

无线传感器网络环境感知的节点定位方法^{*}

邓 罡, 陈颖文, 徐 明, 王 森
(国防科技大学计算机学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 节点定位是无线传感器网络的关键技术之一, 许多应用都跟节点位置息息相关。针对基于 RSSI 的定位算法测距误差通常较大的问题, 提出了一种环境感知的节点定位方法, 该方法首先根据导标节点之间的相互关系, 将网络覆盖区域划分为若干子区域, 然后再通过他们之间的相互协作, 分别确定出无线信号在不同子区域环境下具体的传播损耗模型, 从而提高测距精度和定位精度。仿真结果表明, 该方法能提高测距精度约 15%~30%。

关键词: 节点定位; 基于测距算法; 接收信号强度指示; 环境感知

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 06-0114-06

无线传感器网络, 简称无线传感网, 在工业控制, 农业生产, 环境监测, 军事国防等各方面有着广泛的应用前景。节点定位是无线传感器网络的关键技术之一, 许多应用都跟节点位置息息相关。近年来, 随着无线传感网的发展, 国内外针对节点定位的研究很多。按照定位手段的不同, 当前的定位算法大体可以分为两类: 基于测距算法 (range-based) 和无需测距算法 (range-free)^[1]。基于测距算法通过测量节点之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等定位算法计算节点位置, 而无需测距定位算法则不需要距离和角度信息, 算法根据网络的连通性等信息实现节点定位^[1-2]。典型的无需测距的算法有: 质心算法 (centroid algorithm), APIT (Approximate Point-In-Triangulation Test)^[1], DV-Hop 算法^[2], REP (Rendered Path) 算法^[3]等。这些算法通常假设网络覆盖均匀, 有较高的连通度等, 在实际中很难达到理想的性能, 个别算法 (如 REP 算法) 虽然克服了上面的一些缺点, 但又存在实施困难等缺点, 在实际网络中通常也难于实现。另外, 无需测距的定位算法定位精度通常都不高。

虽然无需测距的算法能满足大多数定位精度要求较低的应用, 但对某些精度要求较高的应用, 无需测距算法显然不能胜任, 为此, 研究人员提出了很多基于测距的定位算法。与无需测距的定位算法相比, 基于测距的定位算法对网络覆盖是否均匀, 连通性等要求相对较低, 定位精度高, 因而具有较

高研究价值。在基于测距的定位算法中, 常用的测距手段有: TOA (Time of Arrival), TDOA (Time Difference of Arrival; TDOA)^[4], AOA (Angle of Arrival; AOA)^[5], RSSI (Received Signal Strength Indication)^[6-7]等。为了进行定位, 网络中的节点通常被划分为导标节点和未知节点, 所谓的导标节点 (beacon nodes) 即是在网络的初始化阶段位置信息就已知的节点, 而未知节点 (unknown nodes) 则指的是导标节点以外的节点。未知节点首先通过测量与导标节点的距离, 然后使用一定的定位方法计算出自身的位置。由于能量和成本的限制, 传感器节点功能通常都较弱, TOA, TDOA 和 AOA 等测距方法一般都需要增加专门的硬件设备, 因此在传感器网络上通常都难于实现。基于 RSSI 的测距方法直接利用无线设备的标准特性之一——RSSI 进行测距, 无需增加专门的测距设备, 功耗成本低, 所以成为当前的研究热点之一^[6,8-11]。

基于 RSSI 进行定位, 首先需要测量出未知节点到导标节点的信号强度, 然后再根据无线信号传播模型, 计算出未知节点到导标节点的距离。目前基本的无线信号传播模型有两类: 经验模型 (Empirical Model) 和确定性模型 (Deterministic Model)。经验模型^[6,8-9]首先在网络覆盖区域中测量出每个区域接收到的导标节点的信号强度的概率值, 当一个未知节点接收到导标节点的信号强度时, 通过极大似然估计等估算出最可能的位置。这样的算法, 虽然考虑了环境因素对各个区域信号强度的影

^{*} 收稿日期: 2008-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60773017)

