

# 无线传感器网络中一种信标节点可迁移的协作定位方法

沙 超,王汝传,孙力娟,黄海平

(南京邮电大学计算机学院,江苏南京 210003)

**摘 要:** 提出一种协作定位方法.利用邻居信标交互,获取定位环境信息,并在此基础上实现基于无效信标过滤的信号强度定位.同时,在多种定位方法协作判定下,将精度较高的已定位节点升级为信标节点.仿真结果表明,该方法同加权 RSSI 及 APIT 定位方法相比,具有较高的定位精度和定位成功率.

**关键词:** 无线传感器网络;定位;路径损耗指数;定位成功率

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 11-2625-05

## A Cooperating Localization Method Based on Beacon Transfer in Wireless Sensor Networks

SHA Chao, WANG Ru-chuan, SUN Li-juan, HUANG Hai-ping

(College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

**Abstract:** A cooperating localization algorithm is proposed. Environmental information is obtained with the help of neighbor beacon interaction and node's location could be obtained based on invalid beacon filtration as well as the signal strength detection. Furthermore, in collaboration with a variety of localization methods, node with higher localization accuracy becomes beacon. Simulation results demonstrate that this algorithm performs well on localization accuracy as well as success rate compared with the weighted RSSI and APIT algorithm.

**Key words:** wireless sensor networks; localization; path loss index; success rate of localization

### 1 引言

在无线传感器网络中,只有结合位置信息的传感数据才有意义<sup>[1]</sup>.以是否需要测距来分,目前已提出的定位方法包括基于距离的定位方法和距离无关的定位方法<sup>[2]</sup>.前者主要有基于接收信号强度衰减的定位(RSSI)<sup>[1]</sup>及其改进算法<sup>[3]</sup>、基于到达时间的定位(TOA)<sup>[4]</sup>、基于到达时间差的定位(TDOA)<sup>[5]</sup>和基于角度的定位(AOA)<sup>[6]</sup>;后者主要有质心算法、DV-HOP算法、Amorphous算法、APIT算法<sup>[7]</sup>、HOP-TERRAIN<sup>[4]</sup>算法等.

本文在上述研究基础上,针对定位算法普遍存在的可靠性低、易受外界环境干扰、易出现定位盲区等诸多问题<sup>[5]</sup>,提出一种信标节点可迁移的协作定位方法.通过信标间的交互测定环境因素,提升测距精度;过滤无效信标,提高定位精度;并在同时考虑互测距误差及协作定位误差的基础上,实现已定位节点向信标节点的角色迁移,保证了定位成功率.

### 2 方法描述

#### 2.1 信标节点最佳部署密度计算

信标节点的数量及分布,是决定定位质量的主要因素之一<sup>[8]</sup>.定义网络中信标节点的密度为  $\rho(B)$ .则  $\rho(B)$  过大会增加定位开销,而过小的  $\rho(B)$  将降低节点的定位精度及定位成功率.在全向传感器网络中,当节点分布均匀且间距为  $\sqrt{3}r$  时,网络可达到完全覆盖<sup>[9]</sup>,其中  $r$  为通信半径,如图 1.考虑到待定位节点需至少获得 3 个不共线的信标节点信息才可实现定位<sup>[4]</sup>,这里对该模型进行改进,如图 2,网络面积  $S = L \times L$ .于是,除边缘区域外,网络中大部分区域都可至少被 3 个不共线的节点覆盖.此时,网络中需要部署的信标节点个数:

$$N(B) = \begin{cases} \lfloor \frac{L}{r} \rfloor \times (\lfloor \frac{L}{r} \rfloor + 1) + \lfloor \frac{L}{4r} \rfloor \times 2 + 1, & \lfloor \frac{L}{r} \rfloor \text{为偶数} \\ \lfloor \frac{L}{r} \rfloor \times (\lfloor \frac{L}{r} \rfloor + 2) + \lfloor \frac{L}{4r} \rfloor \times 2 + 2, & \lfloor \frac{L}{r} \rfloor \text{为奇数} \end{cases} \quad (1)$$

