

基于质心迭代估计的无线传感器网络节点定位算法

蒋锐 杨震

An improved centroid localization algorithm based on iterative computation for wireless sensor network

Jiang Rui Yang Zhen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 030101 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.030101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.030101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于生命期模型的无线传感器网络信道分配博弈算法

Channel allocation game algorithm based on lifetime model in wireless sensor network

物理学报.2015, 64(14): 140101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.140101>

X波段微带余割平方扩展波束天线阵赋形优化遗传算法研究

Research on X band extended cosecant squared beam synthesis of micro-strip antenna arrays using genetic algorithm

物理学报.2015, 64(11): 110504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.110504>

一种无线传感器网络健壮性可调的能量均衡拓扑控制算法

Energy balance and robustness adjustable topology control algorithm for wireless sensor networks

物理学报.2015, 64(8): 080101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.080101>

一种能耗均衡的无线传感器网络加权无标度拓扑研究

Research on weighted scale-free topology with balancing energy consumption characteristics in wireless sensor networks

物理学报.2014, 63(19): 190504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.190504>

任意分集方式多输入多输出无线通信系统的统计信道建模

Statistical modeling arbitrary diversity multi-input multi-output systems

物理学报.2012, 61(18): 180101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.180101>

基于质心迭代估计的无线传感器网络 节点定位算法*

蒋锐[†] 杨震

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京 210003)

(2015年9月9日收到; 2015年11月24日收到修改稿)

针对无线传感器网络非测距定位方法的应用, 提出了基于质心迭代估计的节点定位算法. 该算法首先计算当前连通信标节点所围成的平面质心的坐标及其与未知节点间的接收信号强度, 然后用计算所得质心节点替代距离未知节点最远的连通信标节点, 缩小连通信标节点所围成的平面, 并通过多次迭代的方法提高节点定位精度. 仿真实验结果表明, 该算法的各项指标均为良好, 适用于无线传感器网络的节点定位.

关键词: 无线传感器网络, 节点定位, 非测距, 质心定位

PACS: 01.20.+x, 05.65.+b, 05.70.Np

DOI: 10.7498/aps.65.030101

1 引言

无线传感器网络是物联网的基本组成部分, 其利用多个传感器节点通过自组织的方式构成无线网络, 是物联网用来感知、识别以及处理网络覆盖区域中被监测对象的信息生产和采集系统. 随着传感器技术、嵌入式计算技术、计算机网络技术和无线通信技术等的不断发展, 无线传感器网络技术也逐渐走向成熟, 并在军事侦察、环境监测、目标跟踪、医疗护理等诸多领域的应用不断普及^[1-3].

无线传感器网络节点定位是指未知节点基于网络中位置已知的邻近信标节点, 通过有限的通信对于自身在系统中位置的估计. 传感器节点自身的准确定位是实现对所监测对象进行定位、跟踪等应用的前提, 是无线传感器网络研究的基础性问题和热点问题之一^[1]. 现有的无线传感器网络节点定位算法基本可以分为两类: 基于测距的定位算法和基于非测距的定位算法. 基于测距的定位算法通

过未知节点与邻近信标节点间的通信具体计算两者之间的距离或者方位, 并基于此实现节点自身定位. 经典算法有基于接收信号强度 (received signal strength indication, RSSI) 测距定位^[4,5]、基于信号传播时间 (time of arrival, TOA) 测距定位^[6,7]、基于信号到达时间差 (time difference of arrival, TDOA) 测距定位^[8-10]等. 该类算法对于未知节点与邻近信标节点间的距离或者角度进行精确的计算, 往往具有较高的定位精度, 但定位过程中对于节点能量消耗较大, 对网络的硬件设备要求较高, 大幅增加了网络的计算量和通信成本^[11,12]. 基于非测距的定位算法并不具体计算未知节点与邻近信标节点间的距离或者方位, 而是利用网络连通性、节点间跳数等信息实现节点自身定位. 经典算法有质心定位算法^[13]、近似三角形内点测试 (approximate point-in-triangulation test, APIT) 定位算法^[14-16]、DV-Hop (distance vector-hop) 定位算法^[17,18]、凸规划定位算法^[19]等^[20]. 相比于基于测距的定位算法, 该类算法定位精度相对较低, 但是

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB302903)、江苏省高校自然科学研究重大项目 (批准号: 14KJA510003)、中国博士后科学基金 (批准号: 2014M551631)、江苏省博士后基金 (批准号: 1302088B) 和南京邮电大学科研基金 (批准号: NY213009, NY214042) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: j_ray@njupt.edu.cn

由于不需要精确计算未知节点与邻近信标节点间的距离或者角度, 因而显著降低了定位过程中对于节点能量的消耗和网络的硬件设备要求, 减少了网络的计算量和通信成本, 在实际应用中受到越来越多的关注.