作者简介: 邓罡 (1983 年生), 男, 硕士研究生; E-mail: gang.den@163.com

响,能在一定程度上提高定位的精度,但也存在着网络布置困难,通用性差,导标节点一旦移动或退出网络,将引起较大的定位误差等问题。确定性模型^[6,10-11]又称射线光学(Ray-Optical)或射线跟踪(Ray-Tracing)模型,即将高频无线信号看作向不同方向发出的光线,再依靠对室内环境信息的详细建模,对每一根射线进行跟踪来建立无线信号传播模型。相比而言,使用确定性模型进行定位,部署更加容易,通用性更好。常见的确定性模型主要有:自由空间传播模型(free space propagation model)、对数距离路径损耗模型(log-distance pathloss model)、哈它模型(hata model)、对数-常态分布模型(log-distance distribution model)等。但是,研究和实验表明,确定性模型最大的问题在于,由于环境的千差万别,不同环境中反射、衍射、多径效应等各不一样,因此,固定的模型通常很难反映环境对信号传播的影响。针对确定性模型存在的问题,本文提出了一种环境感知的定位方法(EAM)。

EAM首先根据导标节点之间的相互关系,将网络覆盖区域划分为若干子区域,然后再通过导标节点之间的相互协作,分别确定出无线信号在不同子区域环境下具体的传播损耗模型,最后,未知节点根据自身所在的区域,使用与导标节点的RSSI信息及相应环境下的信号损耗模型,计算出自身的位置。

1 环境感知定位方法

1.1 问题的描述

如图1所示,图中实心圆点代表导标节点,空心圆圈代表未知节点。导标节点和未知节点之间互相接收RSSI,并通过一定的信号衰减模型将信号强度转化为距离,从而实现定位。研究表明,在室内

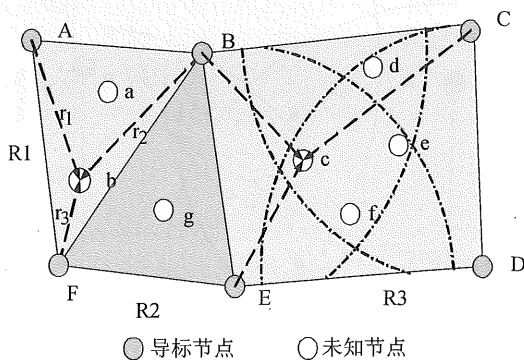


图1 节点定位示意图

Fig. 1 Node localization schematic diagram

条件下,对数距离路径损耗模型(log-distance path loss model)更为合理^[12]。该模型如式(1)所示:

$$P_r(d) = A_0 - 10\gamma_0 \lg d_0 - 10\gamma \lg(d/d_0) + X_\sigma \quad (1)$$

式中, $P_r(d)$ 为距离发射点 d 处的接收信号强度,单位为 dBm; d_0 为接收功率的参考点; A_0 为该节点的发射功率; γ 为实际的路径损耗指数; γ_0 为自由空间路径损耗指数,取值通常在 2~4 之间,对室内环境,通常取 2; X_σ 为 0 均值的高斯分布随机变量,标准偏差为 σ , σ 越大,表示模型的不确定性越大。由式(1)不难推出 RSSI 与距离的对应关系:

$$d = d_0 \times 10^{[A_0 - 10\gamma_0 \lg d_0 - P_r(d) - X_\sigma]/(10\gamma)} \quad (2)$$