由此,在均匀撒播的前提下,网络中信标节点的最佳部署密度:

$$\rho(B) = N(B)/S = N(B)/L^2 \quad (2)$$

收稿日期:2008-04-29;修回日期:2010-03-10

基金项目:国家自然科学基金(No.60973139, No.60773041, No.61003039, No.61003236);江苏省科技支撑计划(工业)项目(No.BE2010197, No.BE2010198);江苏省现代服务业发展专项资金;国家和江苏省博士后基金(No.0801019C, No.20090451240, No.20090451241, No.20100471353, 20100471355);江苏高校科技创新计划项目(No.CX09B\_153Z, No.CX10B-196Z, No.CX10B-197Z, No.CX10B-198Z, No.CX10B-199Z);江苏省六大高峰人才项目(No.2008118);江苏省计算机信息处理技术重点实验室基金(2010)资助

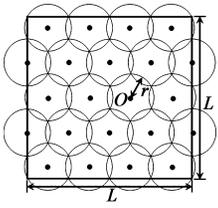


图1 无线传感器网络完全覆盖模型

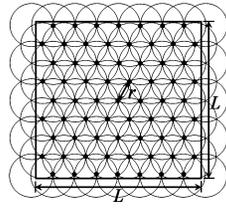


图2 无线传感器网络三重覆盖模型

## 2.2 定位环境因素测定

无线传感器网络通常采用空间传输损耗模型<sup>[10]</sup>, 即:  $RSSI(N_i, N_j) = P_T - PL(d_0) - 10 \times n(N_j)$

$$\times \lg[d(N_i, N_j)/d_0] - X_\sigma \quad (3)$$

其中,  $N_i, N_j$  分别是发送和接收节点;  $d(N_i, N_j)$  是收发双方间距;  $RSSI(N_i, N_j)$  是距离发送节点  $d(N_i, N_j)$  米处的  $N_j$  感知到的信号强度. 同文献[11]类似, 这里将发射功率  $P_T$  统一为  $-5\text{dBm}$ , 节点在  $d_0$  米处的接收功率  $PL(d_0) = 55\text{dB}$ , 单位遮蔽指数  $X_\sigma$  定义为均值为 0, 方差为 5 的随机变量.  $n(N_j)$  是接收节点  $N_j$  的路径损耗指数, 一般取默认值. 然而受到反射、多径衰落等因素影响<sup>[8]</sup>, 不同节点的路径损耗指数的差异可能很大. 若采用默认值, 必将影响定位精度.

由公式(1)和(2), 在网络中均匀撒播  $N(B)$  个信标节点, 并定义待定位节点个数为  $N(S)$ ,  $B_i$  和  $S_j$  分别代表信标节点和待定位节点,  $i \in \{1, 2, \dots, N(B)\}$  且  $j \in \{1, 2, \dots, N(S)\}$ .  $N(B_i)$  和  $N(S_j)$  分别为  $B_i$  和  $S_j$  的邻居信标节点个数, 且网络中所有信标的路径损耗指数  $n(B_i)$  初始为 0.

(1) 所有信标广播自身位置信息. 数据包格式:

$$P_1(B_i) = \{ID(B_i), X(B_i), Y(B_i); i \in \{1, 2, \dots, N(B)\}\} \quad (4)$$

其中,  $ID(B_i)$  为  $B_i$  的标号,  $X(B_i)$  和  $Y(B_i)$  分别是  $B_i$  的横、纵坐标.

(2) 所有节点存储其收到的  $P_1$  包中的节点标号与坐标, 并记录各  $P_1$  包的信号强度值.

(3) 考察任意信标  $B_i$ : (a) 当  $N(B_i) = 0$ , 即  $B_i$  无法从任何邻居信标获取路径损耗信息时,  $n(B_i)$  取默认值 4; (b) 当  $N(B_i) = 1$  时, 由于  $n(B_j)$  未知, 因此暂时无法计算  $n(B_i)$ ; (c) 当  $B_i$  有且仅有 2 个邻居信标  $B_j$  和  $B_k$ , 即  $N(B_i) = 2$  时, 对于信标  $B_i$ , 有公式(5)和(6)成立:

$$RSSI(B_j, B_i) = P_T - PL(d_0) - 10 \times n(B_i) \times \lg[d(B_j, B_i)/d_0] - X_\sigma \quad (5)$$

$$RSSI(B_k, B_i) = P_T - PL(d_0) - 10 \times n(B_i) \times \lg[d(B_k, B_i)/d_0] - X_\sigma \quad (6)$$

