

无线传感器网络节点定位算法的研究综述

熊小华, 何通能, 徐中胜, 王梨华, 王晓枫
(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘 要: 作为一种全新的信息获取和处理技术, 无线传感器网络 (WSN) 可以在广泛的应用领域内实现复杂的大规模监测和追踪任务, 而节点定位是大多数无线传感器网络应用的基础。介绍了无线传感器网络节点定位的概念和原理、节点定位计算的一般过程, 讨论了现有的传感器网络节点定位算法的分类方法, 着重综述了近年来该领域具有代表性的算法的原理和特点, 简要介绍了节点定位算法的最新发展。在对现有算法进行了分析比较的基础上, 通过归纳和总结, 提出了基于移动锚节点的定位算法将成为以后研究热点的看法。

关键词: 无线传感器网络; 节点定位; 定位算法; 微机电系统

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2009)02-0013-05

Review on localization algorithms for wireless sensor networks

XIONG Xiao-hua HE Tong-neng XU Zhong-sheng WANG Shuo-hua WANG Xiao-feng
(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014 China)

Abstract Wireless sensor networks (WSN), a novel technology about acquiring and processing information, had been proposed for a multitude of diverse applications, which can fulfill complicated and large scale monitoring and tracking tasks. In wireless sensor networks, node localization is extremely crucial for most of the applications. Firstly, the concepts and principles of the node localization of wireless sensor networks were introduced. Secondly, the general process of localization computing was mentioned. At the same time, the taxonomy for wireless sensor networks node localization algorithms was described. Besides, the principles and characteristics of typical algorithms in the area were discussed and presented, the new development was also mentioned briefly. Based on the analysis and comparison of popular algorithms, through the induction and summarization, the prediction was put forward: localization algorithms on the base of mobile anchor will be a research hotspot.

Key words wireless sensor networks (WSN); node localization; localization algorithms; microelectromechanical system (MEMS)

0 引 言

随着微机电系统 (MEMS)、无线通信和数字电子技术的发展, 无线传感器网络 (WSN) 在军事应用、目标追踪、环境监测、医疗保健、空间探索等领域都得到广泛的应用^[1-2]。节点位置信息是无线传感器网络应用的基础, 节点定位^[3]技术在无线传感器网络中具有重要的地位。

GPS^[4]是目前应用最广的定位服务, 但受到成本、功耗、扩展性等问题的限制, 甚至在某些场合可能根本无法实现。目前, 主要解决方法是利用少量已知节点, 通过节点定位算法, 以获得节点的信息。因此, 要采用一定的定位机制与算法来实现 WSN 的节点定位。从 1992 年 AT&T 实验室开发出室内定位系统 Active Badge^[5-6]至今,

研究者已经提出了许多算法来解决节点自身定位问题: 典型的定位算法有 Centroid 算法^[7]、DV-Hop 算法^[8]、凸规划算法^[9]、APIT 算法^[10]等。但是, 每一种算法都是用来解决不同的问题或支持不同的应用。

无线传感器网络中现有的大多数定位方法都包含两个基本步骤: ①节点间的距离 (或角度) 测量; ②定位计算。本研究将分别从这两方面阐述节点定位的基本原理, 分析典型的定位算法, 并介绍该领域当前的发展动态。

1 无线传感器网络中的测距技术

在无线传感器网络中, 常用的测量节点间距离或角度的技术有 RSSI、TDOA、AOA 及 TOA。

RSSI (received signal strength indicator)。已知发

收稿日期: 2008-09-01

作者简介: 熊小华 (1979-), 女, 湖北枝江人, 主要从事无线传感器网络方面的研究。E-mail: lbxh168@sina.com

通信联系人: 何通能, 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: htn@zjut.edu.cn

射功率,在接收节点测量接收功率,计算传播损耗,使用理论或经验的信号传播模型将传播损耗转化为距离,该技术主要使用 RF 信号。该方法功耗低、价廉。但由于环境的影响,其建模比较麻烦。通常有可能产生 $\pm 50\%$ 的测距误差。