质心定位算法、APIT算法和凸规划定位算法均是利用网络邻近节点间的连通性将未知节点位置先确定在某一个区域内, 然后将该区域的质心作为该节点的估测坐标. 其中, 质心定位算法实现最简单, 定位精度也相对最低. APIT算法和凸规划定位算法则是基于质心定位算法的定位原理, 采用不同方法缩小未知节点所处的区域, 以此提高算法的定位精度. 可见, 未知节点所处的区域越小, 定位精度也就越高. 基于以上分析, 本文提出了基于质心迭代估计的节点定位算法. 该算法首先根据未知节点 O 与初始连通信标节点所围成的区域间的位置关系确定算法的迭代收敛条件, 然后通过 N 个连通信标节点的坐标及其与未知节点 O 间的接收信号强度计算当前连通信标节点所围成的区域质心的坐标及其与未知节点 O 间的距离, 然后用计算所得质心节点替代距离未知节点 O 最远的连通信标节点, 从而缩小未知节点的所处区域, 采用多次迭代达到提高节点定位精度的目的. 仿真实验结果表明, 本文算法定位精度良好且具有较好的鲁棒性, 适用于无线传感器网络的节点定位.

2 基于质心迭代估计的节点定位算法

2.1 算法原理

假设在二维平面上存在未知节点 O , 其真实坐标为 (x, y) . 与节点 O 相连通的 N 个信标节点分别为 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$, 其中第 n 个连通信标节点 S_n 坐标为 (x_n, y_n) , 与节点 O 之间距离为 d_n , 则有

$$d_n = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2} \quad (1)$$

$1 \leq n \leq N.$

考虑由 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ 围成的二维平面, 其质心 \hat{O}_1 的坐标为 $(x_{\hat{O}_1}, y_{\hat{O}_1})$, 有

$$x_{\hat{O}_1} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n, \quad (2a)$$

$$y_{\hat{O}_1} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n. \quad (2b)$$

则该质心 \hat{O}_1 与节点 O 之间距离为

$$d_{\hat{O}_1} = \sqrt{(x_{\hat{O}_1} - x)^2 + (y_{\hat{O}_1} - y)^2}. \quad (3)$$

将 (2) 式代入 (3) 式得

$$\begin{aligned} d_{\hat{O}_1} &= \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n - x\right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n - y\right)^2} \\ &= \frac{1}{N} \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N x_n - Nx\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N y_n - Ny\right)^2} \\ &= \frac{1}{N} \sqrt{\left[\sum_{n=1}^N (x_n - x)\right]^2 + \left[\sum_{n=1}^N (y_n - y)\right]^2} \\ &= \frac{1}{N} \left[\sum_{n=1}^N (x_n - x)^2 + \sum_{n=1}^N (y_n - y)^2 \right. \\ &\quad \left. + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (x_i - x)(x_j - x) \right. \\ &\quad \left. + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (y_i - y)(y_j - y) \right]^{1/2}. \quad (4) \end{aligned}$$

其中, 当 $i \neq j$ 时, 有

$$\begin{aligned} &2(x_i - x)(x_j - x) \\ &= 2x_i x_j - 2x_i x - 2x_j x + 2x^2 \\ &= (x_i - x)^2 + (x_j - x)^2 - (x_i - x_j)^2, \quad (5a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &2(y_i - y)(y_j - y) \\ &= 2y_i y_j - 2y_i y - 2y_j y + 2y^2 \\ &= (y_i - y)^2 + (y_j - y)^2 - (y_i - y_j)^2. \quad (5b) \end{aligned}$$

将 (5) 式代入 (4) 式, 可得

$$\begin{aligned} d_{\hat{O}_1} &= \frac{1}{N} \left[N \sum_{n=1}^N (d_n)^2 - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (x_i - x_j)^2 \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (y_i - y_j)^2 \right]^{1/2}. \quad (6) \end{aligned}$$

因此, 已知 N 个连通信标节点坐标 (x_n, y_n) 及其与未知节点 O 之间距离 d_n , 通过 (2) 式和 (6) 式可以获得该连通信标节点所围成空间质心 \hat{O}_1 的坐标 $(x_{\hat{O}_1}, y_{\hat{O}_1})$ 和该质心 \hat{O}_1 与未知节点 O 之间距离 $d_{\hat{O}_1}$.

将 (6) 式进一步化简, 可得

$$d_{\hat{O}_1}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (d_n)^2 - \frac{1}{N^2} \left[\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (x_i - x_j)^2 \right]$$

$$+ \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (y_i - y_j)^2 \Big] \\ = F_1 - F_2. \quad (7)$$

其中,

$$\left\{ \begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (d_n)^2, \\ F_2 &= \frac{1}{N^2} \left[\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (x_i - x_j)^2 \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (y_i - y_j)^2 \right] \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (d_{ij})^2, \end{aligned} \right. \quad (8)$$

式中, d_{ij} 表示信标节点 S_i 与 S_j 之间的距离. 不失一般性, 假设 N 个连通信标节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ 与未知节点 O 之间距离满足以下关系:

$$0 < d_1 \leq d_2 \leq d_3 \dots \leq d_{N-1} \leq d_N, \quad (9)$$

代入 (8) 式中有

$$\left\{ \begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (d_n)^2 \leq d_N^2, \\ F_2 &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (d_{ij})^2 > 0. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

综合 (6)—(10) 式, 可得结论:

$$d_{\hat{O}_1} < d_N, \quad (11)$$

即在已知的 N 个连通信标节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ 中, 至少存在一个信标节点 S_N , 其到达未知节点 O 的距离 d_N 一定大于所求得当前质心 \hat{O}_1 与未知节点 O 之间的距离 $d_{\hat{O}_1}$. 因此, 考虑利用当前质心 \hat{O}_1 替代距离未知节点 O 最远的信标节点 S_N , 此时新的 N 个连通信标节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{N-1}, \hat{O}_1$ 所围成的平面一定小于原 N 个连通信标节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ 所围成的平面, 可以进一步缩小未知节点 O 所在平面的范围, 通过多次迭代提高节点的定位精度.

