

文章编号:1000-582X(2010)02-0127-06

无线传感器网络 DV-Hop 算法改进与性能

林金朝^{1,2} 李小玲¹ 刘海波³

(1. 重庆邮电大学 无线信息与传感器网络研究中心, 重庆 400065;

2. 重庆大学 通信与测控技术研究所, 重庆 400044; 3. 中兴通讯股份有限公司, 重庆 401121)

摘要:为了提高无需测距的跳距矢量(DV-Hop)定位算法在节点随机分布且拓扑动态变化的无线传感器网络中的节点定位精度,在分析 DV-Hop 算法实现思想的基础上,针对多边形定位法计算出的估计坐标存在较大误差的问题,采用泰勒级数展开法构建了坐标值的数值迭代求精算法,并对改进 DV-Hop 的性能进行了 3 个方面的仿真研究:确定了算法迭代步长收敛门限值的选择准则,对比分析了选定门限值条件下 DV-Hop 算法改进前后的定位性能,给出了不同信标节点和网络节点条件下的统计迭代次数,并以此衡量改进算法的计算量和收敛速度。仿真结果表明,合理选择迭代门限值时,通过适当增加定位节点的计算量,改进算法可明显改善定位精度和定位误差稳定性,是一种可行的无线传感器网络节点定位的解决方案。

关键词:无线传感器网络;定位算法;数值迭代;精确度与稳定性

中图分类号:TP393

文献标志码:A

Improvement and performances of DV-hop localization algorithm in wireless sensor networks

LIN Jin-zhao^{1,2}, LI Xiao-ling¹, LIU Hai-bo³,

(1. Research Center for Wireless Information and Sensor Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China; 2. Institute of Communication and TT & C, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 3. Chongqing Research Center of ZTE Corporation, Chongqing 401121, P. R. China)

Abstract: In order to improve the node localization precision of Range-Free-based DV-Hop localization algorithm in wireless sensor networks (WSNs) with randomly distributed nodes and dynamic topology, the improved algorithm is proposed. After analyzing the DV-Hop algorithm, considering the obvious errors of the estimated node coordinates calculated by Polygon-based method in traditional DV-Hop algorithm, the numerical iterative algorithm is constructed by employing Taylor series expansion, and simulation studies for the improved DV-Hop algorithm are conducted. The selection criteria for the convergent threshold of iterative step is determined, the localization performance of the improved localization algorithm is analyzed by comparing with the traditional DV-Hop algorithm under the same condition of selected convergent threshold and simulation parameters, while the calculation amount and convergence rate of the improved algorithm are also measured by the statistic iterations. The simulation results show that by selecting

收稿日期:2009-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60702055);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0914);重庆市科委科技攻关项目(CSTC,2008 AB2023)

作者简介:林金朝(1966-),男,重庆邮电大学教授、博士,主要从事信号检测与处理、无线通信技术与移动通信网络、信息与通信工程和生物医学工程交叉领域研究,(Tel)13908305318;(E-mail)linjz@cqupt.edu.cn。

reasonable iterative threshold values and appropriately increasing calculation amount for node localization, the improved DV-Hop localization algorithm greatly improves the localization precision and the error stability, which is feasible for node localization in WSNs with both randomly distributed nodes and dynamic topology.

Key words: wireless sensor networks; localization algorithm; numerical iteration; precision; error stability

无线传感器网络的传感器节点往往随机分布、拓扑结构动态变化、工作环境相对恶劣,传感器节点受体积、能量、通信与计算能力等因素的限制。节点定位是无线传感器网络进行目标识别、监控、跟踪等应用的前提和基础。因此,结合应用需求,设计适合无线传感器网络自身特点的定位系统和算法已成为无线传感器网络研究领域的热点。重点针对改善定位精度和稳定性进行研究。

