

动态可靠信标节点无线传感器网络定位算法^①

张松涛¹, 田 钧¹, 宋树祥²

¹(佛山职业技术学院 电子信息系, 佛山 528137)

²(广西师范大学 电子工程学院, 桂林 541004)

摘 要: 在无线传感器网络中, 距离无关定位技术得到了人们广泛的关注. 在有洞的各向异性网络中, 为提高普通结点到信标节点之间距离估计的准确性, 提出一种距离无关的动态可靠信标节点定位算法. 该算法以不同信标节点对之间最短路径上平均单跳距离差异为基础, 得到普通结点的直接可靠参考信标节点集和间接可靠参考信标节点集. 然后, 从可靠参考信标节点集中选择参考结点对普通结点进行定位. 仿真结果表明, 与以前算法相比, 新算法能降低定位误差.

关键词: 无线传感器网络; 定位; 可靠信标节点

Dynamic Reliable Anchor-Based Location Discovery Algorithms in Wireless Sensor Networks

ZHANG Song-Tao¹, TIAN Jun¹, SONG Shu-Xiang²

¹(Department of Electronic and Information Engineering, Foshan Polytechnic, Foshan 528137, China)

²(College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: Range-free localization technology in wireless sensor networks is of great current interest for researchers. In order to improve the accuracy of range estimation between the sensors and anchors, we introduced a dynamic reliable anchor-based location discovery algorithm in anisotropic wireless sensor networks with holes, which was range-free. Based on the differences of average distances of one hop along the shortest path between different anchor pairs, sensor nodes managed to get two sets of direct reliable reference anchors and indirect reliable reference anchors. Then sensor nodes were localized by using the reliable reference anchors set. Simulation results show that the positioning error is decreased compared with previous algorithms.

Key words: wireless sensor networks; localization; reliable anchors

无线传感器网络、无线网络应用、智能移动设备的飞速发展加速了对基于位置服务的需求^[1]. 从目标跟踪、物流管理, 到应急救援、环境监测等, 结点收集或传输的信息严重依赖它们本身的位置^[2-4]. 而且, 各结点的位置信息有助于网络其它相关技术的实现或改善^[5, 6]. 所以, 决定或估算结点的位置成为无线传感器网络的一项基本任务. 对于很多大型无线传感器网络应用而言, 结点数量众多, 依靠人为地部署结点或由结点携带 GPS 设备, 无论从技术还是经济上看, 都是不可行的. 通常的作法是, 在一个传感器网络中部署一些知晓自身位置信息的信标结点, 然后借助信标结

点, 采取相应的结点定位技术对其它普通结点进行位置估算, 从而获得全网结点位置信息.

由于结点位置信息在无线传感器网络应用中的重要性, 结点定位技术得到人们广泛地关注与研究^[7, 8]. 在无线传感器网络定位技术中, 无需距离测量支撑的距离无关定位技术, 对软硬件要求低, 经济适用性强, 同时也面临挑战.

距离无关定位技术主要借助于结点连通信息或信标结点辅助来对普通结点进行定位估算^[9, 10]. 其中, 一个基本的方法是, 利用网络平均单跳距离和待求普通结点到参考信标结点最短路径的跳数估计普通结点到

① 基金项目: 国家自然科学基金(61361011)

收稿时间: 2015-04-10; 收到修改稿时间: 2015-06-08

信标结点的距离。然后结合信标结点坐标,运行三边测量定位算法,估算普通结点坐标。对于密集、均匀分布的各向同性网络而言,上述基于网络平均单跳距离和最短路径上的跳数方法,对结点之间的距离估计是比较准确的。但实际应用中的网络并不理想。比如,由于地形地貌的限制或结点本身耗尽,网络中形成孔洞而呈现出明显的各向异性特点。此时,普通结点到信标结点之间的最短路径可能由于要绕过孔洞,基于网络平均单跳距离和跳数的结点间距离估计会明显大于结点间的实际距离。

针对有孔洞的各向异性网络,为了提高普通结点到信标结点之间距离估计的准确性,本文提出一种距离无关的动态可靠信标结点无线传感器网络定位算法(Dynamic Reliable Anchor-based Location Discovery Algorithms, DAD)。该算法从不同信标结点对之间最短路径上平均单跳距离差异入手,普通结点选择最短路径上平均单跳距离比较大的信标结点对形成直接可靠参考信标结点集,并进一步引申出间接可靠参考信标结点集。这样,可以保证普通结点到参考信标结点之间距离估计的准确性,从而提高结点定位的准确性,并提高定位结点比例。

1 相关研究工作

根据是否使用距离(角度)测量技术,传统结点定位方法可以分为基于距离定位方法和距离无关定位方法。基于距离定位方法借助一些测量技术,如信号到达时间、到达时间差、到达角度、接收信号强度等,测量相关结点之间的距离或角度,从而进行结点定位;距离无关定位方法通常借助结点之间的连通信息及信标结点对普通结点进行定位。基于距离定位方法定位准确性相对较高,但需要相应硬件支持;距离无关定位方法定位准确性稍差,但经济适用性强,也得到了极广泛地关注。近年来,一批新颖的定位方法^[9,11,12]相继提出。

