*$ , 使目标函数  $f(x) \rightarrow \min$ 。假设  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$  是  $n$  维变量, 从任意初值  $\mathbf{x}_0$  出发, 然后在某点沿梯度减小的方向进行搜索, 使目标函数值向更小的方向更新。

通过求  $f(x)$  的梯度  $f_x = \partial f / \partial \mathbf{x}$ , 可以求得其方向矢量为  $\mathbf{d} = -\nabla f(\mathbf{x}) = -[f_{x_1}(\mathbf{x}), f_{x_2}(\mathbf{x}), \dots, f_{x_n}(\mathbf{x})]^T$ , 迭代式为:

$$\mathbf{x}^{i+1} = \mathbf{x}^i + \alpha^i \mathbf{d}^i。 \quad (5)$$

然后用式 (1) 逐渐迭代,  $\alpha^i$  是步长, 当  $\mathbf{d}^i$  约等于零时, 迭代终止, 即可求得  $\min f(\mathbf{x})$  的最优解  $\mathbf{x}^*$ 。

### 2.2 算法主要思想

建立目标函数, 通过目标函数来估算坐标修正值, 进而不断调整节点坐标。运用这个思路, 可通过节点的估计坐标来计算彼此间的估计距离, 从而利用节点间的估计距离与实际测量距离的偏差值来修正节点的估计坐标。式 (4) 给出了一个评估节点定位精度的目标函数, 通过计算使目标函数  $f$  最小化, 各节点就可以获得在整个网络系统中相对坐标最优的估计值。假设节点  $i$  的  $n$  次迭代位置的估计值为:  $\hat{w}_i(n) = (\hat{w}_{xi}(n), \hat{w}_{yi}(n))$ , 根据迭代式 (5), 其更新式可以表示为:

$$\hat{w}_i(n+1) = \hat{w}_i(n) - \beta \partial \varepsilon / \partial \hat{w}_i \big|_{\hat{w}_i = \hat{w}_i(n)}, \quad (6)$$

这里  $\partial \varepsilon / \partial \hat{w}_i = \sum_{j \in M(i)} \partial (|\hat{w}_i - \hat{w}_j| - d_{ij})^2 / \partial \hat{w}_i = 2 \sum_{j \in M(i)} (|\hat{w}_i - \hat{w}_j| - d_{ij}) \partial (|\hat{w}_i - \hat{w}_j|) / \partial \hat{w}_i = 2 \sum_{j \in M(i)} (1 - d_{ij} / |\hat{w}_i - \hat{w}_j|) (\hat{w}_i - \hat{w}_j)$ ;  $\beta$  是最速下降法的步长, 反复迭代, 直到收敛于获得最小  $\varepsilon(\hat{w}_1, \dots, \hat{w}_N)$  的  $(\hat{w}_1, \dots, \hat{w}_N)$ 。此解法, 对于已知的一个或者多个节点, 皆有解。

对于无锚点的定位方法, 在求出相对坐标后, 需要进行旋转、平移等操作。

### 2.3 算法实现过程

本算法采用分布式的处理方法, 区域内的传感节点需要独立地估计其自身的相对位置。因此, 每个节点保持其自身的相对位置的估计值的同时, 传感节点周期性地在周围环境广播其估计的相对位置。其具体过程为: 1) 网络部署和初始化过程, 所有节点赋予全网 ID 编号; 2) 节点发起自定位过程广播, 通过接收到的广播信号的 RSS 估计自己到邻居节点之间的距离, 以获取邻居节点列表和相邻节点之间的测距值; 3) 每个传感器广播自己的相对位置的估计值; 4) 各节点根据自己的估计值、周围节点的估计值、自己的到周围节点的测量值, 用最速下降法计算自己的相对位置估计值; 5) 如果定位精度不满足要求, 则返回步骤 2)。

在分布式处理中, 在最速下降法的情况下最初的估计值只能选择一个。为了降低转换的自由度, 以基准坐标作为原点的不用更新, 而有多锚节点时也是如此。在获取相对坐标系后, 再进行平移、旋转, 便可得到绝对坐标值。

3 仿真及评估

在 100 m × 100 m 的区域内随机布置  $N$  个节点, 采用对数阴影模型模拟复杂环境。定义定位的平均估计误差率  $E_A = \sum_{i=0}^N |p_i - \hat{p}_i| / (N \times R)$ , 用以衡量估计值和实际值的精度, 其中  $R$  是节点通信半径。先对估计的相对值进行平移、旋转等操作, 然后与实际值进行比较, 取其平均值。网络连通度是指网络中节点的平均邻居节点个数。当总节点个数为 100、200、300 时, 通信半径为 20 m 时, 其连通度分别为: 10.76、20.89、30.63。仿真时, 每次运行 20 次后取连通度的平均值。