然而, 计算连通信标节点与未知节点间的距离会大幅增加网络的计算量和通信成本. 因此, 考虑利用未知节点 O 所接收到的连通信标节点的 RSSI 替代距离信息, 实现算法迭代. 假设未知节点 O 接收到第 n 个连通信标节点 S_n 的 RSSI 为 P_n , 根据信

号在自由空间传播理论有 [4,5,21]:

$$\frac{P_1}{P_n} = \left(\frac{d_n}{d_1} \right)^M, \quad (12)$$

其中, M 为常数. 对 (12) 式两边取对数, 有

$$10 \lg P_n = 10 \lg P_1 + 10M [(\lg d_1) - (\lg d_n)], \quad (13)$$

令 $d_1 = 1$, 则 P_1 为与未知节点 O 距离 1 m 处的 RSSI, 代入 (13) 式, 可得

$$10 \lg P_n = -[A + 10M (\lg d_n)], \quad (14)$$

其中,

$$A = -10 \lg P_1. \quad (15)$$

根据实际环境不同, 一般 A 值的最佳范围为 45—49, M 值最佳范围为 3.24—4.5. 根据 (12)—(15) 式, 化简可得

$$d_n^2 = 10^{-\frac{A}{5M}} P_n^{-\frac{2}{M}}. \quad (16)$$

将其代入 (7) 式, 待估计节点 O 接收到当前质心 \hat{O}_1 的 RSSI 为 $P_{\hat{O}_1}$, 计算可得

$$P_{\hat{O}_1} = \frac{10^{-\frac{A}{10}}}{\left[\frac{10^{-\frac{A}{5M}}}{N} \sum_{n=1}^N \left(P_n^{-\frac{2}{M}} \right) - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (d_{ij})^2 \right]^{\frac{M}{2}}}. \quad (17)$$

根据 (2) 和 (17) 式, 经过多次迭代可以在不计算信标节点与未知节点的具体条件下, 不断缩小未知节点 O 所在平面的范围, 提高节点定位精度.

2.2 算法迭代终止条件

正确地设定算法结束条件, 可以利用较少的迭代次数获得较好的定位精度, 同时避免算法陷入死循环中. 假设第 n 次迭代时, N 个连通信标节点为 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$, 根据 (7) 和 (8) 式可知所获得的质心 \hat{O}_n 与未知节点 O 间的距离 $d_{\hat{O}_n}$ 满足:

$$d_{\hat{O}_n}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (d_n)^2 - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (d_{ij})^2, \quad (18)$$

其中, d_n 为连通信标节点 S_n 与未知节点 O 间的距离; d_{ij} 为连通信标节点 S_i 与连通信标节点 S_j 间的距离. 同样假设 d_n 满足 (9) 式, 则第 $n+1$ 次迭代时, N 个连通信标节点为 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{N-1}, \hat{O}_n$,

根据 (8) 和 (9) 式可知所获得的质心 \hat{O}_{n+1} 与未知节点 O 间的距离 $d_{\hat{O}_{n+1}}$ 满足:

$$d_{\hat{O}_{n+1}}^2 = \frac{1}{N} \left[\sum_{n=1}^{N-1} (d_n)^2 + d_{\hat{O}_n}^2 \right] - \frac{1}{N^2} \left[\sum_{i=1}^{N-2} \sum_{j=i+1}^{N-1} (d_{ij})^2 + \sum_{i=1}^{N-1} (d_{i\hat{O}_n})^2 \right], \quad (19)$$

其中, $d_{i\hat{O}_n}$ 为连通信标节点 S_i 与第 n 次迭代所获得的质心 \hat{O}_n 间的距离. 因此两次迭代所获得的质心的定位距离满足:

$$d_{\hat{O}_n}^2 - d_{\hat{O}_{n+1}}^2 = \frac{1}{N} (d_N^2 - d_{\hat{O}_1}^2) + \frac{1}{N^2} \left[\sum_{i=1}^{N-1} (d_{i\hat{O}_n})^2 - \sum_{i=1}^{N-1} (d_{iN})^2 \right] = F_3 + F_4, \quad (20)$$

其中,

$$\begin{cases} F_3 = \frac{1}{N} (d_N^2 - d_{\hat{O}_1}^2), \\ F_4 = \frac{1}{N^2} \left[\sum_{i=1}^{N-1} (d_{i\hat{O}_n})^2 - \sum_{i=1}^{N-1} (d_{iN})^2 \right]. \end{cases} \quad (21)$$

根据 (11) 式, 易得结论 $F_3 > 0$. 假设第 n 个连通信标节点 S_n 坐标为 (x_n, y_n) , 根据 (1)—(3) 式, 可得

$$F_4 = \frac{1}{N^2} \left\{ \sum_{i=1}^{N-1} \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j - x_i \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j - y_i \right)^2 \right] - \sum_{i=1}^{N-1} [(x_N - x_i)^2 + (y_N - y_i)^2] \right\} = \frac{1}{N^2} \left\{ \sum_{i=1}^{N-1} \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j - x_i \right)^2 - (x_N - x_i)^2 \right] + \sum_{i=1}^{N-1} \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j - y_i \right)^2 - (y_N - y_i)^2 \right] \right\}, \quad (22)$$