当一个未知节点与至少 3 个导标节点的距离确定之后,即可使用一定的定位算法(如三边定位法等)求出节点的位置。

1.2 方法思想与定位求解

公式(1)包含 3 个未知参数: d_0 , γ 和 σ 。对于不同的环境,参数将有所不同,同时,参数的不同,也反映了不同环境中信号传播模型的特性。为了获得模型的参数取值,通常的做法是在网络的适当区域测量出模型的参数,从而作为整个网络区域的参数,或者由经验值给出,如文献[7]。如图1所示,为了确定模型的参数,可以在网络覆盖区域中任选两组点,如 B、E, B、F, 测量出他们之间的距离和信号强度,然后根据(1)式求出模型的参数,从而作为整个网络覆盖区域中模型的参数。然而在实际测量中,由于反射,衍射,多径效应等的影响,在不同环境中,相同的距离信号强度变化可能很大^[6]。因此,不同环境中,模型的参数变化较大,网络的特定区域中测量所得的参数通常不能反映整个网络中信号传播的特性。如图2所示为基于 MICAz 无线节点,在不同区域测量所得 RSSI 与距离的对应关系比较,从图中可以很明显的看出,由于环境的不同, RSSI 与距离之间的关系相差较大,如图中所示,几乎相同的 RSSI (约 -93 dBm), 在不同区域中所对应的距离可能相差 10 m (在区域 A 中相应的距离仅为 8 m, 而在区域 B 中相应的距离为 18 m), 显然,此时若使用固定的模型参数进行测距,将会产生极大的测距误差。基于以上的测量和分析,本文提出一种通过导标节点之间互相协作,实现自适应地确定网络各个区域模型参数的方法。

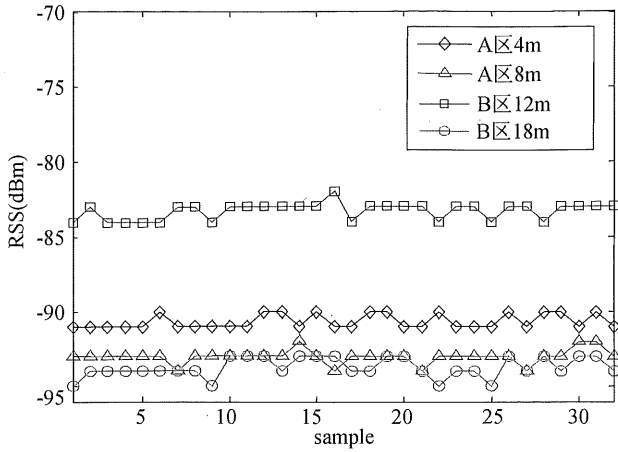


图 2 不同区域 RSSI 与距离关系比较

Fig. 2 The comparison of the relation between RSSI and distance between different regions

考察公式 (2), 由于 $X_e \sim N(0, \sigma^2)$, 于是不难推出:

$$E(d) = d_0 \times 10^{[A_0 - 10\gamma_0 \lg d_0 - E(P_\gamma(d))]/(10\gamma)} \quad (3)$$

在实际测量中, 常用均值代替期望进行计算, 即 $E(P_\gamma(d)) \approx (\sum_{i=1}^k P_i)/k$ (k 为接收到 RSSI 的次数, P_i 为第 i 次接收到的 RSSI), 于是式 (3) 仅包含两个未知参数 d_0 和 γ 。由于导标节点位置均已知, 从而它们之间的距离也已知, 如果有两组以上的导标节点能互相通信, 则由式 (3) 即可列出一个二元方程组, 从而能够求解出该区域的模型参数。

EAM 的基本思想如图 3 所示, 图中实心节点为导标节点, 空心节点为未知节点。假设导标节点 A, B, C 之间能互相通信, 如图中深色虚线所示, 未知节点与导标节点之间也可以互相通信, 如图中浅色虚线所示, 则导标节点 A 可以接收到 B, C 的

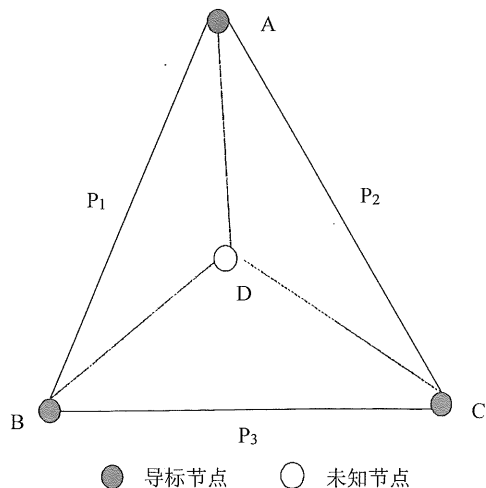


图 3 环境感知定位方法的基本思想

Fig. 3 Environment aware node localization method

信号强度 P_1, P_2 , 同理, B, C 也可分别接收到 A, C 和 A, B 的信号强度, 且导标节点之间的距离已知。令 $\overline{AB} = d_1, \overline{AC} = d_2, \overline{BC} = d_3$, 则对导标节点 A, 由式 (3) 可以联立得两个方程如下:

