

基于位姿评估的无线传感器网络自主移动节点定位技术

陈桂忠, 董利达

(浙江大学电子电路与信息系统研究所, 浙江杭州 310027)

摘 要: 本文在研究自主移动节点运动特性的基础上, 提出一种基于位姿评估技术的自主移动节点定位算法. 该算法适用于可以获取速度信息以及具有射频定位功能的移动节点. 该算法利用移动节点速度信息计算相对定位轨迹; 然后对相对定位轨迹进行平移, 旋转变换, 使变换后的相对定位轨迹与射频定位轨迹的结果差别最小来修正累积误差; 最后从修正后相对定位轨迹上获取最终定位结果. 仿真实验结果表明, 所提出的算法在参数取值合理的条件下, 能够有效地提高移动节点定位精度.

关键词: 无线传感器网络; 移动节点; 位姿评估; 节点定位

中图分类号: TP373 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)12-2428-05

A Novel Localization Algorithm for Mobile Sensor Node

CHEN Gui-zhong, DONG Li-da

(Institute of Electronic Circuit and Information System, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: Mobile wireless sensors need to know their locations in many control and monitoring applications. A novel localization algorithm based on Location and Attitude Estimation(LAE) for mobile sensor nodes that can acquire the velocity information is proposed in this paper. Firstly, the relative localization track(RLT), which reflects the shape of true track, is obtained using the velocity information. Then the cumulative error of RLT is corrected while the global optimum solution is obtained by minimizing the difference between RLT and radio localization track. Finally, a more accurate localization result presents itself from the corrected RLT. Simulation results show the performances of our methods in term of accuracy and determinate the parameter the more adapted related to the network configurations.

Key words: wireless sensor networks; mobile node; location and attitude estimation(LAE); node localization

1 引言

在无线传感器网络里, 移动节点得到了越来越多的关注与应用. 移动节点除了用来辅助静态节点定位^[1], 扩展网络的覆盖范围, 提高网络连接度^[2]等外, 还广泛地应用于工厂物流、智能家居以及环境保护等领域. 然而节点功能的实现都直接依赖于其位置信息, 采用人工配置的方式为移动节点输入位置信息显然是不可行的, 为所有移动节点安装 GPS 接收器, 又受到成本、使用场合等诸多限制. 充分利用移动节点的资源来实现其自定位是解决问题的最佳途径.

本文所讨论的自主移动节点是指能够按照功能需要自主移动到预定目的地的移动节点, 如文献[1, 2]所提及的移动节点, 这也就要求节点具有控制或者测量自身运动速度大小, 以及速度方向改变角度(称二者为速度信息)的能力. 现有的移动节点定位算法^[3~10]基本上

都属于射频直接定位算法, 并非专门针对自主移动节点, 因此这些算法也都没有考虑利用节点的运动特性来改善定位精度.

射频节点定位的结果不存在累积误差, 缺点是定位精度较低. 这一类定位方式大多以 TDOA(Time Difference Of Arrival), RSSI(Received Signal Strength Indicator) 等为基础实现. 例如文献[6]利用 Grey Prediction Method 预测在下一位置的 RSSI 的值, 并以此为依据计算新的位置. 该方法可以在一定程度上消除 RSSI 波动, 从而改善定位精度. 文献[7]在离线阶段利用节点在不同位置下的多个信标节点的 RSSI 值来训练 LVQ(Learning Vector Quantization), 然后节点利用训练好的 LVQ 实现自定位. 自主移动节点利用速度信息估计自己相对于上一时刻位置的变化, 从而获取当前位置. 这种定位方式称为相对定位. 由于相对定位结果与历史记录值相关, 因此存在误差累积的缺点, 但是它在短程的精度较高. 对自主移动

收稿日期: 2007-10-15; 修回日期: 2008-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60503027); 十一五国家 863 高技术研究发展计划(No. 2006AA040309); 浙江省重点科技计划项目(No. 2007C21046)

节点而言, 如果能够有效地结合这两类定位方式的优点, 将有利于提高移动节点的定位精度.