其中,

$$\sum_{i=1}^{N-1} \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j - x_i \right)^2 - (x_N - x_i)^2 \right]$$

$$= -(N+1) \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j - x_N \right)^2, \quad (23a)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j - y_i \right)^2 - (y_N - y_i)^2 \right] = -(N+1) \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j - y_N \right)^2. \quad (23b)$$

将 (23) 式代入 (22) 式, 有

$$F_4 = -\frac{(N+1)}{N^2} \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j - x_N \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j - y_N \right)^2 \right] = -\frac{(N+1)}{N^2} (d_{N\hat{O}_n})^2 < 0, \quad (24)$$

其中, $d_{N\hat{O}_n}$ 为连通信标节点 S_N 与第 n 次迭代所获得的质心 \hat{O}_n 间的距离. 根据 (20)—(24) 式, 可得

$$d_{\hat{O}_n}^2 - d_{\hat{O}_{n+1}}^2 = \frac{1}{N} (d_N^2 - d_{\hat{O}_1}^2) - \frac{(N+1)}{N^2} (d_{N\hat{O}_n})^2. \quad (25)$$

说明虽然随着算法迭代次数的增加, 连通信标节点所围成的平面越来越小, 但是并不能保证第 $n+1$ 次迭代所获得的质心 \hat{O}_{n+1} 的定位精度一定比第 n 次迭代所获得的质心 \hat{O}_n 的定位精度高.

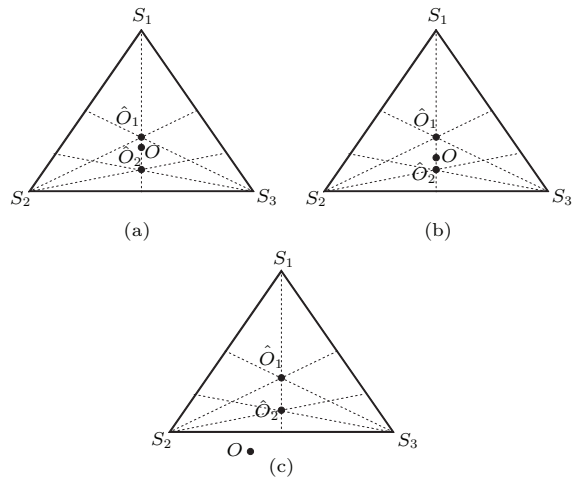


图1 未知节点与起始连通信标节点所围成的平面间的位置关系

Fig. 1. The position relationship between the unknown node and the closed area surrounded by the anchor nodes inside the unknown node's communication range.

因此如何设定算法迭代停止条件, 需要根据未知节点 O 与起始 N 个连通信标节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ 所围成的平面之间的具体位置关系而确定. 为了便于分析, 假设最简单情况, 即 $N = 3$ 时, 未知节点 O 与起始连通信标节点所围成的平面间的位置关系, 如图 1 所示. 图 1 中 $\Delta S_1 S_2 S_3$ 为等边三角形, \hat{O}_1 为 $\Delta S_1 S_2 S_3$ 的质心. 由于图中 S_1 为三个初始信标节点中距离未知节点 O 最远的信标节点, 因此本文定位算法利用 \hat{O}_1 替代 S_1 围成新的平面 $\Delta \hat{O}_1 S_2 S_3$, 其质心为 \hat{O}_2 . 图 1(a) 和图 1(b) 所示为未知节点 O 位于起始连通信标节点 S_1, S_2, S_3 所围成的平面内部, 假设未知节点 O 恰好处于直线 $\hat{O}_1 \hat{O}_2$ 连线上. 图 1(a) 中未知节点 O 位于直线 $\hat{O}_1 \hat{O}_2$ 连线偏上方, 其离质心 \hat{O}_1 距离较近; 相反, 图 1(b) 中未知节点 O 位于直线 $\hat{O}_1 \hat{O}_2$ 连线偏下方, 其离质心 \hat{O}_2 距离较近. 该分析结果与 (27) 式所得结论相吻合. 假设无论迭代多少次, 未知节点 O 始终处于新的连通信标节点所围成的平面内, 随着迭代次数的增加, 信标节点所围成的平面越来越小, 最终所围成的平面的质心可以无限接近于未知节点 O . 因此, 此时可以直接设定所获得的质心与未知节点 O 之间的距离小于某一阈值作为算法终止的条件. 根据 (17) 式, 设定算法终止条件为所获得的质心与未知节点 O 间的 RSSI 大于某一阈值:

$$P_{\hat{O}_n} > \varepsilon_1, \quad (26)$$

其中, ε_1 为设定阈值. 图 1(c) 所示为未知节点 O 位于起始连通信标节点 S_1, S_2, S_3 所围成的平面外部, 由于所围成平面的质心一定位于该平面内部, 所以随着迭代次数的增加, 连通信标节点所围成平面的质心不可能无限接近于未知节点 O , 但是却可以保证第 $n + 1$ 次迭代所获得的质心 \hat{O}_{n+1} 的定位精度一定比第 n 次迭代所获得的质心 \hat{O}_n 的定位精度高, 算法所估计的质心可以不断接近但永远无法达到未知节点 O . 因此, 此时可以设定定位算法估计精度的变化率小于某一阈值作为算法终止的条件. 同样根据 (17) 式, 设定算法终止条件为

$$P_{\hat{O}_n} - P_{\hat{O}_{n-1}} < \varepsilon_2, \quad (27)$$

其中, ε_2 为设定阈值. 综上所述, 根据未知节点 O 与起始 N 个连通信标节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ 所围成的平面之间的位置关系不同, 算法设定的迭代终止条件也不一样. 基于质心迭代估计的节