无线传感器网络的节点定位问题可简单描述为根据少数位置已知的节点(信标节点),按照某种定位机制来确定定位节点的位置。现有的无线传感器网络定位算法大体分为基于测距(range-based)和无需测距(range-free)两类^[1]。前者需要通过实际测量节点间点到点的距离或角度信息,使用三边定位法或多边定位法^[2]来计算定位节点的位置;后者无需实际测量节点间距离和角度信息,仅根据网络连通性等信息实现定位节点的定位。Range-Based 定位算法对网络的硬件设施提出了较高的要求,同时,Range-Based 定位算法通常需要多次测量,这些算法在获得相对精确定位结果的时候,都要产生大量计算和通信开销。因此,Range-Free 定位算法,如:DV-Hop 算法^[3-4]、APIT^[5]、凸规划算法^[6]和 MDS-MAP 算法^[7]等,受到越来越多的关注。

DV-Hop 定位算法是目前应用最广泛的定位算法之一,其基本思想是将定位节点到信标节点之间的距离用平均每跳距离和两者之间跳数的乘积表示,算法包括 3 个阶段,其中前 2 个阶段可归结于距离估计阶段,第三个阶段为坐标计算阶段。针对 DV-Hop 算法在节点随机分布的网络环境下存在较大误差的问题,文献[8-9]分别对其进行了改进。在文献[8]中,定位节点对接收到的多个信标节点的平均每跳距离信息进行算术平均处理;文献[9]提出了一种基于网络局部拓扑的自适应共线度阈值确定方法。就这些已有改进算法而言,文献[8]以增加节点的通信开销为代价,文献[9]以增加节点的计算开销为代价来获得算法性能参数指标的提高。重点分析了 DV-Hop 算法在坐标计算阶段中的不足,在重点参考文献[10-11]的基础上,特别针对节点随机分布、网络拓扑动态变化的应用环境,对 DV-Hop 算

法提出相应改进方案,并通过仿真,比较验证改进方案的性能。

1 算法描述

第一阶段,通过典型的距离矢量交换协议,使网络中所有节点获得距离信标节点的跳数信息,在获得其他信标节点位置和跳数信息之后,每个信标节点根据式(1)计算自己的平均每跳距离。

$$C_i = \frac{\sum_{i \neq j} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum_{i \neq j} \text{hops}_{ij}}, \quad (1)$$

式中: j 为信标节点 i 数据表中的其他信标节点号, hops_{ij} 为信标节点 i 和 j 之间的跳数。

第二阶段,每个信标节点将自己计算的平均每跳距离采用可控洪泛法广播至网络中,每个节点仅接收获得的第 1 个平均每跳距离,而丢弃所有后来者。该策略可使绝大多数节点接收来自最近信标节点的平均每跳距离,定位节点根据自己数据表中记录的跳数信息计算与各信标节点之间的估计距离。

假设有信标节点 i, j, k , 如图 1 所示。信标节点 i 与 j 和 k 之间的实际距离已知,分别为 d_{ij} 和 d_{ik} (其中: $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$), 跳数分别为 hops_{ij} 、 hops_{ik} , 则信标节点 i 计算的平均每跳距离为

$$C_i = \frac{d_{ij} + d_{ik}}{\text{hops}_{ij} + \text{hops}_{ik}}. \quad (2)$$

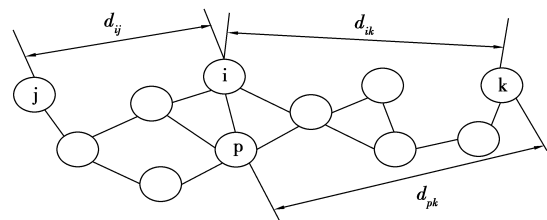


图 1 DV-Hop 定位算法示意图

假设节点 p 为定位节点,信标节点 i 与定位节点 p 之间的跳数最少,即 i 距离 p 最近。因此,节点 p 从 i 处获取平均每跳距离值,即 $C_p = C_i$, 并计算出它与信标节点 i, j, k 的估计距离分别为: $C_p \times \text{hops}_{pi}$, $C_p \times \text{hops}_{pj}$, $C_p \times \text{hops}_{pk}$ 。