TDOA (time difference on arrival)。在节点上安装超声波收发器和 RF 收发器。测距时,在发射端两种收发器同时发射信号,利用声波与电磁波在空气中传播速度的差异,把时间转化为距离。该技术的测距精度比 RSSI 高,但也会受非视距 (NLOS) 问题对超声波信号的传播影响。

AOA (angle of arrival)。以两个或更多基站发射信号的到达角度来估计节点的位置。该测量技术将距离的测量转化为角度的测量。AOA 技术也受外界环境影响,而且需要额外硬件,可能无法满足传感器对硬件尺寸和功耗的要求。

TOA (time of arrival)。通过测量信号传播时间来测量距离,需要节点间时间同步。因 WSN 节点的硬件尺寸、价格和功耗限制,其实际场合使用的较少。

2 节点定位计算方法

笔者将 WSN 中需要定位的节点称为未知节点;已知位置并协助未知节点定位的节点称为锚节点 (anchor);在一个节点通信半径内,可直接通信的节点称为邻居节点。

在未知节点获得自身到 3 个或 3 个以上锚节点的距离 (或角度) 后可以采用三角测量法、三边测量法、极大似然估计法或最小最大法计算自身的位置。

2.1 三角测量法

三角测量定位方法也称为信号到达角度 (AOA) 定位法或方位测量定位法^[11],如图 1 所示。

假设未知节点 A (坐标为 (x_0, y_0)), 分别测得锚节点 B、C (坐标分别为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2)) 发出信号的到达角度分别为 θ_1 和 θ_2 则:

$$\tan(\theta_i) = \frac{x_0 - x_i}{y_0 - y_i} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

通过求解上述非线性方程,可以得到未知节点的位置 (x_0, y_0) 。

2.2 三边测量法

在无线传感器网络中,坐标系大多是二维空间,因此,只要知道一个未知节点到 3 个或 3 个以上锚节点的距离就可以确定该未知节点的坐标。在基于测距的定位算法中,三边测量法是计算坐标的基本途径。如图 2

所示,三边测量定位法的基本原理就是求 3 个已知半径和坐标圆心的圆的交点。

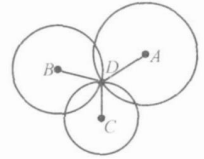
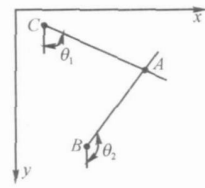


图 1 三角测量法定位示意图 图 2 三边测量法定位示意图

假设已知 3 个锚节点 A、B、C 的坐标,未知节点 D 的距离分别为 d_1, d_2, d_3 , 根据二维空间距离计算公式,联立解方程组就可得到未知节点 D 的坐标。

三边测量法的缺点是:若在测距过程中存在误差,上述 3 个圆无法交于一点,以存在误差的 d_1, d_2, d_3 去解方程时便无法得到正确解。因此,在实际计算坐标时,一般不采用上述解方程的方法,而采用极大似然估计或其他方法。

2.3 极大似然估计法

极大似然估计法的原理如图 3 所示。已知 1、2、3 等 n 个锚节点的坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)$, 它们到未知节点 D 的距离分别为 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$, 假设 D 的坐标为 (x, y) , 则:

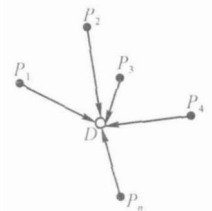


图 3 极大似然估计法定位示意图

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

从第 1 个方程开始分别减去最后一个方程,求得:

$$\begin{cases} x_1^2 - x_n^2 - 2(x_1 - x_n)x + y_1^2 - y_n^2 - 2(y_1 - y_n)y = d_1^2 - d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 - 2(x_{n-1} - x_n)x + y_{n-1}^2 - y_n^2 - 2(y_{n-1} - y_n)y = d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 用线性方程组表示为: $AX = b$, 其中:

$$A = 2 \times \begin{bmatrix} (x_1 - x_n) & (y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ (x_{n-1} - x_n) & (y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix};$$