$$\begin{cases} E(d_1) = d_0 \times 10^{[A_0 - 10\gamma_0 \lg d_0 - E(P_\gamma(d_1))]/(10\gamma)} \\ E(d_2) = d_0 \times 10^{[A_0 - 10\gamma_0 \lg d_0 - E(P_\gamma(d_2))]/(10\gamma)} \end{cases} \quad (4)$$

由于 d_1, d_2 均已知, 所以有 $E(d_1) = d_1, E(d_2) = d_2$, 于是式 (4) 可简化为:

$$\begin{cases} d_1 = d_0 \times 10^{[A_0 - 10\gamma_0 \lg d_0 - E(P_\gamma(d_1))]/(10\gamma)} \\ d_2 = d_0 \times 10^{[A_0 - 10\gamma_0 \lg d_0 - E(P_\gamma(d_2))]/(10\gamma)} \end{cases} \quad (5)$$

解方程组 (5) 即可得到导标节点 A 相对于区域 ABC 的参数 d_0, γ 如下:

$$\begin{cases} \gamma = \frac{E(P_\gamma(d_2)) - E(P_\gamma(d_1))}{10 \times (\lg d_1 - \lg d_2)} \\ d_0 = 10^{[A_0 - 10\gamma \lg d_1 - E(P_\gamma(d_1))]/[10 \times (\gamma_0 - \gamma)]} \end{cases} \quad (6)$$

同理, 可分别解出导标节点 B, C 相对于区域 ABC 的信号传播损耗模型参数。当参数确定之后, 如果导标节点接收到未知节点的信号强度, 首先判断未知节点所在的区域, 然后使用相应的参数计算出未知节点的距离。如当导标节点 A 接收到未知节点 D 的信号强度之后, 首先判断未知节点 D 是否位于三角形 ABC 之内, 然后再使用相应区域的参数计算出与未知节点的距离。

在至少有 3 个导标节点可以互相通信的情况下 (如图 3 所示), 通过上面的方法, 能较好确定出信号传播损耗模型的参数。但是, 对于某些导标节点较稀疏的网络, 上面的条件通常难以满足, 在此情况下, 可以将上面的基于三角形区域的方法扩展到四边形区域, 只要网络中存在两组可以互相通信的导标节点, 即可确定出模型的参数。如图 4 所示, 导标节点 A, D 能互相通信, B, C 能互相通

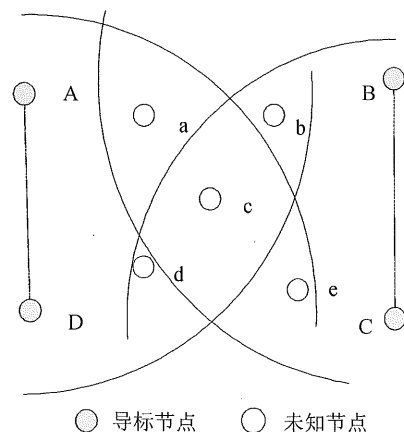


图 4 扩展环境感知定位方法

Fig. 4 Extended environment aware node localization method

信, 则通过它们之间的协作, 同样可以建立方程组, 从而解出信号衰减模型在区域 ABCD 中的参数, 当导标节点收到未知节点 (如 c) 的 RSSI 信息时, 首先判断未知节点所在的区域, 然后再使用相应的参数计算出与未知节点的距离。通过以上的扩展, 大大提高了方法的实用性, 在网络中仅有两对可以互相通信的导标节点时, EAM 方法依然有效。