本文在研究以上两种定位方式的基础上, 提出一种基于位姿评估的移动节点定位算法(Location and Attitude Estimation based Localization, LAEL). 该算法适用于具有速度、方向测量功能与射频定位功能的自主移动节点的定位, 它具有节点定位精度高、实现成本低等特点. 仿真实验结果表明, 相对于射频定位结果, 所提出的 LAEL 算法在参数取值合理的条件下, 能够提高节点定位精度达一倍以上. 本文组织结构为: 第 2 节介绍移动节点相对定位模型; 第 3 节介绍 LAEL 算法工作原理; 第 4 节给出仿真结果以及性能分析; 最后我们在第 5 节中给出一些结论.

2 移动节点相对定位模型

移动节点利用速度信息计算位姿状态随时间的变化情况, 从而获取相对定位轨迹. 移动节点根据上一时刻的位姿状态和速度信息来计算当前位姿状态为(式中符号的意义见表 1)

$$\begin{cases} X_h(k) = X_h(k-1) + \begin{bmatrix} \cos(\alpha_h(k-1)) \\ \sin(\alpha_h(k-1)) \end{bmatrix} \cdot V(k) \cdot \Delta T \\ \alpha_h(k) = \alpha_h(k-1) + \theta(k) \end{cases} \quad (1)$$

表 1 主要符号及其意义

符号	意义
$X[x \ y]^T$	二维坐标
$X_{final}(k)$	k 时刻 LAEL 最终定位结果
$X_h(k)$	k 时刻相对定位的定位位置
$\alpha_h(k)$	k 时刻相对定位的方向信息
$X_r(k)$	k 时刻节点的射频定位位置
ΔT	两次定位的时间间隔
$\theta(k)$	k 时刻节点运动方向的改变
$V(k)$	k 时刻节点运动速度
N	历史记录长度

由式(1)可知, 相对定位技术要求节点具有速度与方向的测量功能. 假如初始位置以及初始运动方向是已知的, 那么在没有测量或者控制误差的情况下, 相对定位轨迹应该与真实运动轨迹一致. 但误差是必然的, 并且节点相对定位是以上一次相对定位的结果为起点, 即定位结果具有历史相关性, 因此路程误差、

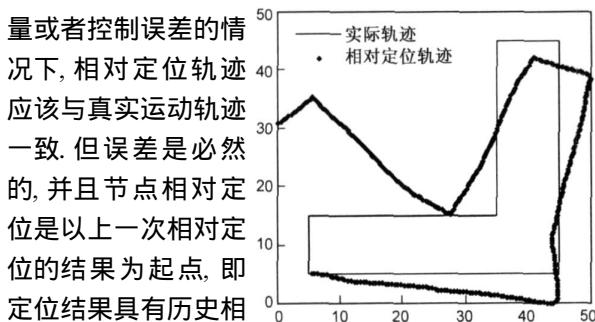


图 1 相对定位轨迹

角度误差将会逐渐累积起来, 最终使节点丧失位姿状态信息, 如图 1 所示. 同时, 从图 1 中我们可以看出, 尽管节点可能丧失位姿状态信息, 但由于相对定位在短距上精度较高, 因此相对定位轨迹的形状(指某一片断)仍然可以反映真实运动轨迹的形状. 本文提出的 LAEL 算法就是利用这两条轨迹局部形状的相似性来改善移动节点的定位精度.

3 基于位姿评估的节点定位算法

3.1 LAE 位姿评估

要利用相对定位首先就必须消除它的累积误差. LAE 通过对相对定位轨迹进行一定的平移、旋转等变换, 使得其与射频定位结果的差别最小, 然后根据平移量以及旋转量来估计相对定位的累积误差, 进而消除累积误差, 获取定位结果. LAE 过程如图 2 所示, 具体说明如下:

(1) 如图 2(a) 所示, k 时刻时把最近 N 次有效射频定位结果表示为

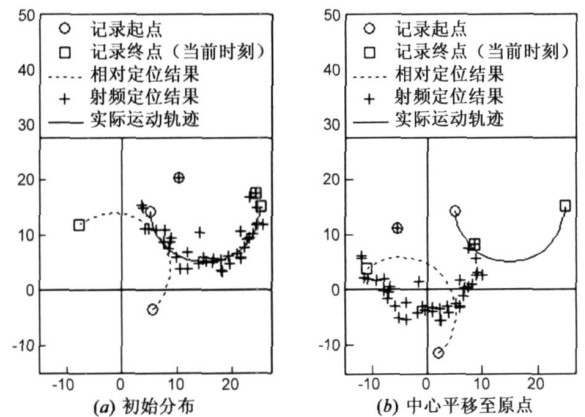
$$Y_{rN} = [X_{r1} \ X_{r2} \ \dots \ X_{rN}] \quad (2)$$