考虑到仅用连通性不能充分反映到不同邻居结点的远近关系,Ziguo Zhong^[9]等人提出 RSD 定位算法。由于无线路径衰落、多径影响等原因,接收信号强度不是一种理想的距离测量方法。从全网的观点看,接收信号强度与结点之间距离没有明显的对应关系;但从单个结点上,接收信号强度能够较好地反映邻居结点的远近关系。该作者正是从这一点出发,利用单

个结点接收邻居结点信号强度,对邻居结点进行排序,估算到不同邻居结点的相对距离,最后完成结点定位。

Bin Xiao^[11]等人通过分析不同路径上平均单跳距离的差异提出 RAL 定位算法。该算法先从理论上分析均匀分布网络中结点间基于不同网络连通度和不同路径跳数的单跳距离的最小值,并通过实验得到与理论分析比较近似的结果。然后以理论和实验结点间单跳距离最小值为基础,形成可靠的最小单跳距离离线表格。进入在线定位阶段,利用离线表格中的可靠最小跳数距离阈值区分可靠信标结点和不可靠信标结点,普通结点利用就近的可靠信标结点进行位置估算,从而有效降低定位误差。

Shang Y 以经典的网络平均单跳距离思路为基础,提出一种改进算法^[12](本文中我们称之为 N4 算法)。该算法将信标结点到待求普通结点的最短路径跳数大小进行排序,依次选择跳数较小的信标结点为参考结点。然后用到参考信标结点的跳数与网络平均单跳距离来估算参考结点到待求普通结点的距离,进而运行三边测量定位算法估算普通结点位置。该算法总体思路是在一个较小范围内选择参考信标结点,从而得到比较准确的距离估计。但这里也存在很多例外情况。比如,有些普通结点附近信标结点数量很少,不得不选用较远距离的信标结点;或者,所选信标结点到普通结点跳数比较小,但距离估计依然会受到较大干扰。

所以,普通结点到多跳以外信标结点的距离估计,成为距离无关定位方法中的关键。

2 DAD定位算法产生思路

在一般传感器网络中,由于通信冲突、能量限制等原因,各结点通信半径通常会远小于网络覆盖区域,最后形成多跳路由网络。普通结点的邻居结点中,信标结点数量很少或为零。在很多定位算法中,普通结点不得不估算到多跳以外的若干参考信标结点的距离。APS^[13]系统已总结了到多跳以外信标结点距离估算的两种方法。其一,先用基于距离向量交换思想得到普通结点到某信标结点之间最短路径的跳数,然后用信标结点估算网络平均单跳距离,用两者乘积作为该距离估计值。其二,用方法一的思路得到普通结点到某信标结点之间基于跳数的最短路径,然后用最短路径上各跳邻居结点间实际测量距离的累加作为普通结点到某参加信标结点的距离估计。

上述基于网络平均单跳距离或最短路径上各跳邻居结点间测量距离累加方法, 所得到的普通结点到信标的距离估算的准确性, 与网络形态有很大关系. 对于均匀分布的密集型网络, 两结点之间的最短路径通常比较接近于一条直线, 用上述方法估算普通结点到信标结点的距离准确性比较高. 然而, 当两结点之间的最短路径由于要绕过较大的障碍物或孔洞时, 最短路径会严重偏离直线, 用上述方法估算的普通结点到信标结点之间的距离会远大于结点之间的实际距离, 造成普通结点位置估计偏差很大.

我们用下面例子加以说明. 图 1 所示的网络, 存在一个较大的方形障碍物. A1 与 A2、A2 与 A3、A3 与 A4 之间的最短路径都大致接近一条直线. 用网络平均单跳距离分别乘以它们最短路径的跳数, 可以较好地估计 A1 与 A2、A2 与 A3、A3 与 A4 之间的距离. 可是, A1 到 A4 之间的距离估计情况就不一样. A1 到 A4 之间的最短路径, 由于要绕过方形障碍物, 不得不增加很多跳数并严重偏离直线, 造成用网络平均单跳距离与最短路径跳数乘积方法估计的 A1 到 A4 之间的距离会远远大于 A1 到 A4 之间的实际距离.

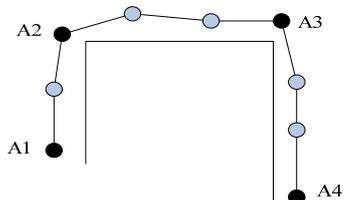


图 1 最短路径平均单跳距离与网络形态的关系

经过分析与观察, 我们发现, 对某实际网络而言, 两结点之间最短路径上的平均单跳距离越大, 该两结点之间的最短路径越接近一条直线. 那么, 对某普通结点而言, 如果一对信标结点(信标结点对)之间的最短路径上的平均单跳距离超过某一阈值, 并且该普通结点在其最短路径上, 普通结点到该信标结点的距离估计就比较准确, 从而可选定该信标结点为定位参考信标结点. 但是, 对很多普通结点来说, 按这种方法所获得的参考信标结点的数量不足, 需进一步采取其他措施获得更多的可靠参考信标结点.