第三阶段,定位节点根据第二阶段中计算出的

到各个信标节点的估计距离,利用三边定位法或多边定位法计算估计坐标,从而完成定位。

显然,对于节点随机分布的网络拓扑结构而言,信标节点到定位节点往往不是直线路径,采用 DV-Hop 算法会带来较大的距离误差。以图 1 的拓扑为例,通过 DV-Hop 算法,定位节点 p 计算得到它到信标节点 k 的距离为 $C_p \times \text{hops}_{pk}$ 。但 p, k 间的实际距离为 d_{pk} ,以这个不能反应实际值的估计距离解算定位节点的坐标定会远远偏离真实坐标。

2 算法改进

在 DV-Hop 算法第三阶段中,如果能估计定位节点与 3 个及以上信标节点的距离,则可通过三边定位法或多边定位法估计定位节点的坐标。多边定位法对测距误差敏感,当测距误差较大时,通过多边定位法计算出的估计坐标与真实坐标之间存在较大的偏差^[12]。针对这一缺陷,文献[10]提出了使用最速下降法来提高多边定位法定位精度的思想。但文献[10]只是验证了所提改进方法相对于多边定位法的有效性,而没有把改进方法应用到具体的无线传感器网络节点定位计算中,并且仿真试验中的节点总数和信标节点数都较少。

改进算法中采用多边定位法^[2]和泰勒级数展开法^[11]相结合的坐标求解算法来提高 DV-Hop 算法的定位精度。通过多边距离测量定位法可得到定位节点的估计位置,以估计值作为初值进行定位节点坐标值的迭代运算来提高定位的性能。

多边方式如图 2 所示。在图 2 中,假设 $n(n \geq 3)$ 个信标节点 $i(x_1, y_1), j(x_2, y_2), k(x_3, y_3), R_1(x_4, y_4) \cdots R_{n-3}(x_n, y_n)$ 到定位节点 $p(x, y)$ 的估计距离分别为 $d_1, d_2 \cdots, d_n$, 则:

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = d_1^2, \\ \vdots \\ (x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 = d_n^2. \end{cases} \quad (3)$$

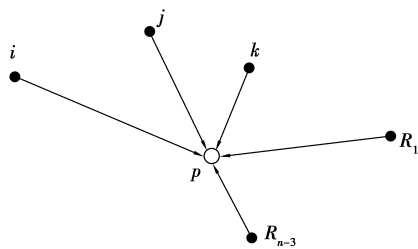


图 2 多边测量示意图

令:

$$f(x, y) = \sqrt{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2}, \quad (4)$$

对式(4)在 (x_0, y_0) 处进行泰勒展开,有

$$\begin{aligned} f(x_0+h, y_0+k) &= f(x_0, y_0) + \\ &\left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y}\right) f(x_0, y_0) + \\ &\frac{1}{2!} \left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y}\right)^2 f(x_0, y_0) + \cdots \end{aligned}$$

忽略高阶偏导数的影响,得到

$$\begin{aligned} f(x_0+h, y_0+k) &\approx \sqrt{(x_0-x_n)^2 + (y_0-y_n)^2} + \\ &\frac{(x_0-x_n)}{\sqrt{(x_0-x_n)^2 + (y_0-y_n)^2}} h + \\ &\frac{(y_0-y_n)}{\sqrt{(x_0-x_n)^2 + (y_0-y_n)^2}} k. \end{aligned} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),并利用最小二乘法^[13]求解方程组,可得到坐标修正步长 h, k 。设定式(6)的判断条件

$$\sqrt{h^2 + k^2} < \eta_{\text{threshold}}. \quad (6)$$

若成立,则停止计算;否则,取步长为 $\left(\frac{h}{2}, \frac{k}{2}\right)$, 即

$$\begin{cases} x_0 = x_0 + \frac{h}{2}; \\ y_0 = y_0 + \frac{k}{2}, \end{cases}$$