同样地, 把相对定位结果表示为

$$Y_{hN} = [X_{h1} \ X_{h2} \ \dots \ X_{hN}] \quad (3)$$

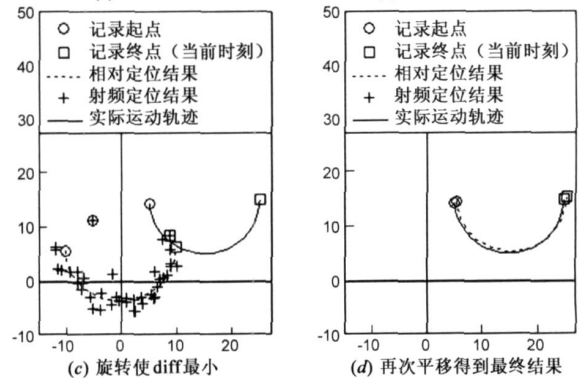
其中 X_{rN} , X_{hN} 对应于 k 时刻射频定位及相对定位的结果.

(2) 如图 2(b) 所示, 平移相对定位结果以及射频定位结果, 使二者的中心为原点, 得到平移后的坐标矩阵



(a) 初始分布

(b) 中心平移至原点



(c) 旋转使 diff 最小

(d) 再次平移得到最终结果

图 2 LAE 位姿评估算法图解

如下

$$CY_{rN} = [CX_{r1} \quad CX_{r2} \quad \dots \quad CX_{rN}]$$

$$= [X_{r1} - C_{rN} \quad X_{r2} - C_{rN} \quad \dots \quad X_{rN} - C_{rN}] \quad (4)$$

$$CY_{hN} = [CX_{h1} \quad CX_{h2} \quad \dots \quad CX_{hN}]$$

$$= [X_{h1} - C_{hN} \quad X_{h2} - C_{hN} \quad \dots \quad X_{hN} - C_{hN}] \quad (5)$$

$$C_{rN} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N X_{ri} \quad (6)$$

$$C_{hN} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N X_{hi} \quad (7)$$

(3)如图 2(c)所示,绕原点旋转相对定位结果,使其与射频定位结果的差值最小,相对定位结果绕中心旋转 θ , 得到的坐标可表示为

$$RCY_{hN}(\theta) = [RCX_{h1}(\theta) \quad RCX_{h2}(\theta) \quad \dots \quad RCX_{hN}(\theta)] \quad (8)$$

$$RCX_{hi}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot CX_{hi}$$

旋转使定位结果的差值最小是指寻找如下 θ_{\min} (求解过程见第 3.2 节)

$$\theta_{\min} = \min \text{diff}(\theta) \quad (9)$$

$$\text{diff}(\theta) = \|RCY_{hN}(\theta) - CY_{rN}\|^2 \quad (10)$$

显然 $\text{diff}(\theta)$ 是 θ 的连续可导函数,其导数也是连续可导的,且它是以 2π 为周期的函数.通过求解可得处于一个周期 $[-0.5\pi, 1.5\pi]$ 内且使 $\text{diff}(\theta)$ 值取最小值的 θ_{\min} 为

$$\theta_{\min} = \begin{cases} 0 & (a = 0, b = 0) \\ -0.5\pi & (a = 0, b > 0) \\ 0.5\pi & (a = 0, b < 0) \\ \arg \tan(b/a) & (a < 0) \\ \arg \tan(b/a) + \pi & (a > 0) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} a = \sum_{i=1}^N cx_{hi} \cdot cx_{ri} + cy_{ri} \cdot cy_{ri} = \{CY_{hN}, CY_{rN}\} \\ b = \sum_{i=1}^N (cx_{hi} \cdot cy_{ri} - cy_{hi} \cdot cx_{ri}) = \left\{ CY_{hN}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} CY_{rN} \right\} \end{cases} \quad (12)$$

需注意的是 $a = 0, b = 0$ 这种情况只有在节点长时间不动的情况下才会出现.这种情况下,虽然任意的 θ 都能使 $\text{diff}(\theta)$ 取最小值,但本文在实际运算过程中取其值为 0.

