

文章编号: 1004-9037(2009)06-0757-05

基于 RSSI 差分似然估计的 WSN 节点定位算法

任维政 徐连明 邹德君 邓中亮

(北京邮电大学电子工程学院, 北京, 100876)

摘要: 为了克服接收信号强度测量误差对无线传感器网络 (WSN) 节点自身定位精度的影响, 在对极大似然估计定位算法和接收信号强度指示 (RSSI) 模型分析的基础上, 定义了个体差异差分系数、距离差分系数和距离差分定位方程, 把离目标节点最近的信标节点作为参考节点对基于 RSSI 的测距进行差分修正, 并将测距差分修正和极大似然估计相结合提出了一种测距差分修正极大似然估计定位算法。算法通过 RSSI 进行测距, 无需增加额外硬件开销, 容易实现, 定位精度可达 2.5 m 以下, 适合于处理能力和能量有限的 WSN 节点定位。

关键词: 无线传感器网络; 定位; 接收信号强度指示 (RSSI); 极大似然估计; 差分

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Positioning Algorithm Using Maximum Likelihood Estimation of RSSI Difference in Wireless Sensor Networks

Ren Weizheng, Xu Lianming, Zou Dejun, Deng Zhongliang

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 100876, China)

Abstract To suppress received signal strength indication (RSSI) errors to the positioning precision of localized nodes in wireless sensor networks, difference coefficients of individual diversities, difference coefficients of distances, and positioning difference equations of localized distances are defined based on analytical models of the maximum likelihood estimation and RSSI. The measured distances are corrected through the closest beaconing nodes to object nodes as their reference nodes, using the difference method of RSSI. A positioning algorithm is combined with the modified difference of localized distances and the method of the maximum likelihood estimation. The positioning algorithm is easy to be realized without the additional hardware spending. The positioning error is less than 2.5 m, so it is fit for the positioning of the nodes on wireless sensor networks (WSNs) when their operation abilities and power supplies are restricted.

Key words wireless sensor networks (WSNs); positioning; received signal strength indication (RSSI); maximum likelihood estimation; difference

引 言

无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSN) 将改变人类与客观世界的交互方式, 通过部署大量传感器节点至目标区域, 可以在广泛的应用领域内实现复杂的大范围监测和追踪任务, 但对于大多数应用, 不知道传感器位置而感知的数据是没有意义的^[1]。人工部署和为所有网络节点安装 GPS

接收器都会受到成本、功耗、扩展性等问题的限制, 因此, 必须采用一定的机制与算法实现 WSN 的自身定位。

目前的定位算法主要分两大类, 基于测距算法和无需测距算法^[2]。基于测距算法通过测量节点间的距离或角度信息, 使用三边测量、三角测量或最大似然估计定位法计算节点位置。常用的测距技术有 RSSI (Received signal strength indication)^[3], TOA (Time of arrival)^[4], TDOA (Time difference

of arrival)^[5]和 AO A (Angle of arrival)^[6]; 无需测距定位算法则不需要距离和角度信息, 算法根据网络连通性等信息来实现节点定位。

反射、多径传播、非视距、天线增益等问题都会对相同距离产生显著的传播损耗。通常将 RSSI 测距看作为一种粗糙的测距技术, 如何提高基于 RSSI 的定位精度是一个比较有意义的问题。本文在比较研究现有各种定位算法的基础上, 通过对无线电传播路径损耗模型的分析, 提出了基于接收信号强度指示 RSSI, 通信开销小、硬件要求低、定位精度高、适合传感器节点处理的 RSSI 差分修正极大似然估计定位算法。

1 算法模型描述

WSN 定位要求硬件成本低、定位过程通信开销小。本文在不增加节点硬件设计的情况下, 通过 RSSI 的测量得到节点距离相关信息, 以极大似然估计为理论基础, 提出了基于 RSSI 的无线传感器网络距离差分修正极大似然估计定位算法。