2 仿真实验与分析

为了检验 EAM 的性能, 我们在 Matlab 平台上对方法进行了仿真。

2.1 仿真环境建立

仿真假设在 200 m × 200 m 的矩形区域中, 随机布撒 400 个节点, 导标节点随机分布, 密度分别为 15%, 20%, 25%, 30%, 节点通信距离为 30 m, 信号传播损耗由式 (1) 确定。

首先, 我们为矩形的中心确定一组参数 d'_0 和 γ' , 参数 d_0 和 γ 则以距矩形中心的距离 d 为基准, 在此基础上随机波动, 如下式所示:

$$\begin{cases} d_0 = d'_0 + kd + X_\sigma \\ \gamma_0 = \gamma'_0 + md + Y_\sigma \end{cases} \quad (7)$$

其中, k, m 为常数, X_σ, Y_σ 为均值为 0 的均匀分布随机变量。由式 (7), 我们为每个节点 (包括导标节点和未知节点) 确定了信号传播损耗模型。接下来, 每个未知节点使用其自身的信号传播损耗模型向邻居导标节点发送 RSSI, 导标节点接收到该 RSSI 后, 使用自身的传播损耗模型将其与未知节点的 RSSI 信息转化为距离, 该距离即导标节点测量所得距离, 并比较该距离与真实距离的误差, 将其定义为绝对误差。我们主要关心在不同的导标节点密度下, 各个误差段的误差所占的比例 $R = \frac{\text{该误差段的误差出现次数}}{\text{测量次数}}$, 以及距离测量的相对误差

$E = \frac{\text{绝对误差}}{\text{通信距离}}$ 。为了分析各个误差段的误差所占的比例, 我们以 2 m 为一个误差段进行了统计, 误差越小的误差段所占的比例 R 越大, 测距精度越高, 反之则精度越低, 而相对误差 E 越低, 精度越高, 反之则精度越低。