代入式(3)重新计算,至到满足式(6)的精度门限要求,并将最后一次 (x_0, y_0) 作为节点 p 的位置坐标。

3 性能仿真

为了验证改进算法的性能,利用 VC6.0 和 Matlab6.5 软件对 DV-Hop 算法和改进算法进行了对比仿真研究,仿真的实现流程如图 3 所示。

3.1 仿真环境与参数选择

为了客观模拟出改进算法的性能,并便于与传统 DV-Hop 算法进行比较,在仿真实现时,对仿真环境作如下设定:

1) 各次仿真时的网络区域、节点总数、信标节点数、节点通信半径等网络环境参数相同。

2) 仿真的网络区域为 $[0, 100] \times [0, 100]$ m, 在网络区域中随机生成所有节点,随机选取信标节点,节点通信半径 $R=22$ m。

3) 统计的归一化定位误差、定位误差均方差作为算法精度^[1]和稳定性^[9]的衡量指标;统计的节点平均迭代修正次数作为计算代价的衡量指标。统计值基于 1 500 次的仿真结果。

4) 为了验证迭代门限值 $\eta_{\text{threshold}}$ 对改进算法各参数指标性能的影响,实验中选取了多组迭代门限值进行实验,并由此得到较为合理的迭代门限值。由于某些定位节点的迭代求精过程无法很快收敛于规

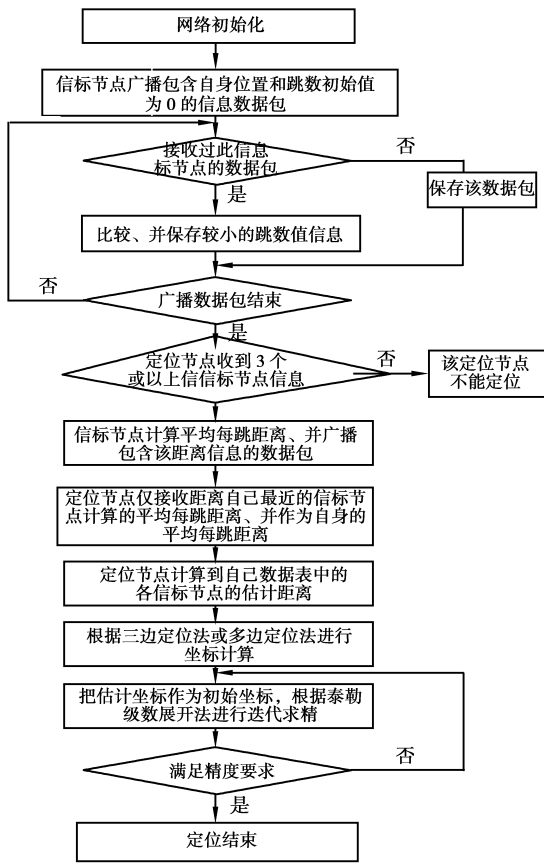


图 3 改进算法实现流程图

定的门限,规定迭代次数的上限为 20 次。

另外,设在 k 次仿真中,每次仿真能完成定位的定位节点数为 m ,第 i 个定位节点的真实坐标为 L_i ,估计坐标为 \hat{L}_i ,且估计坐标的迭代修正次数为 μ_i 次(传统 DV-Hop 算法中通过三边定位法或多边定位法求解坐标时,不需要对估计坐标进行迭代修正,故 μ_i 为 0 次),定义

1)一次仿真时,第 i 个定位节点的定位误差为

$$\text{error}_i = |L_i - \hat{L}_i|。$$

2)一次仿真时,整个网络区域的平均定位误差为

$$\text{error}_{\text{network}} = \frac{\sum_{i=1}^m |L_i - \hat{L}_i|}{m}。$$

3)一次仿真时,整个网络区域定位误差的均方差为

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\text{error}_i - \text{error}_{\text{network}})^2}{m}}。$$