联立(5)、(6)即可解出  $n(B_i)$ , 如式(7):

$$n(B_i) = \frac{RSSI(B_j, B_i) - RSSI(B_k, B_i)}{10[\lg(d(B_k, B_i)/d_0) - \lg(d(B_j, B_i)/d_0)]} \quad (7)$$

(d) 当  $N(B_i) > 2$  时, 利用式(8)计算  $n(B_i)$ . 其中,  $n(B_e)$  是  $B_i$  的任意两个邻居信标根据式(7)计算出的路径损耗指数值.

$$n(B_i) = \frac{1}{C_{N(B_i)}^2} \sum_{e=1}^{C_{N(B_i)}^2} n(B_e) \quad (8)$$

(4) 考察任意待定位节点  $S_j$ : (a) 若  $N(S_j) < 3$ , 则  $S_j$  的坐标无法直接求出; (b) 若  $N(S_j) \geq 3$ , 则  $S_j$  的坐标可求, 如公式(9). 但由于非测距方法的定位精度往往小于测距定位方法. 因此,  $\{X_C(S_j), Y_C(S_j)\}$  并非  $S_j$  的最终坐标, 仅用于判定其是否可以升级为信标.

$$\begin{bmatrix} X_C(S_j) \\ Y_C(S_j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{N(S_j)} \left( \frac{RSSI(S_j, B_k)}{\sum_{l=1}^{N(S_j)} RSSI(S_j, B_l)} \right) \times X(B_k) \\ \sum_{k=1}^{N(S_j)} \left( \frac{RSSI(S_j, B_k)}{\sum_{l=1}^{N(S_j)} RSSI(S_j, B_l)} \right) \times Y(B_k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

对于待定位节点  $S_j$ , 计算权值时共需执行  $N(S_j) - 1$  次加法和  $N(S_j)$  次乘法运算, 利用加权质心求坐标时需执行  $N(S_j) - 1$  次加法运算. 因此, 总计算步数为  $3N(S_j) - 2$ .

(5) 网络中所有  $n(B_i) \neq 0$  的信标广播数据包  $P_2(B_i)$ , 其格式:

$$P_2(B_i) = \{ID(B_i), n(B_i); n(B_i) \neq 0\} \quad (10)$$

所有待定位节点及路径损耗指数为 0 的信标接收  $P_2$  包并记录包中的路径损耗指数值;

(6) 对于  $n(B_i) = 0$  的信标  $B_i$ :

(a) 若  $B_i$  可以接收到其唯一邻居  $B_j$  的数据包  $P_2(B_j)$ , 且获取其路径损耗指数  $n(B_j)$ , 则式(5)成立, 且对于  $B_j$ , 有式(11)成立:

$$RSSI(B_i, B_j) = P_T - PL(d_0) - 10 \times n(B_j) \times \lg[d(B_i, B_j)/d_0] - X_\sigma \quad (11)$$

并由此可得:

$$X_\sigma = P_T - PL(d_0) - 10 \times n(B_j) \times \lg[d(B_i, B_j)/d_0] - RSSI(B_i, B_j) \quad (12)$$

将式(12)代入式(5)中, 即可解出  $n(B_i)$ , 如式(13):

$$n(B_i) = \frac{RSSI(B_i, B_j) - RSSI(B_j, B_i)}{10[\lg(d(B_j, B_i)/d_0)]} + n(B_j) \quad (13)$$

(b) 若  $B_i$  无法接收到其邻居的  $P_2$  包, 则其路径损耗指数无法计算, 取  $n(B_i)$  为默认值.

(7) 所有在步骤(6)中获得路径损耗指数的信标广播数据包, 包格式同  $P_2$  相同. 网络中的待定位节点接收该数据包并存储对应信标节点的路径损耗指数值.