点定位算法首先需要判断未知节点 O 与起始 N 个连通信标节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ 所围成的平面之间的位置关系. 在二维平面中, N 个连通信标节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ 所围成的平面可以无缝隙地分割成以某一连通信标节点为端点的多个三角形, 考虑可以采用文献 [14—16] 所描述的 APIT 算法的基本思想, 选定某一连通信标节点为固定端点, 则可以构造出 $\frac{1}{2}(N-1)(N-2)$ 个三角形, 分别判断未知节点 O 是否在这 $\frac{1}{2}(N-1)(N-2)$ 个三角形内部. 当判断未知节点 O 在任意一个三角形内部, 即可以断定未知节点 O 在起始 N 个连通信标节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ 所围成的平面内部, 剩余的三角形则不需要继续进行判断, 选择 (26) 式作为算法迭代终止条件; 当判断未知节点 O 在所有 $\frac{1}{2}(N-1)(N-2)$ 个三角形外部, 即可以断定未知节点 O 在起始 N 个连通信标节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ 所围成的平面外部, 选择 (27) 式作为算法迭代终止条件.

2.3 算法描述

本节给出基于质心迭代估计的节点定位算法的具体流程. 算法分为两个阶段: 第一个阶段判定未知节点和初始信标节点所围成的区域间的位置关系, 以此设定合适的算法迭代终止条件; 第二阶段根据 2.1 节进行质心迭代过程, 直到定位精度满足第一阶段所设置的算法迭代终止条件停止.

图 2 所示为基于质心迭代估计的节点定位算法流程图. 需要注意的是, 当未知节点位于初始信标节点所围成的区域内部时, 为了确保在第二阶段算法迭代计算过程中未知节点始终位于连通信标节点所围成的区域内部, 我们在第一阶段判断未知节点和初始信标节点所围成的区域间的位置关系时, 记录包含未知节点的三角形端点. 在第二阶段迭代计算过程中, 如果原记录三角形的端点不被替换, 则可以保证未知节点始终位于连通信标节点所围成的区域内部; 当迭代计算过程中原记录三角形的某一端点需要被替换, 根据图 1 所示, 质心节点 \hat{O}_1 将 $\Delta S_1 S_2 S_3$ 划分成三个无重叠区域的小三角形, 即 $\Delta \hat{O}_1 S_1 S_2$, $\Delta \hat{O}_1 S_1 S_3$ 和 $\Delta \hat{O}_1 S_2 S_3$, 此时需要利用 APIT 方法测试未知节点与新构成三角形之间的位置关系. 例如在图 1(a) 中, 当端点 S_1 将被替

换, 则重新测试未知节点 O 与新构成 $\Delta\hat{O}_1S_2S_3$ 之间的位置关系. 当节点 O 位于三角形 $\Delta\hat{O}_1S_2S_3$ 内部, 则用质心 \hat{O}_1 替代 S_1 , 将原记录 $\Delta S_1S_2S_3$ 更新

为 $\Delta\hat{O}_1S_2S_3$; 当节点 O 位于 $\Delta\hat{O}_1S_2S_3$ 外部, 则保留信标节点 S_1 , 选取除 S_1 以外与节点 O 之间 RSSI 最弱的信标节点替代.