1.1 极大似然估计定位算法

假设 n 个信标节点的坐标分别为 $B_1(x_1, y_1)$, $B_2(x_2, y_2), \dots, B_n(x_n, y_n)$, 待确定位置节点的坐标为 $O(x, y)$, 该节点到各个信标节点的距离分别是 d_1, d_2, \dots, d_n , 根据二维空间距离计算公式, 可以获得一个非线性方程组^[7]如下

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

从第一个方程开始依次减去最后一个方程, 得

$$\begin{cases} x_1^2 - x_n^2 - 2(x_1 - x_n)x + y_1^2 - y_n^2 - 2(y_1 - y_n)y = d_1^2 - d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 - 2(x_{n-1} - x_n)x + y_{n-1}^2 - y_n^2 - 2(y_{n-1} - y_n)y = d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 的线性方程表示为: $AX = b$, 其中

$$\begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \end{bmatrix}$$

使用标准最小均方误差估计方法可以得到节点 O 的坐标估计值为

$$X = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (3)$$

1.2 无线电传播路径损耗模型分析

由于传感器节点自身具备通信能力, 通信控制芯片通常会提供测量 RSSI 的方法, 在信标节点广播自身坐标的同时可完成 RSSI 的测量, 故是一种低功率、低代价的测距技术。其误差主要来源于信号实际传播过程中环境影响造成的信号衰减与理论或经验模型不符, 从而造成实际建模的复杂性。

无线电传播路径损耗对于 RSSI 定位算法的定位精度有很大影响。常用的传播路径损耗模型有: 自由空间传播模型、对数距离路径损耗模型、哈它模型、对数-常态分布模型等。本文采用自由空间传播模型和对数-常态分布模型进行研究。自由空间无线电传播路径损耗模型为

$$\text{Loss} = 32.4 + 10 \times k \times \log_{10}(d) + 10 \times k \times \log_{10}(f) \quad (4)$$

式中: d 为距信源的距离 (km); f 为频率 (MHz); k 为路径衰减因子。在实际应用环境中, 由于多径、绕射、障碍物等因素, 无线电传播路径损耗与理论值相比有些变化。下述对数-常态分布模型将更加合理, 式 (5) 可用于计算节点收到信标信息时的路径损耗

$$PL(d) = \overline{PL}(d_0) + 10k \log \left[\frac{d}{d_0} \right] + X_e \quad (5)$$

式中: $PL(d)$ 为经过距离 d 后的路径损耗 (dB); X_e 为平均值为 0 的高斯分布随机变数, 其标准差范围为 4~10; 式中 k 的范围在 2~5 之间。取 $d = 1 \text{ m}$, 代入式 (3), 可得到 Loss, 即 $\overline{PL}(d_0)$ 的值。这样根据式 (5) 可得各未知节点接收信标节点信号时的信号强度为

$$\text{RSSI} = P + G - PL(d) \quad (6)$$

式中: P 为发射功率; G 为天线增益

1.3 差分修正定位算法

如图 1 所示, 信标节点为 $B_0(x_0, y_0)$, $B_1(x_1,$

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

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

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

$y_1), B_2(x_2, y_2), \dots, B_n(x_n, y_n)$, 目标节点 $O(x, y)$
 B_0 是与目标节点 O 最近的信标节点, 令其为差分参考节点, 参考节点 B_0 到信标节点 B_1, B_2, \dots, B_n 的实际距离分别为 $d_{01}, d_{02}, \dots, d_{0n}$; 目标节点 O 到信标节点 B_1, B_2, \dots, B_n 的差分测量距离分别为 d_1, d_2, \dots, d_n