(4)如图 2(d)所示,得到 θ_{\min} 之后,再次平移相对定位轨迹,使其中心为原射频定位中心 C_{rN} , 同时可以获得最终定位结果以及速度方向如下

$$X_{\text{final}}(k) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{\min}) & -\sin(\theta_{\min}) \\ \sin(\theta_{\min}) & \cos(\theta_{\min}) \end{bmatrix} (X_{hN} - C_{hN}) + C_{rN} \quad (13)$$

$$\alpha_{\text{final}}(k) = \alpha_h(k) + \theta_{\min} \quad (14)$$

3.2 LAEL 算法

完整的基于 LAE 的移动节点定位算法流程图如图 3

所示.

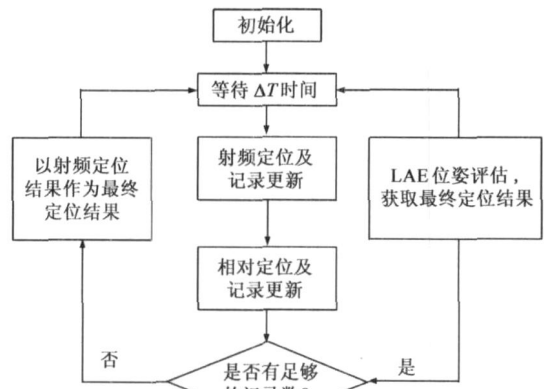


图 3 LAEL 流程图

以下说明其中子过程:

(a)初始化:在初始化阶段,节点为相对定位设定初始位姿状态如下

$$\begin{cases} X_h(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \alpha_h(0) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

初始位姿也可以设定为其他任意值,且不会对最终定位结果产生任何影响.这是因为 LAEL 只利用相对定位结果的轨迹形状,与具体位置无关.

(b)射频定位及记录更新:节点利用射频定位方式,例如文献[3~10]所提出的方法,获取射频定位结果,同时更新历史记录.

(c)相对定位及记录更新:节点以相对定位方式,利用式(1)获取相对定位结果,同时更新历史记录.

(d)LAE 位姿评估算法:对定位结果历史记录应用 LAE 算法来评估节点的当前位置,从而获取最终定位结果.

4 仿真结果及性能分析

由于 LAEL 本质上通过射频定位来修正相对定位累积误差进而获取定位结果,因此其性能主要反映在对射频定位精度的改善情况.为了说明 LAEL 的性能,我们做了大量的仿真实验,图中曲线上的点是 50 次仿真结果的平均值.

4.1 仿真环境与仿真模型

本文仿真环境如下:如图 4 所示移动节点在一个 $50\text{m} \times 50\text{m}$ 的区域,沿图中黑色实线逆时针行进一周,节点的速度为 1m/s ,每 0.5s 发起一次定位,假定通

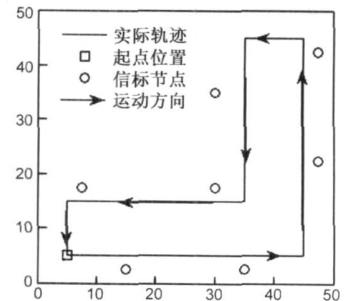


图 4 仿真环境

信距离为 35m, 仿真工具为 Matlab 7.3.

考虑到当前无线传感器网络节点定位大多的是基于 RSSI 方式, 故仿真实验选择 RSSI 方式的 DTN^[6] (Dynamic Triangular Algorithm) 作为 LAEL 中直接射频定位算法, 当然也可选用其它定位算法. 节点 RSSI 采用文献 [12] 的 Log Normal 模型, 该模型认为节点接收到相距 d 的信标节点的 RSSI 强度服从如下高斯分布

$$RSSI_{dBm}(d) \sim N(P_{dBm}(d), \sigma_{dB}^2) \quad (16)$$

$$P_{dBm}(d) = P_{dBm}(d_0) - 10n \lg(d/d_0) \quad (17)$$

其中下标 dBm 和 dB 表示单位, d_0 是参考距离, $P_{dBm}(d_0)$ 是 d_0 处的理论射频强度值, 相对的, $P_{dBm}(d)$ 是 d 处的理论射频强度值, σ_{dB}^2 是影子方差 (variance of the shadowing^[12]), n 是路径传播损耗指数, 由环境决定.