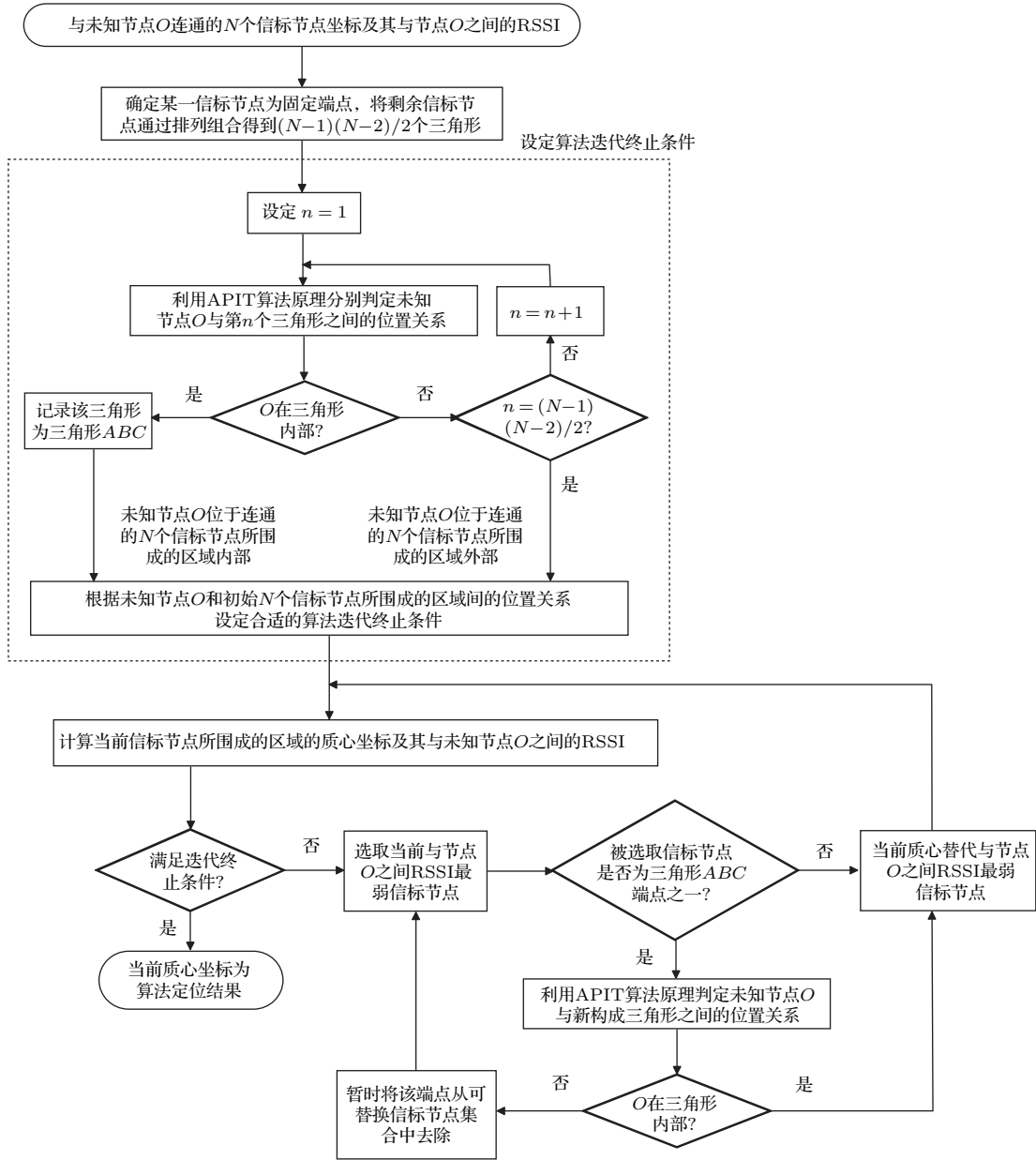


图2 基于质心迭代估计的节点定位算法流程图

Fig. 2. The algorithm flowchart of the improved centroid localization algorithm based on iterative computation for wireless sensor network.

3 仿真实验结果与分析

定义二维环境下的定位误差为

$$ERROR = \sqrt{(\hat{x} - x)^2 + (\hat{y} - y)^2}, \quad (28)$$

其中, (x, y) 为未知节点真实坐标; (\hat{x}, \hat{y}) 为定位算法估计所得未知节点坐标. 定义无线传感器网络中

M 个未知节点的平均定位误差与节点通信半径 R 的比为相对定位误差, 即

$$\overline{ERROR} = \frac{1}{MR} \sum_{i=1}^M ERROR_i. \quad (29)$$

在实际网络中会存在许多不确定性因素影响算法的最终定位精度. 然而, 无论是什么样的不确定因素, 对于定位算法性能的影响最终都可以被归

结为两类: 1) 未知节点与其通信范围内的信标节点无法正常连通; 2) 未知节点与其通信范围内的信标节点能正常通信, 但存在噪声干扰. 第一类情况会导致实际网络中真正可以与未知节点通信信标节点个数减少, 并因此造成定位算法性能的下降; 第二类情况会引起RSSI测量误差, 对定位算法性能造成影响.

为了准确地定量分析本文算法的性能, 仿真设定在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的二维平面内随机均匀分布 100 个节点, 通过改变网络中节点通信半径和信标节点比例分析与未知节点通信信标节点数量变化对于定位算法性能的影响; 通过改变RSSI误差系数分析节点定位算法的抗噪声干扰能力. 根据(16)式, 由于RSSI与距离间存在一一映射关系, 因此为了排除参数设定对于算法本身的影响, 在仿真实验中直接设定距离精度为算法迭代终止条件:

未知节点位于初始通信信标节点所围成平面内部

$$d_{\hat{O}_n} < 0.1R, \quad (30a)$$

未知节点位于初始通信信标节点所围成平面外部

$$\left| d_{\hat{O}_n} - d_{\hat{O}_{n-1}} \right| < 0.1R. \quad (30b)$$

根据以上算法参数设定, 利用蒙特卡罗仿真方法, 在不同节点通信半径、不同信标节点比例的情况下, 观察算法的相对定位误差, 结果如图3所示. 发现在信标节点比例相同的情况下, 随着节点通信半径的增加, 未知节点在通信半径内的信标节点数量也随之增加, 未知节点位于初始通信信标节点所围成的平面内部的概率增加, 因此本文算法的相对定位误差呈下降趋势. 同理, 在节点通信半径相同的情况下, 随着信标节点比例的增加, 未知节点在通信半径内的信标节点数量也随之增加. 需要注意的是在 $R = 20$ 和 $R = 25$ 的较小节点通信半径的情况下, 未知节点位于初始通信信标节点所围成的平面外部的概率增加, 算法性能不太稳定, 算法定位精度随着信标节点比例的增加出现了一些不规则的波动, 如信标节点比例为15%时, 其相对定位误差反而高于信标节点比例为10%时的相对定位误差, 但整体算法相对定位误差处于较低水平, 且大致随着信标节点比例的增加呈下降趋势, 该变化趋势在节点通信半径较大的情况下更为明显.