定义 1 参考节点 RSSI 个体差异修正系数为

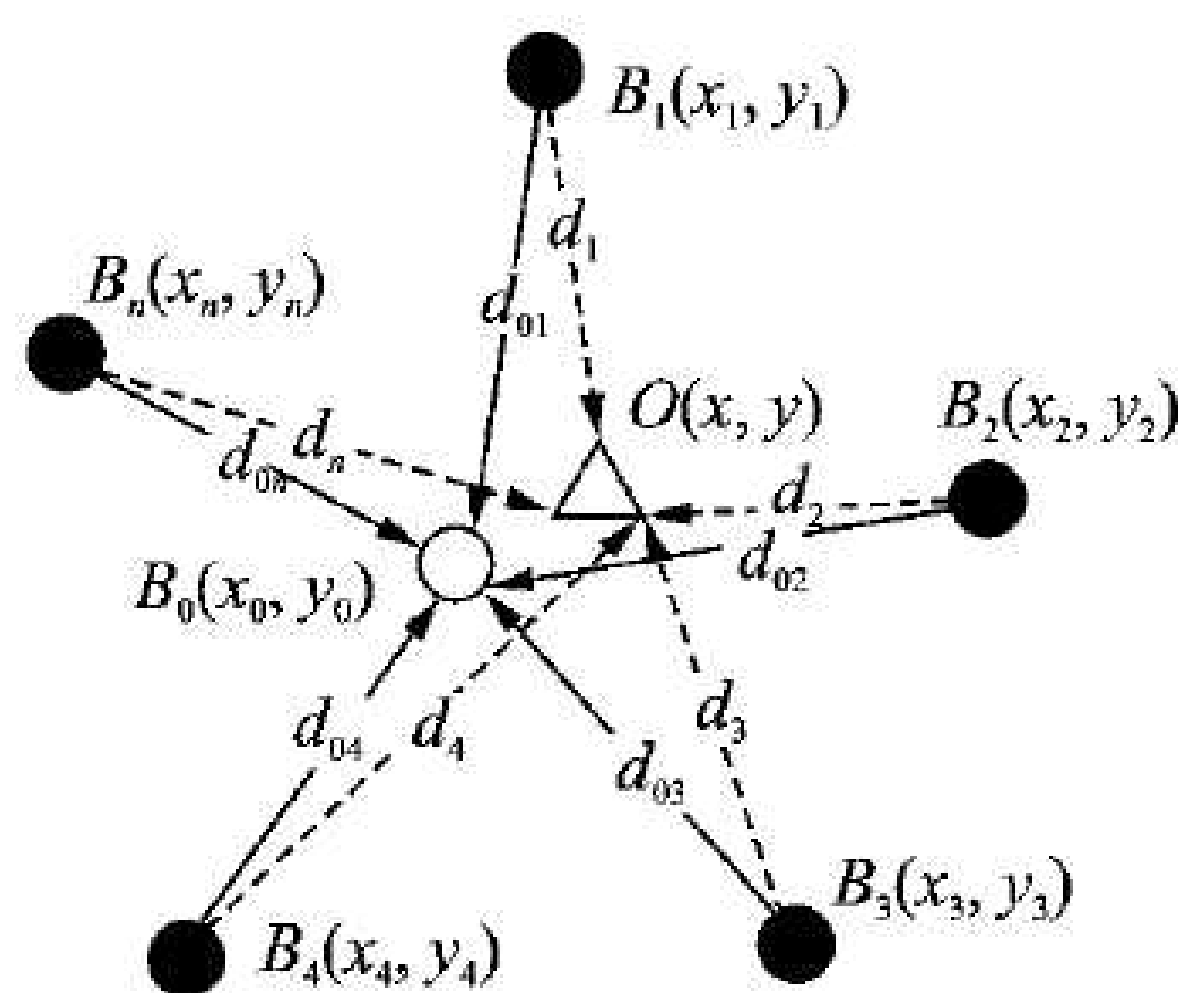


图 1 差分修正定位算法示意图

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(d'_{0i} - d_{0i})}{d'_{0i}} \quad (7)$$