## 2.3 基于无效信标过滤的信号强度定位

对于  $S_j$  的某一邻居信标  $B_i$ , 若式(14)和式(15)同

时成立,称  $B_i$  是  $S_j$  的无效信标. 其中,  $n_{th}$  和  $RSSI_{th}$  分别是最小路径损耗指数和最弱信号强度值门限,  $\alpha$  和  $\beta$  是接近于 0 的较小值.

$$n(B_i) - n_{th} < \alpha \quad (14)$$

$$RSSI(B_i, S_j) - RSSI_{th} < \beta \quad (15)$$

定义经过无效信标过滤后的待定位节点  $S_j$  的邻居信标个数为  $N'(S_j)$ , 于是,

(1) 当  $N'(S_j) < 2$  时, 由于有效信标太少,  $S_j$  无法定位; (2) 当  $S_j$  有且仅有两个有效邻居信标  $B_1$  和  $B_2$  时, 分别以它们为圆心, 以  $d(B_1, S_j)$  和  $d(B_2, S_j)$  为半径画圆. 当且仅当圆  $B_1$  和圆  $B_2$  出现图 3 中的三种情况时,  $S_j$  的最终坐标可以确定:

(a) 圆  $B_1$  和  $B_2$  相交, 且在网络中存在另一信标  $B_3$ , 满足  $f(B_3) = 1$ , 如图 3(a). 其中,

$$f(B_3) = \begin{cases} 1, & d(S'_j, B_3) \leq r \text{ 或 } d(S''_j, B_3) \leq r \text{ 成立} \\ 0, & d(S'_j, B_3) > r \text{ 且 } d(S''_j, B_3) > r \text{ 成立} \end{cases} \quad (16)$$

$$b = \begin{bmatrix} X^2(B_1) - X^2(B_{N(S_j)}) + Y^2(B_1) - Y^2(B_{N(S_j)}) + d^2(B_{N(S_j)}, S_j) - d^2(B_1, S_j) \\ X^2(B_3) - X^2(B_{N(S_j)}) + Y^2(B_3) - Y^2(B_{N(S_j)}) + d^2(B_{N(S_j)}, S_j) - d^2(B_3, S_j) \\ \vdots \\ X^2(B_{N(S_j)-1}) - X^2(B_{N(S_j)}) + Y^2(B_{N(S_j)-1}) - Y^2(B_{N(S_j)}) + d^2(B_{N(S_j)}, S_j) - d^2(B_{N(S_j)-1}, S_j) \end{bmatrix} \quad (19)$$

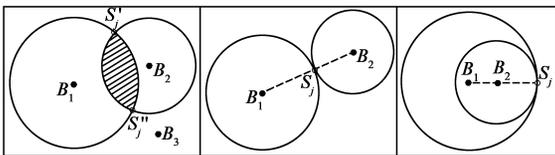


图3 仅拥有两个信标节点的待定位节点

## 2.4 基于条件判定的已定位节点角色迁移

由于网络中信标数量有限, 有文献提出将已定位节点升级为信标, 参与定位. 然而, 这将会带来累积误差<sup>[12]</sup>. 为此, 对于已定位节点  $S_j$ , 提出基于条件判定的角色迁移方法:

(1)  $S_j$  向其所有参与其定位的邻居信标广播包含其 ID 的数据包.

(2)  $S_j$  的所有  $N'(S_j)$  个邻居信标根据各自接收到数据包  $RSSI(S_j, B_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, N'(S_j)$ ) 值, 计算  $d(S_j, B_i)$ . 由凸规划法易知, 仅当不等式组 (20) 有解时,

则由文献[8]易知, 待定位节点的最终坐标必然是  $S'_j$ , 而非  $S''_j$ ;

(b) 圆  $B_1$  和  $B_2$  外切时, 可认为切点就是  $S_j$  的位置, 如图 3(b);

(c) 圆  $B_1$  和  $B_2$  内切时, 同样可认为切点就是  $S_j$  的位置, 如图 3(c).

(3) 当  $N'(S_j) \geq 3$  时, 利用极大似然估计计算  $S_j$  的最终坐标  $\{X_R(S_j), Y_R(S_j)\}$ , 即:

$$\begin{bmatrix} X_R(S_j) \\ Y_R(S_j) \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (17)$$

这里假设  $S_j$  的邻居信标  $B_2$  为无效信标, 且

$$A = \begin{bmatrix} 2[X(B_1) - X(B_{N(S_j)})] & 2[Y(B_1) - Y(B_{N(S_j)})] \\ 2[X(B_3) - X(B_{N(S_j)})] & 2[Y(B_3) - Y(B_{N(S_j)})] \\ \vdots & \vdots \\ 2[X(B_{N(S_j)-1}) - X(B_{N(S_j)})] & 2[Y(B_{N(S_j)-1}) - Y(B_{N(S_j)})] \end{bmatrix} \quad (18)$$