4)基于 k 次仿真结果统计的归一化平均定位误差为

$$\text{loca_precision} = \frac{\sum_{j=1}^k \text{error}_{\text{network}}}{(kR)}。$$

5)基于 k 次仿真结果统计的归一化平均定位误差的均方差为

$$\text{loca_}\delta = \frac{\sum_{j=1}^k \delta}{(kR)}。$$

6)基于 k 次仿真结果统计的节点平均迭代修正次数为

$$\text{loca_}\mu = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m \mu_i}{(km)}。$$

3.2 结果与分析

图 4 是在网络区域内随机分布 10 个信标节点,节点总数分别为 100、150、200,验证各迭代门限值 5、4、3、2、1、0.5、0.1、0.01、0.001、0.000 1 对改进算法性能的影响。从图 4(a)、(b)可以看出,3 种节点总数下的定位误差和定位误差均方差均在迭代门限值区间 $[0.5, 1]$ 附近开始趋于平稳。从图 4(c)可以看出,3 种节点总数下的节点平均迭代修正次数相差明显,曲线几乎重合。当迭代门限值小于 0.5 时,随着门限值的减小,节点的平均迭代修正次数增加明显。因此,综合考虑图 4(a)、(b)、(c),可确定本文改进算法比较合理的迭代门限值选择范围为 $[0.5, 1]$ 区间。为便于改进算法性能指标的对比仿真分析,在仿真试验中选取迭代门限值为 1。

图 5 是在网络区域内随机分布 100 个节点,在节点总数保持不变,迭代门限值为 1,信标节点的取值分别为 5、8、10、15、20、25、30、35、40 时,DV-Hop 算法和改进算法的性能比较。从图 5(a)、(b)可以看出,在节点总数不变的情况下,2 种定位算法的定位误差、定位误差均方差都随信标节点数的增加而减小,并逐渐趋于平稳。改进算法的定位误差比传统的 DV-Hop 算法平均减小 20—23%,定位精度提高明显;定位误差均方差对应平均减小 10—14%,算法的定位稳定性更好。表 1 是改进算法在该网络环境下的定位节点平均迭代修正次数的统计值,迭代次数不超过 5 次,增加的计算量不大。

表 1 节点平均迭代修正次数

信标节点数	次								
	5	8	10	15	20	25	30	35	40
改进算法	4.487	4.406	4.376	4.353	4.330	4.315	4.299	4.292	4.286