式中: d'_{0i} 为参考节点到第 i 个信标节点的测量距离; d_{0i} 为参考节点到第 i 个信标节点的实际距离; n 为参与定位的信标节点个数。由式 (7) 可知, T 为各个信标节点到参考节点测量距离的相对测量误差平均值, 反应了不同测量区域目前条件下依 RSSI 进行距离测量的偏差程度及对应关系。

定义 2 目标节点到第 i 个信标节点的距离差分系数为

$$d = \lambda e^{1 - \frac{d'_i}{d'_{0i}(1-T)}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中: λ 为比例调整因子; d'_i 为目标节点到第 i 个信标节点的实测距离; n 为参与定位的信标节点个数。不同信标节点依 RSSI 进行距离测量的偏差程度有所差异, d 反应了不同信标节点目前条件下依 RSSI 进行距离测量偏差程度的映射关系, d 与参考节点 RSSI 个体差异修正系数 T 相关。

定义 3 目标节点到第 i 个信标节点的距离差分定位方程为

$$d_i = d'_i - d e_{0i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中: d_i 为目标节点到第 i 个信标节点的修正距离; 参考节点测量距离误差 $e_{0i} = d'_{0i} - d_{0i}$; n 为参与定位的信标节点个数。 d 反应了不同节点 RSSI 测量误差关系, 反应不同区域 RSSI 测量误差关系。

后, 对信标节点依其 RSSI 值从大到小排序, 并建立 RSSI 值与节点到信标节点距离的映射。建立 3 个集合。

信标节点集合

$$\text{Beacon-set} = \{a_0, a_1, a_2, \dots, a_m\}$$

其中 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ 为与目标节点之间 RSSI 由大到小的信标节点标号。

信标节点位置集合

$$\text{Position-set} = \{(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}$$

差分参考节点 (与目标最近的信标节点 (x_0, y_0)) 到其他信标节点距离集合

$$\text{Dist-set-real} = \{d_{10}, d_{20}, \dots, d_{m0}\}$$

差分参考节点到其他信标节点测量距离集合

$$\text{Dist-set-test} = \{d'_{10}, d'_{20}, \dots, d'_{m0}\}$$

目标节点到信标节点测量距离集合

$$\text{Dist-set-test-o} = \{d'_1, d'_2, \dots, d'_m\}$$

(4) 采用 RSSI 值大的前几个信标节点进行自身定位计算。

① 在 Beacon-set 中依据前述对无线电传播路径损耗模型的分析结论, 优先选择 RSSI 值大的信标节点组合成下面的三角形集合, 这是提高定位精度的关键。

$$\text{Triangle-set} = \{(a_1, a_2, a_3), (a_1, a_2, a_4), \dots, (a_{m-2}, a_{m-1}, a_m)\}$$

② 利用式 (7-9) 求出目标节点到信标节点差分修正距离集合

$$\text{Dist-set-dif-o} = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$$

③ 利用式 (1-3) 求出差分修正目标位置坐标值。

3 仿真与实验

采用 Matlab 对上述算法进行了计算机仿真。传感区域为 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$, 节点发射半径为 150

距离变大, RSSI测距偏差变大, 为此,式(9)中 d_i 表示了逼近真值的趋势,将式(9)代入式(1,3),即可求得目标节点的差分修正极大似然估计坐标

2 算法实现过程

- (1)信标节点周期性发送自身信息: 节点 ID 自身位置信息。
- (2)目标节点在收到信息后,只记录同一个信标节点的 RSSI均值。
- (3)目标节点在收到超过阈值 m 个信标信息

m , RSSI与距离的关系由式(3,4)决定,衰减因子 $k=3.2$,参考距离 $d_0=1\text{ m}$, X_w 为服从高斯分布的随机数,标准差取 5 信标节点均匀分布于传感区域。目标节点随机布置于传感区域,普通节点数为 2 200个。信标节点数目有 6种情况: 9, 13, 18, 25, 33, 41个信标。图 2为采用 RSSI值最大的 5个信标节点参与某一目标节点定位的差分极大似然估计算法定位的均方根误差统计情况,图 3为采用 RSSI值最大的 6个信标节点参与某一目标节点定位的差分极大似然估计算法定位的均方根误差统计情况。