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

由于存在测距误差, 合理的线性模型应该是 $AX + N = b$, 其中, N 为 $n - 1$ 维随机误差向量。可以求解未知节点的极大似然估计及非线性最小二乘估计节点 D 的位置: $\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T b$ 。

此方法的缺点在于需要进行较多的浮点运算, 其计算开销带来的能量消耗仍不容忽视。

2.4 最小最大法

最小最大法的基本思想是依据未知节点到各参考节点的距离测量值及其坐标构造若干个限制框, 即以参考节点为圆心, 未知节点到该参考节点的距离测量值为半径所构成圆的外接正方形, 取这些正方形交叉区域, 认为该交叉区域的几何中心为未知节点的估计坐标。

参考节点 $A(x_a, y_a)$ 限制框 4 个顶点的计算如下:

$$[x_a - d_a, y_a - d_a] \times [x_a + d_a, y_a + d_a] \quad (4)$$

其中, d_a 为未知节点 M 到参考节点 A 的测量距离。这些限制框的交集为:

$$[\max(x_i - d_i), \max(y_i - d_i)] \times [\max(x_i + d_i), \max(y_i + d_i)] \quad (5)$$

未知节点坐标最终估计值取交集的几何中心, Min-Max 法在不需要进行大量计算的情况下能得到较好的结果。

3 无线传感器节点定位算法的分类

从测量技术、定位形式、定位效果、实现成本等方面考虑, 节点定位算法可以用以下几种方法进行分类。

3.1 基于测距技术的定位和无需测距技术的定位

根据定位过程中是否测量实际节点间的距离, 定位算法可分为: 基于测距技术的定位和无需测距技术的定位两类。

Range-Based 定位机制需要测量相邻节点间的绝对距离或者方位, 并利用节点间的实际距离来计算未知节点的位置。Range-Based 定位机制使用各种算法来减小测距误差对定位的影响, 包括多次测量、循环定位求精等, 但是不可避免的会产生大量计算和通信开销, 所以它并不适用于要求低功耗、低成本的应用领域。

Range-Free 定位技术无需测量节点间的绝对距离或方位, 而是利用节点间的估计距离计算节点位置。DV-Hop 凸规划和 MDS-MAP 等都是典型的 Range-Free 定位算法。因功耗和成本等因素, 再加上粗精度, 定位能够满足大多数应用。

3.2 绝对定位与相对定位

绝对定位的定位结果是一个标准的坐标位置, 如

经纬度。而相对定位通常是以网络中部分节点为参考, 建立整个网络的相对坐标系^[12]。绝对定位可为网络提供唯一的命名空间, 受节点移动性影响较小, 有更广泛的应用领域。但研究发现, 在相对定位的基础上也能够实现部分路由协议, 尤其是基于地理位置的路由, 而且相对定位不需要锚节点。大多数定位系统和算法都可以实现绝对定位服务, 典型的相对定位算法和系统有 SPA, LPS^[13], SpOON^[14], 而 MDS-MAP 定位算法^[15]可以根据网络配置的不同分别实现两种定位。

3.3 精粒度与粗粒度

依据定位技术所需信息的粒度, 可将定位算法和系统分为: 精粒度定位方法与粗粒度定位方法两类。

精粒度的定位技术大部分是 Range-Based, 根据依赖锚节点所推断出的距离或是相关角度, 该定位方法可以进一步细分为基于距离和基于方向两种。

粗粒度定位技术一般是 Range-Free 定位技术, 其原理是利用某种物理现象来感应是否有目标接近一个已知的位置。

3.4 基于锚节点与无锚节点

根据定位过程中是否使用锚节点, 可以把定位算法分为: 基于锚节点的定位算法和无锚节点的定位算法^[16,17]。前者在定位过程中, 以锚节点作为定位中的参考点, 各节点定位后产生整体绝对坐标系; 后者只关心节点间的相对位置, 在定位过程中无需锚节点。

3.5 集中式算法与分布式算法

集中式计算的优点在于从全局角度统筹规划, 计算量和存储量几乎没有限制, 可以获得相对精确的位置估算; 它的缺点则是因为通信开销大而过早地消耗完电能, 无法实时定位等。集中式定位算法包括凸规划、MDS-MAP 等。