图 6 是在网络区域内随机选取 10 个信标节点,

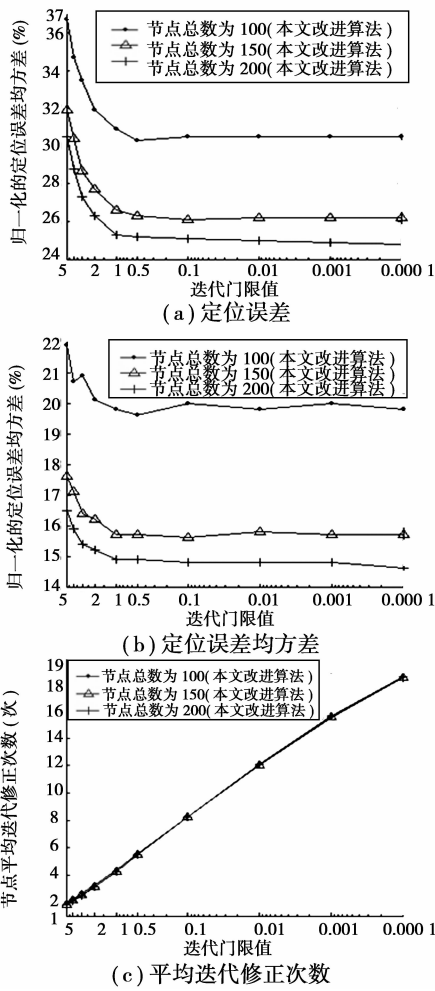


图 4 定位性能与迭代门限值的关系

迭代门限值为 1, 节点数的取值分别为 80、100、150、200、250、300、350、400 时, DV-Hop 算法和改进算法的性能比较。从图 6(a)、(b)可以看出, 在信标节点数不变的情况下, 2 种定位算法的定位误差、定位误差均方差都随节点总数的增加而减小, 并逐渐趋于平稳。改进算法的定位误差比传统的 DV-Hop 算法平均减小 16%~20%, 定位精度明显提高; 定位误差均方差对应平均减小 9~11%, 算法的定位稳定性更好。表 2 是改进算法在该网络环境下的定位节点平均迭代修正次数的统计值, 迭代次数不超过 5 次, 增加的计算量不大。

表 2 节点平均迭代修正次数

节点总数 算法名称	80	100	150	200	250	300	350
改进算法	4.575	4.376	4.286	4.274	4.277	4.283	4.305

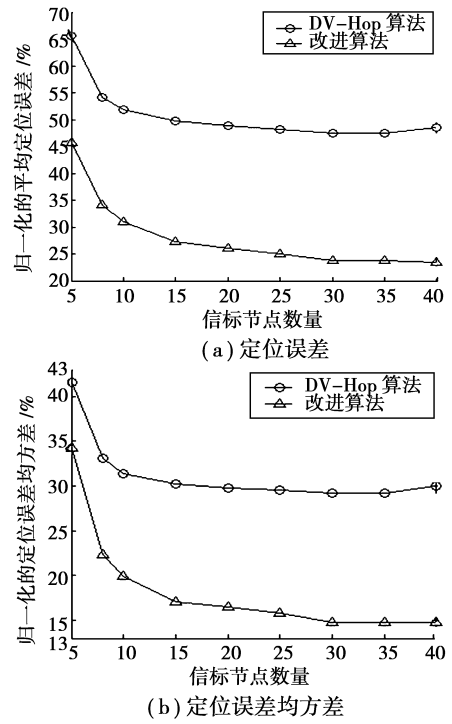


图 5 定位性能与信标节点数的关系

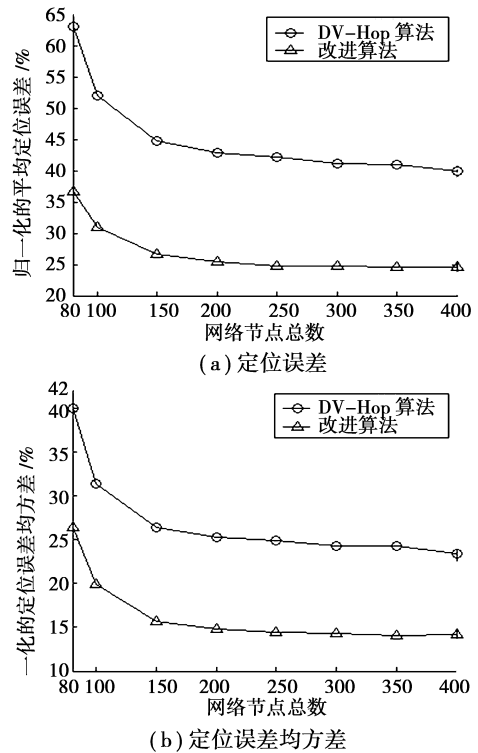


图 6 定位性能与节点总数的关系

4 结 语

针对 DV-Hop 定位算法在节点随机分布的网

络拓扑环境下存在较大误差的问题,在重点分析多边定位法计算定位节点坐标估计值的基础上,引入泰勒级数展开,构造了基于 DV-Hop 算法的定位节点数值迭代算法,讨论并验证了迭代门限值对改进算法计算量和收敛速度的影响。改进算法与传统 DV-Hop 算法相比,在定位节点计算量不明显增加和无须额外增加传感器节点硬件开销的条件下,可明显提高节点定位的精度,改善算法的稳定性。改进算法适用于节点随机分布和网络拓扑动态变化的无线传感器网络中的节点自主定位。