同理, 我们在仿真实验中利用距离测量误差系数取代RSSI测量误差系数, 观察相对定位误差受

距离测量误差系数的影响, 结果如图4所示. 首先定义距离测量误差系数为 μ , 有

$$\widehat{d}_n = (1 + \mu \times \text{RAND}(0, 1)) \times d_n \quad (31)$$

其中, $\text{RAND}(0, 1)$ 为 $(0, 1)$ 区间内的随机数, d_n 和 \widehat{d}_n 分别为待估计节点与第 n 个通信信标节点间距离的理论真实值和实际测量值. 当距离测量误差系数 $\mu = 0$ 的理想情况下, 有 $\widehat{d}_n = d_n$, 即实际测量值等于理论真实值, 此时不存在任何测量误差; 随着距离测量误差系数 μ 不断增大, 距离测量误差也越来越大.

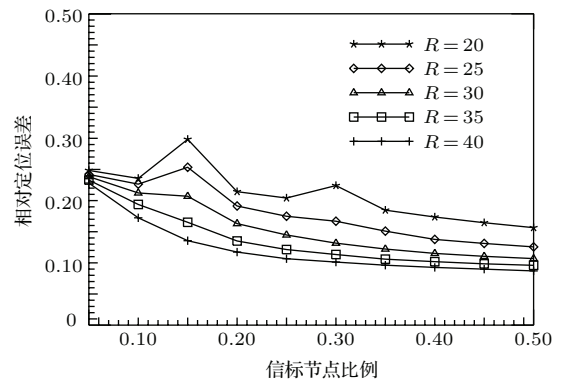


图3 相对定位误差随信标节点比例变化

Fig. 3. Influence of the density of distribution of the anchor nodes on the relative location error.

图4中分别选取节点通信半径较小的情况, 即 $R = 25$, 和节点通信半径较大的情况, 即 $R = 35$, 仿真观察距离测量误差系数变化对于算法性能的影响. 为了更加全面地说明问题, 在不同节点通信半径条件下, 分别设定信标节点比例较低为5%和信标节点比例较高为45%两种情况, 充分说明在不同节点通信半径、不同信标节点比例情况下, 距离测量误差, 即RSSI测量误差对于算法性能的影响.

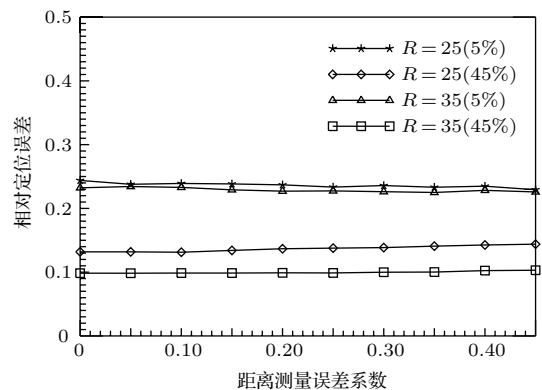


图4 相对定位误差随距离测量误差系数变化

Fig. 4. Influence of the distance measuring error on the relative location error.

由于本文算法采用基于非测距的定位方法,因此距离测量误差对于算法的影响主要体现在以下两方面.一方面,在算法初始阶段,初始信标节点需要根据RSSI大小进行排序.因此,RSSI测量误差的存在会影响初始信标节点的排列顺序.错误的排列顺序会导致算法在迭代计算过程中原本应该被替代的信标节点被保留,而计算获得的质心替代了原本不应该被替代的信标节点.该错误会在一定程度上影响算法的收敛速度,增加算法的迭代次数,但是并不影响算法的最终定位精度;另一方面,算法迭代过程中需要基于RSSI测量值根据(17)式计算的质心与未知节点间的RSSI.因此,RSSI测量误差的存在会导致质心与未知节点间的RSSI计算不准确.不正确的RSSI计算会导致质心在信标节点中的排序错误,该错误同样影响算法的收敛速度,而对于算法定位精度没有影响.同时,根据(26)和(27)式,不正确的RSSI计算会影响算法正确判断迭代终止,然而该错误对于算法定位精度影响有限.因此如图4所示,距离测量误差系数变化,即RSSI测量误差系数变化对于算法相对定位误差基本没有影响,说明本文算法具有较好的抗RSSI误差能力.

4 结 语

本文提出了基于质心迭代估计的节点定位算法.该算法通过 N 个连通信标节点的坐标及其与未知节点 O 间的RSSI计算当前连通信标节点所围成平面的质心坐标及其与未知节点 O 间的RSSI,然后用计算所得的质心节点替代距离未知节点 O 最远的连通信标节点,以此方法不断缩小连通信标节点所围成的平面,采用多次迭代达到提高节点定位精度的目的.仿真实验结果表明,本文算法采用基于非测距的定位方法,定位精度良好且抗RSSI误差能力较强,适用于无线传感器网络的节点定位.