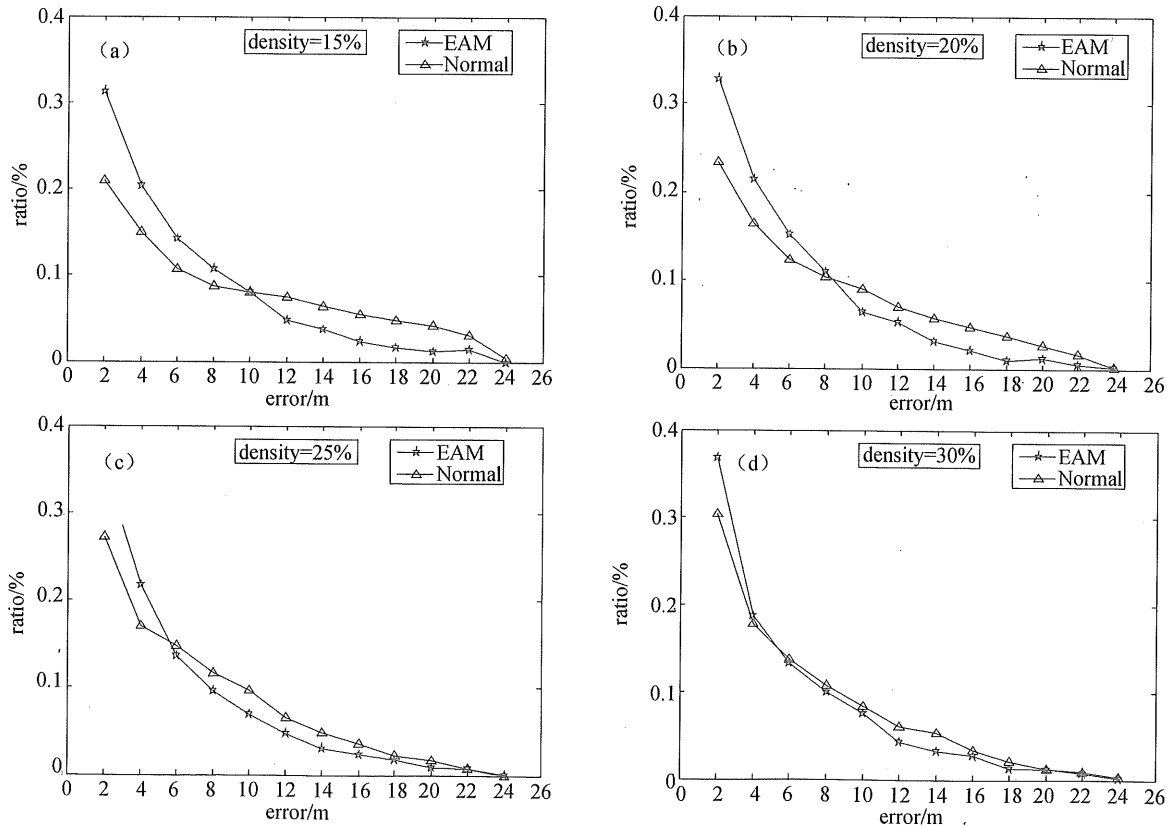


图5 仿真结果

Fig. 5 Simulation results

2.2 仿真结果分析

基于以上的仿真环境, 仿真结果如图 5 所示,

图中 (a), (b), (c), (d) 分别为导标节点密度 D 为 15%, 20%, 25%, 30% 的仿真结果, 横坐

标为测距误差, 单位为 m , 纵坐标为该差段的误差所占的百分比 R , 图中两条曲线分别为使用 EAM 方法和通常的测距方法的测距误差。对比图 (a) 到 (d) 可以发现, 在导标节点密度较低时, EAM 方法具有显著的测距优势, 表现在图中为误差较小的误差段所占比例显著地高于通常的测量方法, 而误差较大的误差段所占比例则明显地低于通常的测距方法; 随着导标节点密度的增加, 两种方法的精度都有所增加, 但两种方法的差距缩小, 这主要是因为随着导标节点密度增加, 导标节点与未知节点之间的平均距离缩小, 测距的绝对误差也随之缩小的缘故。从图中可以看出, 使用本文提出的测距方法进行测距, 测距误差在 $6m$ 以下的比例明显大于通常的测距方法。如图 6 所示为不同的导标节点密度下, 使用 EAM 方法和通常方法平均相对误差的比较, 图中横坐标为导标节点密度 D , 纵坐标为相对误差 E , 仿真结果表明, 使用本文提出的测距方法, 能有效提高测距精度约 $15\% \sim 30\%$ 。

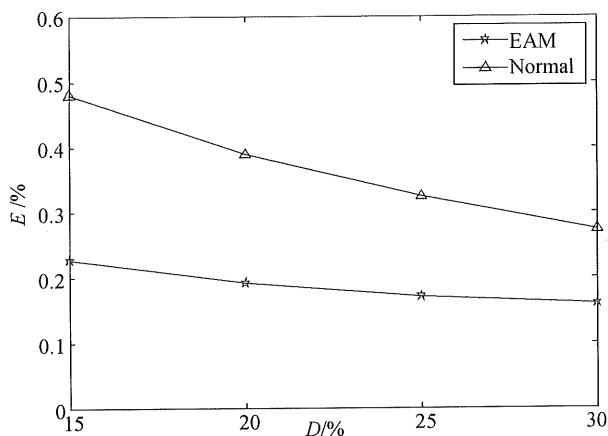


图 6 导标节点不同密度时的相对误差

Fig. 6 The relation between beacon density and relative error

3 结 论

由于基于 RSSI 的定位算法无需增加专门的硬件设备、成本低、功耗小等, 所以, 目前, 基于 RSSI 的定位算法很多。使用 RSSI 进行定位最大的困难在于信号强度受环境影响较大, 信号强度和距离之间的对应关系很难用固定的模型加以描述。本文在实验的基础上提出了通过导标节点互相协作确定模型参数的方法, 仿真结果表明, 该方法能较大地提高测距的精度, 从而提高定位的精度。另外, 模型通过导标节点之间的互相协作, 自动完成参数的确定, 可以减少繁琐的手工测量和计算, 极大地节省了网络部署的时间和成本, 特别对于大规模的