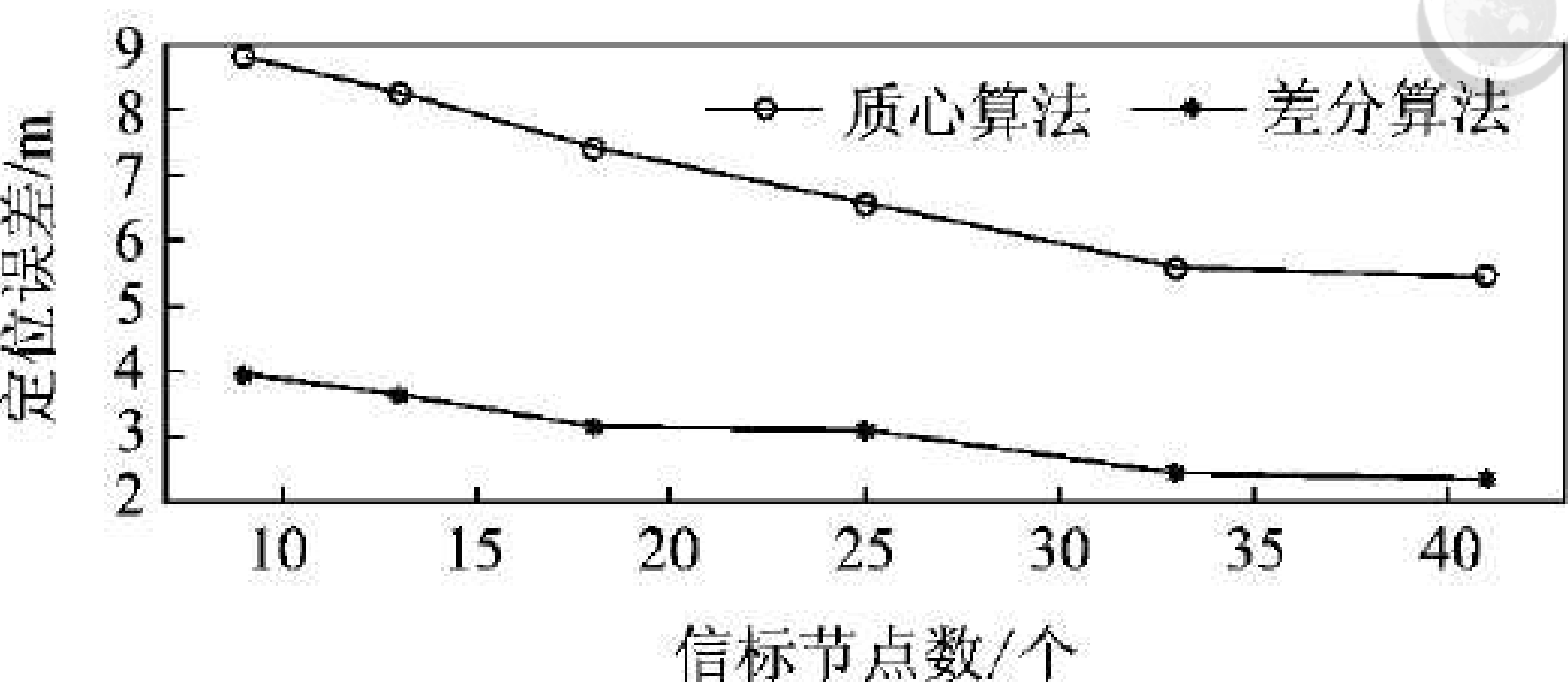


图 2 5个信标节点参与定位误差统计情况

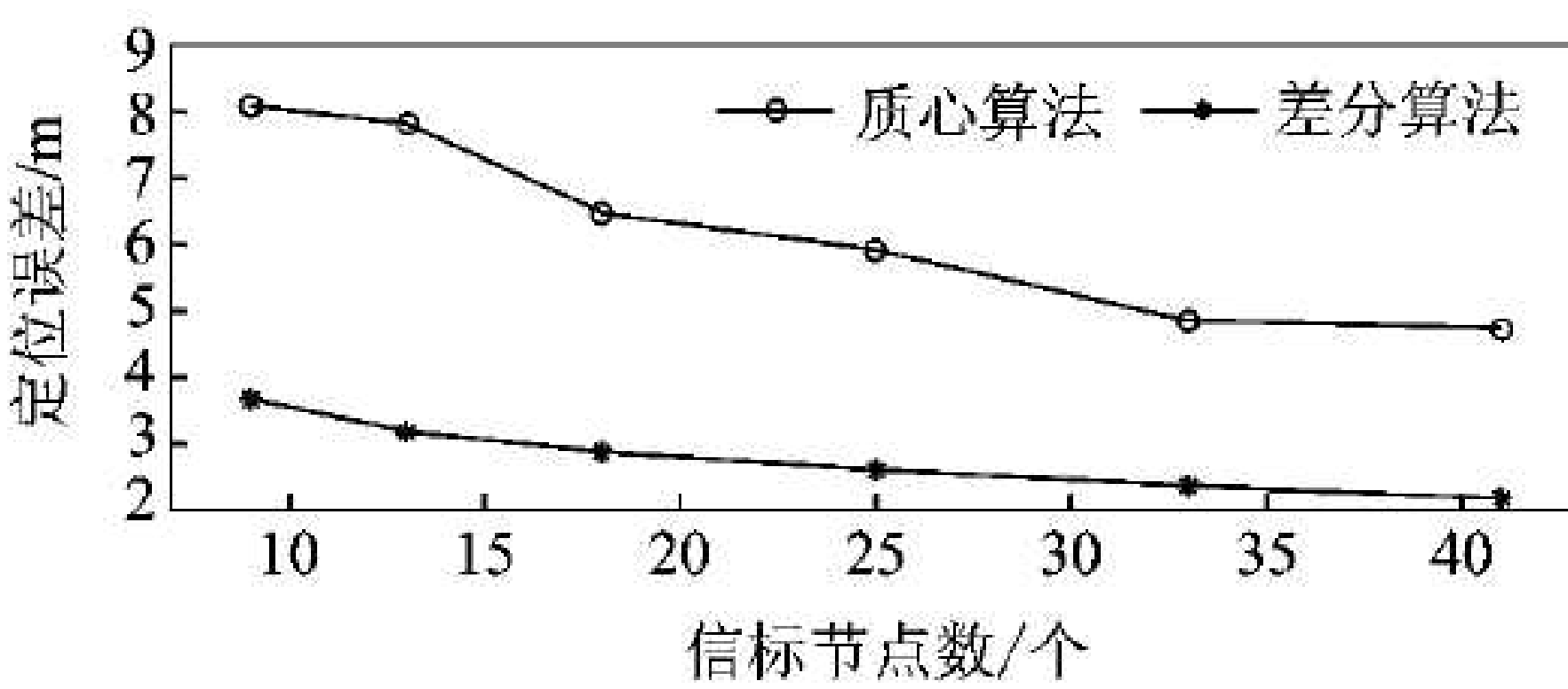


图 3 6个信标节点参与定位误差统计情况

基于 ZigBee硬件平台对文献[8]提出的加权质心定位算法(WCLA)和本文提出差分似然估计定位算法(DELA)进行了实验。采用 CC2430模块设计了节点信标节点和目标节点。CC2430通信距离约为 60 m,实验区域为 180 m× 180 m的空旷区域, RSSI与距离的关系由式(3,4)决定,衰减因子 $k=3.2$,参考距离 $d_0=1\text{ m}$,信标节点均匀分布于传