分布式算法的优点是通过使用锚节点, 可以实现分布式计算, 便于系统扩展, 缺点是需要大量的锚节点支持。

3.6 紧密耦合与松散耦合

紧密耦合定位系统。包括 AT&T 的 Active Bat 系统和 Active Badge, H-Ball Tracker^[18,19] 等。它们的特点是适用于室内环境, 具有较高的精确性和实时性。时间同步和锚节点间的协调问题容易解决, 但其限制了系统的可扩展性, 无法应用于室外环境。

松散耦合型定位系统。包括 Cricket, AHLos 等, 它们以牺牲紧密耦合系统的精确性为代价而获得部署的灵活性, 依赖节点间的协调和信息交换以实现定位。在松散耦合型系统中, 因为网络以 ad hoc 方式部署, 节点间没有直接的协调, 所以节点会竞争信道并相互干扰。

4 典型的定位算法

到目前为止, WSN 节点定位系统和算法的研究大致经过了 2 个阶段。第 1 阶段主要偏重于紧密耦合型和基于基础设施的定位系统^[20-21]; 对于松散耦合型和无需基础设施的定位技术的关注和研究目前已经成为 WSN 领域的热点。

4.1 Bounding Box 定位算法

与以通讯半径为 R 的圆作为通讯模型不同, Bounding Box 定位算法^[22]定义了一个特殊的通信模型, 其假定节点通信范围是以自己为中心, 二倍通信半径为边长的正方形, 被称为离散通信模型。

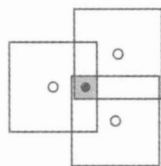


图 4 Bounding Box 定位算法原理示意图

如果一个节点能够与 N 个锚节点通信, 则该节点在这 N 个锚节点的正方形通信区域的交叠矩形区域中, 如图 4 中阴影部分所示。该区域为 (节点以该区域中心作为自己的估测位置):

$$[\max(x_i - R), \max(y_i - R)] \times$$

$$[\min(x_i + R), \min(y_i + R)] \quad (i = 1 \dots N) \quad (6)$$

由于该算法是分布式的, 所以也是可扩展的, 每个节点的计算复杂度与网络的规模无关。算法的主要缺点是需要较高的锚节点密度, 否则定位精度和覆盖度将会很低。该算法适合于节点的计算能力非常有限的情况。

4.2 凸规划算法

加州大学伯克利分校的 Doherty 等将节点间点到点的通信连接视为节点位置的几何约束, 把整个网络模型化为一个凸集, 从而将节点定位问题转化为凸约束优化问题, 然后使用线性矩阵不等式、半判定规划或线性规划方法得到一个全局优化的解决方案, 以确定节点位置。同时也给出了一种计算未知节点有可能存在的矩形空间的方法。如图 5 所示, 根据未知节点与锚节点之间的通信连接和节点无线通信射程, 可以估算出未知节点可能存在的区域 (图中阴影部分), 并得到相应矩形区域, 然后以矩形的质心作为未知节点的位置。

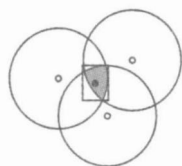


图 5 凸规划算法原理示意图

在图 5 中, 阴影部分代表未知节点可能存在的区域, 矩形是以阴影部分的各个顶点为边界所构成。

凸规划是一种集中式定位算法, 定位误差约等于节点的无线射程 (信标节点比例为 10%)。为了高效

工作, 锚节点需要被部署在网络的边缘, 否则外围节点的位置估算会向网络中心偏移。作为对凸规划算法的改进, 文献 [23] 中提出了将节点间没有通信连接同样视为节点位置约束的思想来提高定位精度。

4.3 DV-Hop 算法

DV-Hop 算法其基本思想是将未知节点到锚节点之间的距离用网络平均每跳距离和两者之间的跳数乘积来标识, 再使用三角定位来获得节点的位置信息。

DV-Hop 算法的定位过程分为 3 个阶段:

(1) 计算未知节点与每个锚节点的最小跳数。首先使用典型的距离矢量交换协议, 使网络中所有节点获得距锚节点的跳数。

(2) 计算未知节点与锚节点的平均每跳距离。在第 2 阶段, 每个锚节点根据第 1 阶段获得的其他锚节点位置和相隔跳数之后, 锚节点计算网络平均每跳距离, 然后将网络平均每跳距离作为一个校正值广播至网络中。

平均每跳距离采用可控洪泛法在网络中传播, 这意味着一个节点仅记录接收到的第 1 个平均每跳距离, 而丢弃所有后来者, 这个策略确保了绝大多数节点可从最近的锚节点接收平均每跳距离值。在大型网络中, 可通过为数据包设置一个生存周期 (TTL 域) 来减少通信量。未知节点接收到平均每跳距离之后, 根据记录的跳数计算到每个锚节点的距离。

(3) 利用三边测量法计算自身位置。在未知节点获得与 3 个或 3 个以上锚节点的距离后, 执行三边测量定位。

如图 6 所示, 已知锚节点 L_1 与 L_2, L_3 之间的距离和跳数, 计算得到校正值 (即平均每跳距离): $(40 + 75) / (2 + 5) = 16.42$ 。假如 A

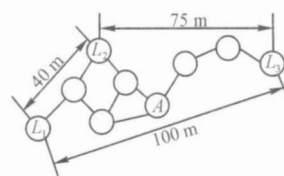


图 6 DV-Hop 定位算法示意图

从 L_2 获得校正值, 则它与 3 个锚节点之间的距离分别为 $L_1: 3 \times 16.42$; $L_2: 2 \times 16.42$; $L_3: 3 \times 16.42$ 然后使用三边测量法确定节点 A 的位置。

该算法只需要较少的锚节点, 计算和通讯开销适中, 不需要节点具备测距能力, 是一个可扩展的算法, 但是该算法对锚节点的密度要求较高, 对于各向同性的密集网络, 才可以得到合理的平均每跳距离, 从而能够达到适当的定位精度。但对于网络拓扑不规则的网络, 定位精度迅速下降, 不适合采用 DV-Hop 算法。此算法在网络平均连通度为 10, 信标节点比例为 10% 的各向同性网络中平均定位精度大约为 33%。

4.4 MDS-MAP定位算法

MDS-MAP算法采用集中式计算,可在测距和非测距两种情况下运行,并可根据锚节点数量实现相对和绝对定位。MDS-MAP算法由 3 个步骤组成:

(1) 首先从全局角度生成网络拓扑连通图,并为图中每条边赋予距离值。当节点具有测距能力时,该值就是测距结果。当仅拥有连通性信息时,所有边赋值为 1。然后使用最短路径算法,如 Dijkstra 或 Floyd 算法,生成节点间距矩阵。

(2) 对节点间距矩阵应用标准 MDS 技术,生成整个网络的 2 维或 3 维相对坐标系统。

(3) 当拥有足够的锚节点时,通过线性变换把相对坐标系统转化为绝对坐标系统。

实验显示,在拥有 200 个节点(其中 4 个锚节点),平均连通度为 12.1 的网络中,在 Range-Free 条件下,定位误差约为 30%;而在 Range-Based 条件下,当测距误差为 5% 时,定位误差为 16%。当网络连通度达到 12.2 时,几乎全部节点都可实现定位。

MDS-MAP 算法是比较典型的不基于锚节点的定位算法,但需集中式计算,同时会出现部分节点在计算中能量耗尽而失效。另外,MDS-MAP 算法在不规则的网络拓扑中,定位精度下降的很快。

5 结束语

根据以上论述可知,每种算法都有各自的特点和使用范围,没有哪一种绝对是绝对最优的。

近 10 年来,WSN 节点定位问题的研究取得了丰富的成果,最近几年,很多人提出移动锚节点的定位算法,利用移动锚节点辅助定位未知节点,可用在未能部署锚节点的区域,一方面减少了硬件成本,同时,与现有的经典算法结合,在低噪声环境下定位精度较高,同时计算耗能少,可以广泛应用于 WSN 中的节点定位,这也将会成为日后节点定位的研究热点。

参考文献 (References):