可得到对 d 的最佳估计 \hat{d} 为

$$\begin{aligned} \hat{d} &= d_0 \cdot 10^{\frac{P_{dBm}(d_0) - RSSI_{dBm}(d)}{10n}} \\ &= d_0 \cdot 10^{\frac{P_{dBm}(d_0) - P_{dBm}(d)}{10n}} \cdot 10^{\frac{P_{dBm}(d) - RSSI_{dBm}(d)}{10n}} \end{aligned} \quad (18)$$

将式(17)代入式(18)可得

$$\hat{d} = d \cdot 10^{u(d)} \quad (19)$$

$$u(d) = \frac{P_{dBm}(d) - RSSI_{dBm}(d)}{10n} \quad (20)$$

由式(16)、(20)可知 $u(d)$ 服从如下高斯分布

$$u(d) \sim N(0, cov), cov = \frac{\sigma_{dB}^2}{(10n)^2} \quad (21)$$

4.2 仿真结果与性能分析

图 5 是在 $cov = 0.02$ 以及 $cov = 0.06$ 时的一次仿真结果. 图 5(a) 和图 5(b) 的 DTN 定位精度分别为 0.70m、2.26m, 而相应的 LAEL 定位精度分别为 0.29m、0.93m. 图 6 显示了定位误差分布. 图 5 和图 6 分别从不同的角度说明了 LAEL 对射频定位算法精度的改进情况.

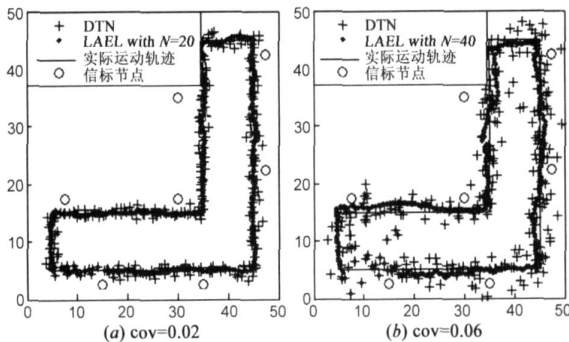


图 5 LAEL 与 DTN 定位结果比较

在不同 cov 取值条件下, LAEL 定位精度与 DTN 定位精度比较如图 7 所示. 从图中可以看出 LAEL 的定位精度比 DTN 的定位精度有明显提高, 提高率可达提高一倍多. 另外, 从图中也可以看出 LAEL 的性能与 N 值直接相关. LAEL 定位精度与记录长度 N 的关系可以从

图 8 得到, 射频定位精度越高 (对应于 cov 越小), 所需的 N 的值就越小, 反之则 N 的值就越大. 不适当的 N 反而会恶化定位精度, 因此必须选择合适的记录长度 N , 才能够最好地发挥 LAEL 的定位效果. 仿真结果表明, 当射频定位精度在 1m 以下时, N 取值为 20~30, 当射频精度为 1~2m 时, N 取值为 30~50, 当射频精度在 2~4m 之间时, N 的取值为 50~80.