感区域。实验结果如表 1所示,在实验区域内分别布置 18, 25, 41个信标。在各种信标数目情况下,在实验区域内随机布置 10个目标节点,进行 100次实验。每次实验采用 RSSI值最大的 5个或 6个信标节点参与定位的差分算法和加权质心算法的平均定位误差和最大定位误差进行比较。

表 1 定位误差统计表

定位方法	参与定位信标个数	信标总数 个					
		18		25		41	
		平均误差	最大误差	平均误差	最大误差	平均误差	最大误差
加权质心定位算法	5	8.32	26.23	6.99	18.54	6.83	15.65
	6	7.99	25.67	6.67	17.33	6.54	15.70
差分似然估计定位算法	5	5.11	18.99	3.52	17.43	3.34	13.39
	6	3.89	18.33	3.10	15.91	2.47	12.13

4 结 论

反射、多径传播、非视距、天线增益等对传播损耗产生明显的改变,有可能产生± 50%的测距误差。如果不对 RSSI测量值进行有效的抑制和处理,不管采用什么定位算法,通过 RSSI测量值进行定位都难以得到较好的定位结果。本文采用的参考信标差公修正方法直接针对 RSSI测量值的随机性进

量值的随机性进行修正,抑制 RSSI随机波动。差分修正定位算法可以推广到 TOA, TDOA等其他的基于距离的定位算法中使用,也可以作为抑制 RSSI随机误差的方法与其他定位算法相结合进一步提高定位精度。

参考文献:

[1] Rabacy J J, Ammer M J, da Silva Jr J L, et al. Pi-

修正方法且针对 RSSI 测量值的随机性进行修正,抑制 RSSI 随机波动。从算法的实现过程和实验结果可以得出结论:

(1)算法计算量小,容易实现,比较适合计算能力和能量都有限的无线传感器节点使用。

(2)CC2430 模块具有 RSSI 采集功能,无需增加额外的测距硬件开销,从而有效降低了节点功耗。

(3)采用差分定位算法有效抑制了 RSSI 随机波动较大的影响,使定位精度与文献 [8] 提出的极大似然估计算法相比有了较大幅度的提高。

(4)差分算法是以似然估计算法为基础的,故当信标节点密度降低时,差分定位算法定位精度受到的影响较小。

(5)参考信标差分修正方法直接针对 RSSI 测

corodio supports ad hoc ultra-low power wireless networking [J]. Computer, 2000, 33(7): 42-48.

[2] He T, Huang C D, Blum B M, et al. Range-free localization schemes in large scale sensor networks [C]// Proc of the 9th Annual Int'l Conf on Mobile Computing and Networking. San Diego: ACM Press, 2003 81-95.

[3] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system [C]// Proc of the IEEE INFOCOM. [S. l.] IEEE, 2000 775-784.

[4] Harter A, Hopper A, Steggles P, et al. The anatomy of a context-aware application [C]// Proceedings of the 5th Annual ACM /IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM Press, 1999 59-68.

[5] Girod L, Estrin D. Robust range estimation using acoustic and unimodal sensing [C]// Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2001 1312-1320.

[6] Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AoA [C]// Proceedings of the IEEE INFOCOM. New York, USA: IEEE, 2003 1734-1743.

[7] 薛锋,刘忠,曲毅. 无线传感器网络中的分布式目标被动跟踪算法 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(15):

3499-3503.

[8] 陈维克,李文锋,首珩,等. 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, 30(2): 265-268.

作者简介:任维政 (1974-),男,博士研究生,研究方向:无线传感器网络、LBS 等,E-mail: Renw@bupt.edu.cn;徐连明 (1981-),男,博士研究生,研究方向:无线传感器网络、LBS 等;邹德君 (1976-),男,讲师,研究方向:GPS、LBS 等;邓中亮 (1965-),男,教授,研究方向:多媒体通信、通信 IC 设计、智能通信技术。



~ 笔记内容 ~