传感器网络应用尤为必要。

本文分别对 3 个导标节点能互相通信和仅有两对导标节点能互相通信的情况进行了讨论, 对于网络中任何两个导标节点都不能互相通信或仅有两个导标节点能互相通信的情况 (这样的情况只有在极稀疏的网络中才可能出现), 这种情况并不常见。为了防止在此情况下, 无法确定模型参数, 可以首先在网络的适当区域中测出模型的参数, 作为参数的备用值。

本文主要针对对数距离路径损耗模型进行了讨论, 实际上, 本文提出的方法对其他模型一样有参考价值, 下一步, 我们将对 EAM 方法应用于其他模型进行研究。

参考文献:

- [1] HE T, HUANG C D, BLUM B M, et al. Range free localization schemes for large scale sensor networks [C] // Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2003), San Diego, CA, 2003: 81-95.
- [2] NICULESCU D, NATH B. DV-based positioning in ad hoc networks [J]. Journal of Telecommunication Systems, 2003, 22(14): 267-280.
- [3] LI MO, LIU Yunhao. Rendered Path: Range-free localization in anisotropic sensor networks with holes [C] // Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2007).
- [4] SAVVIDES A, HAN C, SRIVASTAVEA M B. Dynamic Fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors [C] // Proceedings of ACM MobiCom, 2001.
- [5] NICULESCU D, NATH B. ad hoc positioning system (APS) using AOA [C] // Proceedings of IEEE INFOCOM, 2003.
- [6] BAHL P, PADMANABHAN V N. RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System [C] // Proceedings of IEEE INFOCOM, 2000.
- [7] 杨维, 周嗣勇, 乔华. 煤矿安全监测无线传感器网络节点定位技术 [J]. 煤炭学报, 2007, 32(06): 652-656.
- [8] RAY S, LAI W, PASCALIDIS I. Deployment optimization of sensor network-based stochastic location-detection systems [C] // Proceedings of INFOCOM 2005.
- [9] SAHA S, CHAUDHURT K, SANGHI D, et al. Location determination of a mobile device using IEEE 802.11 access point signals [C] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2003.
- [10] MADIGAN D, EINAHRAWY E, MARTIN R. Bayesian indoor positioning systems [C] // Proceedings of INFOCOM, 2005.
- [11] NICULESCU D, NATH B. Localized positioning in ad

- hoc networks[C]//Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications 2003.
- [12] THEODORE S R. Wireless communications: principles and practice[M]. Prentice Hall PTR, 1996.
- [13] 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 (5): 857 - 868.

Environment Aware Node Localization Method for Wireless Sensor Networks

DENG Gang, CHEN Ying-wen, XU Ming, WANG Sen

(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Node localization is one of the essential techniques for wireless sensor networks, especially for location - dependent applications. As is known, the RSSI range-based localization algorithms have a considerable error in distance measure. To address this issue, we propose the Environment Aware Node Localization Method (EAM). In EAM, the whole covering area of the sensor network is divided into several sub regions, and then the method can figure out the parameters of the propagation model in the corresponding sub region with the cooperation of each beacon node. Based on the propagation model in each sub region, EAM can improve the precision of the distance measurement. Simulation results show that the average distance measurement error can be reduced about 15 % to 30% by adopting EAM.

Key words: node localization; range-based; RSSI; environment aware

(上接第 113 页)

MDD-supported Formal Semantics Description of Architecture Models

HOU Jin-kui, MA Jun

(School of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan 250101, China)

Abstract: In order to resolve the problems in the definition of model mapping relations and in the validation of the correctness of model transformations in model-driven development, this paper use category theory to provide a precise semantics for architecture models and their relationships. Morphism composition is used to trace the interconnections and mapping relations between component models, while the consistency between architecture models at different abstract levels is maintained by functors. Category theory supports the diagrammatic representation of component models that visualizes the relationships between components and the structural features, which can be used to strengthen the understandability and traceability of model transformation. The application research shows that, the description framework does not only provide a measurement for validating the mapping rules, but also provide a theoretical guidance for model transformations.

Key words: computer software; model-driven development; model mapping; software architecture; formal semantics