$S_j$  的范围可以确定, 如图 4(a) 中的阴影部分. 此时, 称  $S_j$  为“升级候选节点”. 当式 (20) 无解时,  $S_j$  无法升级, 如图 4(b).

$$\begin{cases} [X_R(S_j) - X(B_1)]^2 + [Y_R(S_j) - Y(B_1)]^2 \leq d^2(B_1, S_j) \\ [X_R(S_j) - X(B_2)]^2 + [Y_R(S_j) - Y(B_2)]^2 \leq d^2(B_2, S_j) \\ \vdots \\ [X_R(S_j) - X(B_{N(S_j)})]^2 + [Y_R(S_j) - Y(B_{N(S_j)})]^2 \leq d^2(B_{N(S_j)}, S_j) \end{cases} \quad (20)$$

(3) 当  $S_j$  成为升级候选节点时, 对于  $S_j$  及其任意有效邻居信标  $B_i$ , 定义它们的互测距误差:

$$\Delta d(S_j, B_i) = |d(S_j, B_i) - d(B_i, S_j)| \quad (21)$$

于是,  $S_j$  的所有有效邻居信标与  $S_j$  之间的互测距误差均值  $E(\Delta d)$  和方差  $D(\Delta d)$  分别为:

$$E(\Delta d) = \frac{1}{N'(S_j)} \sum_{i=1}^{N'(S_j)} \Delta d(S_j, B_i) \quad (22)$$

$$D(\Delta d) = \frac{1}{N'(S_j)} \sum_{i=1}^{N'(S_j)} \Delta d^2(S_j, B_i) - \left( \frac{1}{N'(S_j)} \sum_{i=1}^{N'(S_j)} \Delta d(S_j, B_i) \right)^2 \quad (23)$$

同时, 利用质心加权法和信号强度定位的结果间的误差为:

$$\Delta d_{R,C} = \sqrt{[X_R(S_j) - X_C(S_j)]^2 + [Y_R(S_j) - Y_C(S_j)]^2} \quad (24)$$

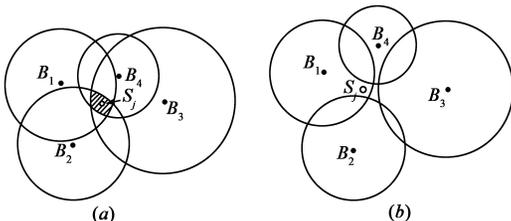


图4 判断已定位节点是否能够成为升级候选节点

于是,当  $E(\Delta d) < \epsilon$ 、 $D(\Delta d) < \delta$  及  $\Delta d_{R,C} < \sigma$  同时成立,  $S_j$  可升级为信标,并广播数据包  $P_3$ :

$$P_3(S_j) = \{ID(S_j), X_R(S_j), Y_R(S_j)\} \quad (25)$$

(4)网络中所有尚未完成定位的节点接收  $P_3$  包并记录其信号强度,则部分节点可实现定位。

在整个定位算法执行过程中,信标节点共广播 3 次,待定位节点需广播 2 次.同时,网络中共有 4 次数据包接收过程,且认为耗费在数据包接收上的时间和节点的邻居数目成正比.于是,在不考虑计算时间的情况下,待定位节点完成定位所耗费的最长时间:

$$T = t[5 + \text{Max}\{N(B_i), N(S_j)\} + 2\text{Max}\{N(S_j)\} + \text{Max}\{N'(B_i)\}] \\ i = 1, 2, \dots, N(B); j = 1, 2, \dots, N(S) \quad (26)$$

其中,  $t$  为发送或接收单个数据包的时间,  $N'(B_i)$  代表信标  $B_i$  的非信标邻居节点的个数.于是,对任意待定位节点,若在  $T$  时间后,仍无法定位,则该节点定位失败。

### 3 定位仿真结果

#### 3.1 实验环境

为验证方法的有效性,在 Omnet + + 3.2 下进行试验,分别同基于测距的加权 RSSI 定位方法<sup>[3]</sup>及非测距的 APIT 方法<sup>[7]</sup>进行比较.其中,加权 RSSI 定位方法中的已定位节点可无条件升级为信标,参与后续定位.实验的主要参数设置如表 1.