图 1 为节点真实坐标与定位结果的比较, 图 2 为节点通信半径与估计误差之间的关系。从图 2 中可见, 随着节点通信半径的增大, 其覆盖的邻居节点数增多, 即用于计算比较的节点数增多, 因而平均估计误差率会降低。因此, 在使用本算法时必须满足一定通信半径的要求。另外, 在通信半径低于 40 m 时, 节点密度增大, 而随着通信连通度的增加, 定位误差会有所降低, 因此连通度会对其性能造成影响。

图 3 统计了不同连通度下估计误差的分布情况。由图 3 可见, 当连通度为 10 时, 估计误差小于 1 m 的节点占总节点数的比率仅为 10% 左右, 误差大于 3 m 的节点占比接近 20%; 而当节点密度增大, 连通度为 40 时, 误差小于 1 m 的节点占比达 57%, 误差大于 3 m 的节点占比小于 1%。所以在使用本算法时, 节点密度要满足一定的要求。

图 4 说明了测距误差和估计误差的关系, 当测量误差增加时, 估计误差也会随之增加。当节点数增多时, 平均估计误差呈下降的趋势。

通过比较在不同通信半径下的评估误差率, 可评估不同协议的性能。假定节点总数为 100, 由图 5 可见: 在通信半径小于 40 m 时, 本算法误差较大, 这与图 2、图 3 的分析一致; 但当通信半径大于 40 m, 又不存在测距误差时, 本算法与常规的 MDS-MAP 性能相似, 而存在测距误差时, 采用本算法会得到较好的性能。

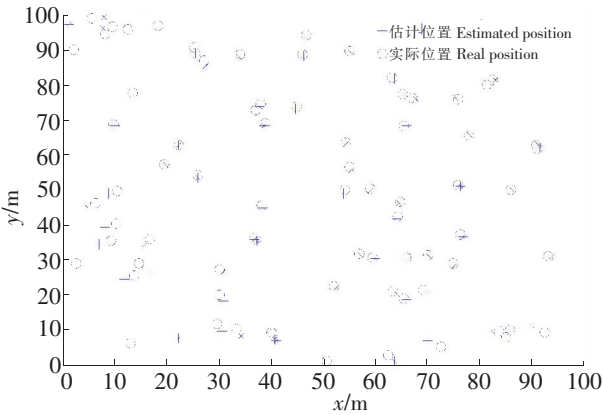


图 1 节点真实坐标与定位结果的比较  
Fig.1 Comparison of real node coordinates and positioning result