- [1] STEERE D C, BAPTISTA A. Research challenges in environmental observation and forecasting systems[C] // Proc. of the 6th ACM/IEEE MOBI-COM, Boston, MA, USA: ACM Press, 2000: 292–299.
- [2] PETRIU E M, GEOGANAS N D, PETRIU D C, et al. Sensor-based information appliances[J]. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 2000, 26(10): 31–35.
- [3] 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.
- [4] CAPKUN S, HAMDIM, HUBAUX J P. GPS-free positioning in mobile ad hoc networks[J]. *Cluster Computing*, 2002, 5(2): 157–167.
- [5] WANT R, HOPPER A, FALCAO V, et al. The active badge location system[J]. *ACM Transaction on Information Systems*, 1992, 10(1): 91–102.
- [6] HARTER A, HOPPER A. A distributed location system for the active office[J]. *IEEE Network*, 1994, 8(1): 62–70.
- [7] BULUSU N, HEIDEMANN J, ESTRIN D. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices[J]. *IEEE Personal Communications*, 2000, 7(5): 28–34.
- [8] NICULESCU D, NATH B. DV-based positioning in ad hoc networks[J]. *Telecommunication Systems*, 2003, 22(1–4): 267–280.
- [9] DOHERTY L, PISTER K S J, GHAOUIL. Convex position estimation in wireless sensor networks[C] // Proc. of IEEE INFOCOM, Piscataway, USA: IEEE, 2001: 1655–1663.
- [10] HE T, HUANG C D, BLUM B M. Range-free localization schemes in large scale sensor networks[C] // Proc. of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobCom), San Diego, California, USA: ACM Press, 2003: 81–95.
- [11] NICULESCU D, NATH B. Ad hoc positioning system (APS) using AOA[C] // Proc. of IEEE INFOCOM, Piscataway, USA: IEEE, 2003: 1734–1743.
- [12] HIGHTOWER J, BORIELLO G. Location systems for ubiquitous computing[J]. *Computer*, 2001, 34(8): 57–66.
- [13] NICULESCU D, NATH B. Localized positioning in ad hoc networks[C] // Proc. of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications Anchorage, IEEE Communications Societies, 2003: 42–50.
- [14] HIGHTOWER J, BORIELLO G, WANT R. SpoON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength[R]. Seattle, WA, USA: University of Washington, 2002: 452–463.
- [15] SHANG Y, RUMLOW, ZHANG Y, et al. Localization from mere connectivity[C] // Proc. of the 4th ACM International Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing, Annapolis, ACM Press, 2003: 201–212.
- [16] PRIYANTHA N B, BALAKRISHNAN H, DEMANE E, et al. Anchor-free distributed localization in sensor networks[R]. MIT Laboratory for Computer Science Tech Report# 892, April 2003.
- [17] CUI Xun-xue, SHAN Zhiguan, LIU Jian-jun. Distributed localization for anchor-free sensor networks[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 19(3): 405–418.
- [18] BULUSU N. SelfConfiguring Localization Systems[D]. Los Angeles: University of California, 2002.
- [19] WELCH G, BISHOP G, VICCILI, et al. The H-Ball tracker: high performance wide-area tracking for virtual and augmented environments[C] // Proc. of the ACM Symp. on Virtual Reality Software and Technology, London: ACM Press, 1999: 1–11.
- [20] BAHL P, PADMANABHAN V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system[C] // Proc. of IEEE INFOCOM, Piscataway, USA: IEEE, 2000: 775–784.
- [21] HARTER A, HOPPER A. A distributed location system for the active office[J]. *IEEE Network*, 1994, 8(1): 62–70.
- [22] SMITH S N, SASTRY S D. Distributed Localization in Wireless ad hoc Networks[R]. Technical Report UCB/ERL M02/26, UC Berkeley, 2002.
- [23] SUNDARAM N, RAMANATHAN P. Connectivity based location estimation scheme for wireless ad hoc networks[C] // Proc. of the 2002 IEEE Global Telecommunications Conference, Taipei: IEEE Communications Society, 2002: 143–147.

[编辑: 张翔]