表 1 主要实验参数设置

仿真参数	符号	参数值	单位
网络边长	$L$	200	M
节点通信半径	$r$	30	M
信标节点最佳部署密度	$\rho(B)$	1125	km
最优信标节点个数	$N(B)$	45	个
节点发射功率	$P_T$	-5	dBm
节点在 $d_0$ 处的接收功率	$PL(d_0)$	55	dB
定位均值误差门限	$\epsilon$	5	M
定位方差误差门限	$\delta$	5	M
定位结果差异门限	$\sigma$	3	M

#### 3.2.1 定位成功率

这里将定位成功率定义为定位误差小于一定阈值的节点数占节点总数的比例.这里设该阈值为 30%.图 5 和 6 分别是在不同环境下,三种方法的定位成功率,待定位节点数量固定为 200 个.从中可以看出,本文方法定位成功率最高,最优可达 95% 以上,且基本不受环境影响;虽然加权 RSSI 比传统 RSSI 方法有所改进,但仍存在测距误差,且已定位节点无条件升级为信标,易带来累积误差,因此定位成功率不高.当路径损耗增加时,其定位成功率出现了波动;由于 APIT 是非测距定位方法,其定位成功率同信标数量基本呈线性关系.另外,无论哪种方法,在信标数量大于最优值后,定位成

功率的增加幅度明显变小。

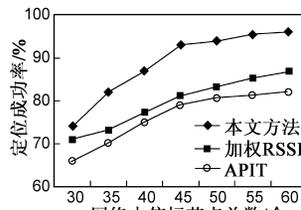


图 5 定位成功率比较( $n \approx 4$ )

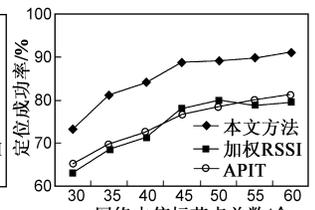


图 6 定位成功率比较( $n \approx 5$ )

#### 3.2.2 定位误差均值

图 7 和 8 分别是在不同环境下,三种方法的定位误差均值.其中,加权 RSSI 方法定位误差最大,接近 30%,且波动较大;APIT 方法中,邻居节点越多,待定位节点同信标三角形的位置关系判定越准确<sup>[8]</sup>,因此,在节点数较多时,定位误差相对较小;本文方法考虑了路径损耗的差异性且过滤了无效信标,定位精度高,受环境影响小.另外,已定位节点有条件地升级为信标,避免了累积误差,因此定位误差均值最低,最优可保持在 10% 以下。

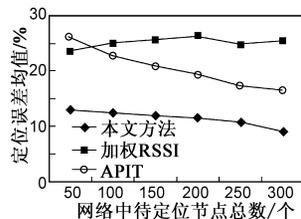


图 7 定位误差均值比较( $n \approx 4$ )

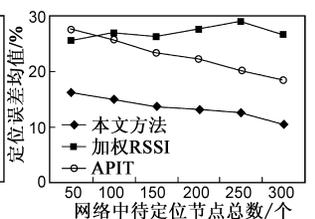


图 8 定位误差均值比较( $n \approx 5$ )

#### 3.2.3 定位误差方差

图 9 和 10 分别是不同环境下,三种方法的定位误差方差.由于 APIT 只进行位置估算,不确定性大,导致误差方差较大;加权 RSSI 同样存在较大不确定性,定位方差波动较大;而本文方法通过加权质心和基于无效信标过滤的信号强度定位方法相协作,完成定位并实现已定位节点升级,基本可保证所有节点的定位精度,定位误差方差最小。

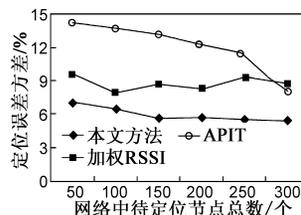


图 9 定位误差方差比较( $n \approx 4$ )

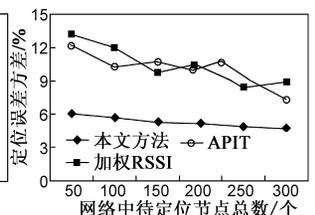


图 10 定位误差方差比较( $n \approx 5$ )