参考文献

[1] Liu W R, He Y 2013 *EPC System Network and Wireless Sensor Networks* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p141 (in Chinese) [刘伟荣,何云 2013 物联网与无线传感器(北京:电子工业出版社)第141页]

[2] Peng H X, Zhao H, Li D Z, Lin C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 090206 (in Chinese) [彭海霞,赵海,李大舟,林川 2014 物理学报 **63** 090206]

[3] Zhang C, Fei S M, Zhou X P 2012 *Chin. Phys. B* **21** 120101

[4] Yaghoubi F, Abbasfar A A, Maham B 2014 *IEEE Commun. Lett.* **18** 973

[5] Sahu P K, Wu E H K, Sahoo J 2013 *IEEE Sens. J.* **13** 3115

[6] Yu K, Guo Y J, Hedley M 2009 *IET Signal Process.* **3** 106

[7] Xu E, Ding Z, Dasgupta S 2011 *IEEE Trans. Signal Process.* **59** 2887

[8] Bandiera F, Coluccia A, Ricci G, Ricciato F, Spano D 2014 *12th IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)* Milano, Italy, August 26–28, 2014 p193

[9] Sun D Y, Qian Z H, Han M F, Wang X 2014 *Acta Electron. Sin.* **42** 1601 (in Chinese) [孙大洋,钱志鸿,韩梦飞,王雪 2014 电子学报 **42** 1601]

[10] Tomic S, Beko M, Dinis R 2015 *IEEE Trans. Vehicular Technol.* **64** 2037

[11] Hao X C, Liu W J, Xin M J, Yao N, Ru X Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 080101 (in Chinese) [郝晓辰,刘伟静,辛敏洁,姚宁,汝小月 2015 物理学报 **64** 080101]

[12] Liu H R, Yin W X, Han T, Dong M R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 040509 (in Chinese) [刘浩然,尹文晓,韩涛,董明如 2014 物理学报 **63** 040509]

[13] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D 2000 *IEEE Personal Commun.* **7** 28

[14] Zhou Y, Ao X, Xia S X 2008 *7th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)* Chongqing, China, May 25–27, 2008 p193

[15] Yu F, Wang Q, Zhang X T, Li C 2008 *4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)* Dalian, China, October 13–21, 2008 p1

[16] Wang J Z, Jin H X 2009 *International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing (NSWCTC)* Wuhan, China, April 25–26, 2009 p719

[17] Hadir A, Zine D K, Bakhouya M, Ei K J 2014 *5th Workshop on Code, Cryptography and Communication Systems (WCCCS)* EI-Jadida, Morocco, November 27–28, 2014 p25

[18] Xiang J, Tan W W 2013 *IEEE International Workshop on Electromagnetics (iWEM)* Hong Kong, China, August 1–3, 2013 p171

[19] Doherty L, Pister K S J, Ei G L 2001 *2001 Proc of Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies* Alaska, USA, April 22–26, 2001 p1655

[20] Meng Y H, Wen Y Y, Chen J, Zhao H 2014 *Acta Electron. Sin.* **42** 1712 (in Chinese) [孟颀辉,闻英友,陈剑,赵宏 2014 电子学报 **42** 1712]

[21] Maddumabandara A, Leung H, Liu M X 2015 *IEEE Sensors J.* **15** 5228

An improved centroid localization algorithm based on iterative computation for wireless sensor network*

Jiang Rui[†] Yang Zhen

(College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210023, China)

(Received 9 September 2015; revised manuscript received 24 November 2015)

Abstract

Wireless sensor network (WSN) is a basic component of internet and it plays an important role in many application areas, such as military surveillance, environmental monitoring and medical treatment. Node localization is one of the interesting issues in the field of WSN. Now, most of the existing node localization algorithms can be divided into two categories. One is range-based measurement and the other is range-free measurement. The localization algorithm of range-based measurement can achieve better location accuracy than the localization algorithm of range-free measurement. However, they are generally very energy consuming. Therefore, the range-free measurements are most widely used in practical applications. According to the application of localization algorithm in WSN by range-free measurements, an improved centroid localization algorithm based on iterative computation for wireless sensor network is proposed. In this algorithm, the position relationship of the closed area surrounded by the anchor nodes inside the unknown node's communication range and the unknown node is obtained by approximate point-in-triangulation test at first. Different position relationships determine different stopping criteria for iteration. Then, the centroid coordinates of the closed area surrounded by the anchor nodes inside the unknown node's communication range and the received signal strength (RSSI) between the centroid node and the unknown node are calculated. The anchor node with the weakest RSSI would be replaced by the centroid node. By this method, the closed area surrounded by the anchor nodes inside the unknown node's communication range is reduced. The location accuracy is increased by the cyclic iterative method. With the change of the anchor node ratio, the communication radius of the unknown node and the effect of RSSI error, the algorithm performance is investigated by using simulated data. The simulation results validate that although the improved centroid localization algorithm performance will be lost when the number of the anchor nodes inside the unknown node communication range decreases, the new approach can achieve good performance under the condition of few anchor nodes inside the unknown node communication range and this method is of strong robusticity against RSSI error disturbance.

Keywords: wireless sensor network, node self-localization, range-free, centroid localization

PACS: 01.20.+x, 05.65.+b, 05.70.Np

DOI: 10.7498/aps.65.030101

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB302903), the Key Project supported by the Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (Grant No. 14KJA510003), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2014M551631), Project supported by the Jiangsu Postdoctoral Sustentation Fund, China (Grant No. 1302088B) and the NUPTSF (Grant Nos. NY213009, NY214042).

[†] Corresponding author. E-mail: j_ray@njupt.edu.cn