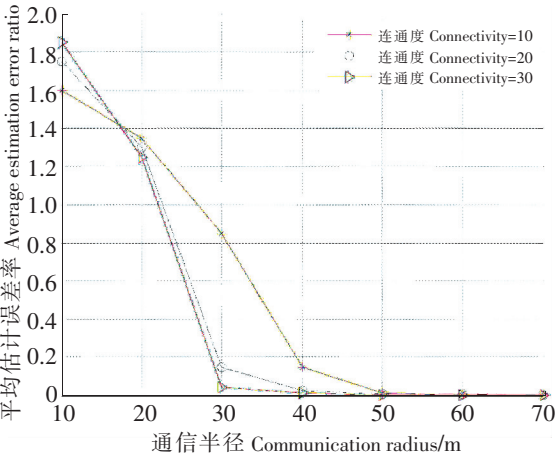


图 2 通信半径与估计误差的关系

Fig.2 The relationship between communication radius and estimation error

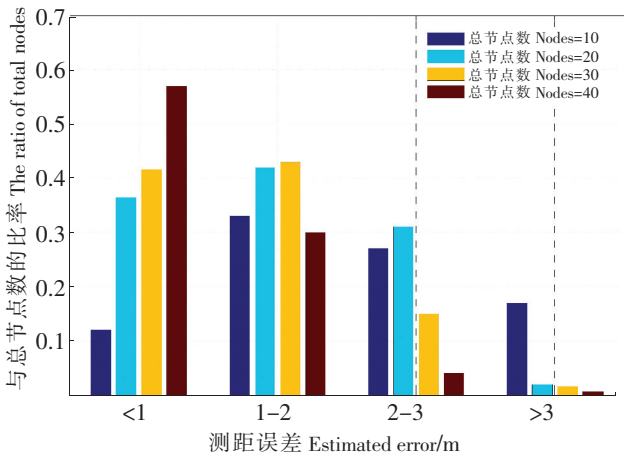


图 3 平均估计误差分布情况

Fig.3 The distribution of the average estimated error

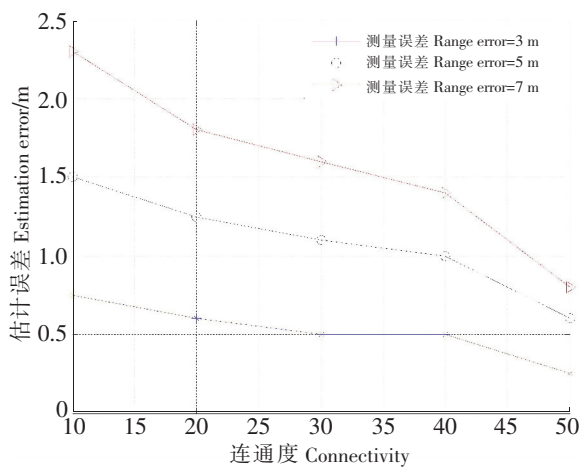


图 4 不同连通度下的测距误差与估计误差的关系

Fig.4 Ranging error and estimation error on different connectivity

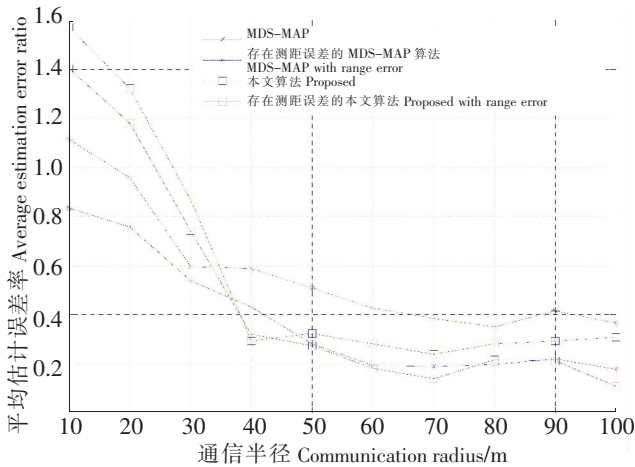


图 5 本文算法与 MDS-MAP 算法的比较

Fig.5 Comparison of the proposed algorithm and MDS - MAP

4 结论

本方案通过测量邻居节点间距离，在不用锚节点的情况下，推测节点之间的相对位置。在使用 RSS 测量距离时，易受环境的影响，使节点的测距存在误差，因而将误差包含在目标函数中，使问题的解转化成一种非线性优化问题以确定所有传感器的相对位置。仿真结果证明，本方案使用最速下降法求解最优问题，当连通度较小时，本算法误差较大，体现不出优势；但当连通度较大时，即使存在测距误差，也能够分布式地精确定位，其性能优于常规的 MDS-MAP 算法。

[ 参考文献 ]

[1] BAL M, LIU M, SHEN W. Localization in cooperative wireless sensor networks: a review//Proceedings of the 2009 13th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. San Diego, USA: IEEE, 2009: 438-443. DOI:10.1109/CSCWD.2009.4968098.

[2] 王圣超. 无锚点定位技术与应用. 重庆: 重庆大学, 2012: 18-21.

[3] SHIODA S, SHIMAMURA K. Anchor-free localization: estimation of relative, locations of sensors//Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium on Digital Object Identifier. London: IEEE, 2013: 2087-2092. DOI:10.1109/PIMRC.2013.6666488.

[4] PRIYANTHA N B, BALAKRISHNAN H, DEMAINE E. Anchor free distributed localization in sensor network. MIT Laboratory for Computer Science (Tech Report), 2003: 340-341. DOI:10.1145/958491.958550.

[5] SAVARESE C, RABAEY J M, BEUTEL J. Locationing in distributed Ad-Hoc wireless sensor networks//2001ICASSP. Piscataway, N J: IEEE, 2001: 2037-2040. DOI:10.1109/ICASSP.2001.940391.

[6] SHANG YI, RUM L W, ZHANG YING. Localization from mere connectivity//Proc of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. New York, USA: ACM, 2003: 201-212. DOI:10.1145/778415.778439.

[7] MISTRY H P, MISTRY N H. RSSI based localization scheme in wireless sensor networks: a survey. International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies (ACCT), 2015, 7(3): 647-652. DOI:10.1109/ACCT.2015.105.

[8] WARD J R, YOUNIS M. On the effect of imperfect range estimates on base station anonymity in wireless sensor networks//2013 IEEE Military Communications Conference, MILCOM 2013. San Diego, USA: IEEE, 2013: 605-610. DOI:10.1109/MILCOM.2013.109.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄振坤)