### 4 小结

针对无线传感器网络定位算法中存在的抗干扰性弱、累积误差较大的问题,本文提出一种信标节点可迁移的协作定位方法.通过路径损耗指数推算,获取准确测距信息;通过过滤无效信标,保证定位精度;并利用

加权质心和 RSSI 定位相协作的方式,实现了已定位节点有条件地升级为信标节点,提升了定位成功率。

#### 参考文献:

- [1] 王珊珊,殷建平,蔡志平,张国敏.基于 RSSI 的无线传感器网络自身定位方法[J].计算机研究与发展,2008,(45):385-388.  
Wang Shanshan, Yin Jianping, Cai Zhiping, Zhang Guomin. A RSSI-based self-localization algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, (45):385-388. (in Chinese)
- [2] He T, Huang CD, Blum B Metal. Range free localization schemes in large scale sensor networks [A]. Proc of the 9th Annual Conf on Mobile Computing and Networking[C]. San Diego: ACM Press, 2003. 81-95.
- [3] 余义斌.传感器网络定位算法及相关技术研究[D].重庆:重庆大学,2006.  
Yu Yibing. Localization Algorithms for Sensor Networks and Related Technologies[D]. ChongQing: ChongQing University, 2006. (in Chinese)
- [4] 王福豹,史龙,任丰原.无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J].软件学报,2005(16):857-868.  
Wang Fubao, Shi Long, Ren Fengyuan. Self-localization systems and algorithms for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2005(16):857-868. (in Chinese)
- [5] 于海斌,曾鹏.智能无线传感器网络系统[M].北京:科学出版社,2006.1.165-173.  
Yu Haibing, Zeng Peng. Intelligent Wireless Sensor Networks [M]. BeiJing: Science Press, 2006. 1. 165-173. (in Chinese)
- [6] Niculescu D, Nath B. Ad Hoc positioning system (APS) using AOA[A]. Proc. of the IEEE INFOCOM 2003[C]. Vol. 3, San Francisco: IEEE Computer and Communications Societies, 2003.
- [7] 段渭军,黄晓利,王福豹,刘艳文.无线传感器网络测距技术的研究[J].计算机科学,2007(9):51-62.  
Duan Weijun, Huang Xiaoli, Wang Fubao and Liu Yanwen. Research on distance measurement in wireless sensor networks [J]. Computer Science, 2007(9):51-62. (in Chinese)
- [8] 陈维克,李文锋,首珩,袁兵.基于 RSSI 的无线传感器网络加权质心定位算法[J].武汉理工大学学报,2006,(2):265-268.

Chen Weike, Li Wenfeng, Shou Heng, Yuan Bin. Weighted centroid localization algorithm based on RSSI for wireless sensor networks[J]. Journal of WuHan University of Technology, 2006, (2):265-268. (in Chinese)

- [9] Zhang HH, Hou JC. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, 2005, 1(1-2):89-123.
- [10] Seidel SY, Rappaport TS. 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multi-floored buildings[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1992, 40(2):207-217.
- [11] Yedavalli K, Krishnamachari B, Ravula S, Srinivasan B. E-colocation: A technique for RF based localization in wireless sensor networks[A]. Proc. of the Information Processing in Sensor Networks (IPSN)[C]. Los Angeles: IEEE Computer Society, 2005. 285-292.
- [12] 戴桂兰,赵冲冲,邱岩.一种基于球面坐标的无线传感器网络三维定位机制[J].电子学报,2008,36(7):1297-1303.  
Dai Guilan, Zhao Chongchong, Qiu Yan. A localization scheme based on sphere for wireless sensor network in 3D [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7):1297-1303. (in Chinese)

#### 作者简介:



沙 超 男,1983 年生,江苏南京人,南京邮电大学计算机学院博士研究生,主要研究方向是无线传感器网络技术。

E-mail: shachao\_2003@163.com



王汝传 男,1943 年生,安徽合肥人,南京邮电大学计算机学院教授、博士生导师,主要研究方向是计算机软件、计算机网络、信息安全、移动代理和虚拟现实技术等。

E-mail: wangrc@njupt.edu.cn