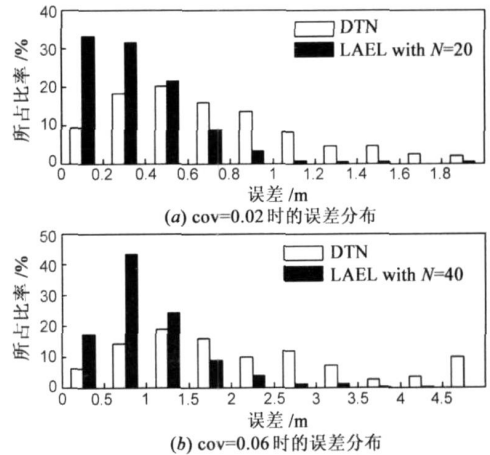


图 6 LAEL 与 DTN 的误差分布

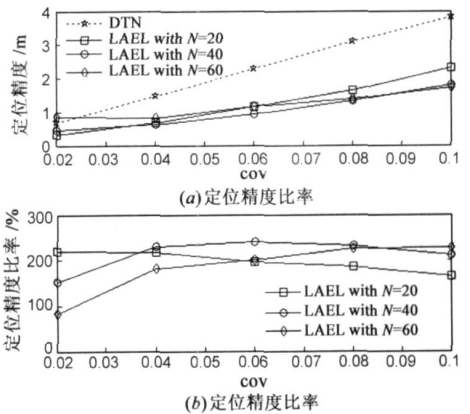


图 7 LAEL 定位精度与 DTN 定位精度的比较

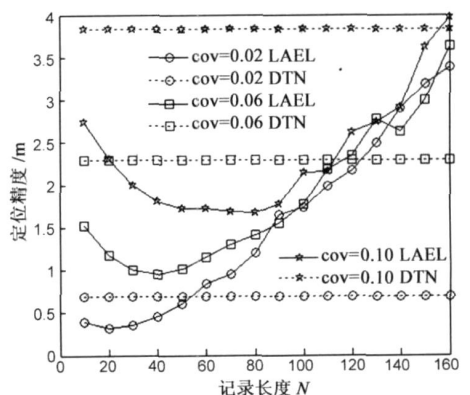


图 8 LAEL 定位精度与记录长度 N 的关系

5 结论

本文提出一种利用移动节点的速度信息, 对射频直

接定位信息(或者其它直接定位信息)进行修正,从而获得较高定位精度的节点定位算法—LAEL 定位算法.该算法适用于具有速度、方向测量功能与射频定位(或其它直接定位)功能的自主移动节点的定位,它具有节点定位精度高、实现成本低等特点.仿真实验结果表明,相对于直接定位结果,所提出的 LAEL 算法在参数取值合理的条件下,能够有效提高节点定位精度.

参考文献:

- [1] Kuσ Feng Ssu, Chia Ho Ou, Jiau H C. Localization with mobile anchor points in wireless sensor networks[J] . IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3) : 1187– 1197.
- [2] Du X, Lin F. Improving sensor network performance by deploying mobile sensors[A] . The 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC 2005) [C] . Phoenix, USA: IEEE Press, 2005. 67– 71.
- [3] Nissanka B Priyantha, Anit Chakraborty, Hari Balakrishnan. The Cricket location support system[A] . Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking[C] . Boston, USA: ACM Press, 2000. 32– 43.
- [4] Niculescu D, Badri Nath. Ad hoc positioning system(APS) using AOA[A] . Proceedings of the 22th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies(INFOCOM 2003) [C] . San Francisco, USA: IEEE Press, 2003. 1734– 1743.
- [5] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: an in building RF based user location and tracking system[A] . Proceedings of the 9th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies(INFOCOM 2000)[C] . Israel: IEEE Computer Society, 2000. 775– 784.
- [6] Luo R C, Ogst Chen, Pan S H. Mobile user localization in wireless sensor network using grey prediction method[A] . The 32nd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2005) [C] . Raleigh, USA: IEEE Press, 2005. 2680– 2685.
- [7] Ogawa T, Yoshino S, Shimizu M, Suda H. A new in door location detection method adopting learning algorithms[A] . Pro-

ceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2003) [C] . Texas, USA: IEEE Press, 2003. 525– 530.

- [8] Lingxuan Hu, David Evans. Localization for mobile sensor networks[A] . Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking(MobiCom 2004) [C] . Philadelphia, USA: ACM Press, 2004. 45– 57.
- [9] Stevens Navarro Enrique, Wong Vincent W S, Vivekananda Vijayanth. Dual and mixture monte carlo localization algorithms for mobile wireless sensor networks[A] . Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2007) [C] . Hong Kong, China: IEEE Press, 2007. 4024– 4028.
- [10] 陈永光, 李修和. 基于信号强度的室内定位技术[J] . 电子学报, 2004, 32(9) : 1456– 1458.
Chen Yong guang, Li Xiur he. Signal strength based indoor geolocation[J] . Acta Electronica Sinica, 2004, 32(9) : 1456– 1458. (in Chinese)
- [11] Patwari N, Hero A O, Perkins M, et al. Relative location estimation in wireless sensor networks[J] . IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(8) : 2137– 2148.

作者简介:



陈桂忠 男, 1983 年 6 月出生于福建泉州. 2006 年毕业于浙江大学信息与电子工程学系. 现为浙江大学电路与系统硕士研究生, 从事无线传感器网络节点定位方面的有关研究.
E mail: int2008@yahoo. com. cn



董利达 男, 副教授、硕士生导师. 1970 年 10 月出生于浙江. 1993 年、1996 年分别在南京理工大学获学士、工学硕士学位, 2004 年在浙江大学获工学博士学位, 2007 年浙江大学与浙江中控集团联合培养博士后出站. 现为浙江大学浙江大学信息与电子工程系教师. 主要研究方向有工业无线网络技术、Petri 网理论与应用等.
E mail: lddong2002@y163. com