参考文献:

- [1] 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,2003,16(5):857-868.
WANG FU-BAO, SHI LONG, REN FENG-YUAN. Self-Localization systems and algorithms for wireless sensor network[J]. Journal of Software, 2003,16(5): 857-868.
- [2] 李晓维,徐勇军,任丰原. 无线传感器网络技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007: 191-221.
- [3] NICOLESCU D, NATH B. Ad-Hoc positioning systems (APS) [C]// Proc. of the 2001 IEEE Global Telecommunications Conf. San Antonio: IEEE Communications Society, 2001. 2926-2931.
- [4] NICULESCU D, NATH B. DV based positioning in ad hoc networks [J]. Journal of Telecommunication Systems, 2003, 22(1/4):267-280.
- [5] 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.
- [6] DOHERTY L, PISTER K S J, GHAOUI L E. Convex position estimation in wireless sensor networks[C]// Proc. of the IEEE INFOCOM 2001. Anchorage: IEEE Computer and Communications Societies, 2001: 1655-1663.
- [7] SHANG Y, RUMMLER W, ZHANG Y, et al. Localization from mere connectivity[C]// Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. Annapolis: ACM Press, 2003: 201-212.
- [8] 彭刚,曹大元,孙利民. 无线传感器网络节点定位机制的研究[J]. 计算机工程与应用,2004,40(35): 27-29,83.
PENG GANG, CAO DA-YUAN, SUN LI-MING. Study of localization schemes for wireless sensor networks[J]. Computer Engineering and Applications, 2004,40(35):27-29,83.
- [9] 刘克中,王殊,胡富平,许昌春. 无线传感器网络中一种改进 DV-Hop 节点定位算法[J]. 信息与控制. 2006, 35(6):787-792.
LIU KE-ZHONG, WANG SHU, HU FU-PING. An improved DV-Hop localization algorithm for wireless sensor networks [J]. Information and Control 2006, 35(6):787-792.
- [10] 石琴琴,霍宏,方涛,等. 使用最速下降算法提高极大似然估计算法的节点定位精度[J]. 计算机应用研究, 2008,25(7):2038-2040.
SHI Q Q, HUO H, FANG T, et al. Using steepest descent method to improve node localization accuracy of maximum likelihood estimation [J]. Application Research of Computers, 2008,25(7):2038-2040.
- [11] 万江文,于宁. 传感器网络中新入节点的定位[J]. 传感技术学报,2007,20(10):2319-2323.
WAN JIANG-WEN, YU NING. Localization algorithm for new comer in wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(10):2319-2323.
- [12] LANGENDOEN K, REIJERS N. Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison[J]. Computer Networks, 2003, 43(4): 499-518.
- [13] 刘峰,张翰,杨骥. 一种基于加权处理的无线传感器网络平均跳距离估计算法[J]. 电子与信息学报,2008, 30(5): 1222-1225.
LIU FENG, ZHANG HAN, YANG JI. An average one-hop distance estimation algorithm based on weighted disposal in wireless sensor network [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008,30(5): 1222-1225.
- [14] 嵇玮玮,刘中. DV-Hop 定位算法在随机传感器网络中的应用研究[J]. 电子与信息学报,2008,30(4): 970-974.
JI WEI-WEI, LIU ZHONG. Study on the application of DV-Hop localization algorithms to random sensor networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008,30(4):970-974.
- [15] 邱萌,徐惠民. 一种无线传感器网络无测距依赖定位算法[J]. 仪器仪表学报,2007,28(4A):544-547.
QIU MENG, XU HUI-MIN. Range-free localization algorithm for wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2007, 28(4A): 544-547.

(编辑 侯湘)