3 DAD定位算法

该算法总体思路是, 先利用距离向量交换思想得到各信标结点对最短路径上的平均单跳距离. 然后,

对某普通结点而言, 如果一对信标结点基于跳数的最短路径通过该普通结点并且该最短路径上的平均单跳距离大于某一阈值, 我们将这一对信标结点加入到该普通结点的可靠参考信标结点集. 如果某普通结点的可靠参考信标结点集足够, 就以该可靠参考信标结点集为参考结点, 运行三边测量定位算法, 对普通结点进行定位估算; 如果某普通结点可靠参考信标结点集数量不足, 就进一步在该普通结点的邻居结点的可靠参考信标结点集中选取参考信标结点, 对该普通结点进行定位估算. 按上述思路对普通结点进行定位估算, 一方面可以保证参考信标结点到普通结点的距离估算准确, 从而普通结点位置估算精确性高; 另一方面, 可以使网络中绝大多数普通结点有足够的可靠参考信标结点进行位置估算, 从而提高定位结点的比例. 下面阐述算法的具体实现.

3.1 估算信标结点对之间的平均单跳距离矩阵

在一个连通网络中, 各信标结点可以采用距离向量交换的方法, 获得到其他各信标结点基于跳数的最短路径, 并记录路径上结点的先后次序及总跳数. 各信标结点利用自身位置信息及到其他各信标结点的最短路径跳数, 可以估算到不同信标结点最短路径上的平均单跳距离. 这样, 就可以形成不同信标结点对之间最短路径上的平均单跳距离矩阵.

我们还是用图 1 解释两结点之间最短路径的曲直性与该两结点之间最短路径上平均单跳距离之间的关系. 设 A1~A4 均为信标结点. A1 到 A4 的距离与 A2 到 A3 的距离差不多相等, 但 A2 与 A3 之间没有障碍物, 最短路径几乎是一条直线, 3 跳即可到达. 相反, A1 与 A4 之间由于有较大障碍物, 最短路径严重偏离直线, 跳数增加到 8 跳. 所以, 最后估计的 A2 到 A3 之间最短路径上的平均单跳距离会远大于 A1 到 A4 之间的平均单跳距离. 实际上, 容易发现, 这种规律是普遍存在的. 也就是说, 当两信标结点之间的最短路径接近一条直线时, 所估算的该最短路径上的平均单跳距离比较大; 当两信标结点之间的最短路径明显偏离直线时, 所估算的该最短路径上的平均单跳距离会小很多.

3.2 确定普通结点的直接可靠参考信标结点集

通过上面的分析, 我们知道, 如果某对信标结点基于跳数的最短路径上的平均单跳距离估算值比较大(比如, 大于网络所有信标结点对估算的网络平均单跳

距离均值), 那么该对信标结点之间的最短路径就越接近一条直线. 我们考虑图 2, A1、A2、A3、A4 为四个信标结点, S1、S2 为两个普通结点. A1 与 A3 利用自身位置估算 A1 到 A3 最短路径上的平均单跳距离大于网络平均单跳距离, 说明 A1 到 A3 上的最短路径接近一条直线. 普通结点 S1 在 A1 到 A3 的最短路径上, 所以 S1 到 A1、S1 到 A3 的最短路径都接近一条直线. 利用 A1 到 A3 最短路径上估算的平均单跳距离, 估算 S1 到 A1 与 A3 的距离就会比较准确. 同理, A2 到 A4 最短路径上的平均单跳距离估计值也比较大, 并且 S1 也在 A2 到 A4 的最短路径上. 那么 S1 到 A2 与 A4 的距离估计也比较准确. 所以, 信标结点 A1、A2、A3、A4 就加入到普通结点 S1 的可靠参考信标结点集. 同时, 我们把按这种方法得到的可靠参考信标结点集称为该结点的直接可靠参考信标结点集.

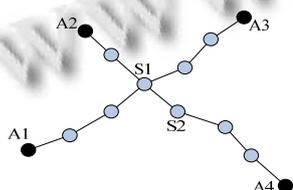


图 2 普通结点 S1 的可靠参考信标结点

所以, 某普通结点选取直接可靠参考信标结点集的思路是: 如果某信标结点对最短路径上的平均单跳距离大于某一阈值, 并且该最短路径经过上述普通结点, 那么该两信标结点就可以成功加入其直接可靠参考信标结点集.

3.3 确定普通结点的间接可靠参考信标结点集

对于有孔洞的网络, 很多普通结点的直接可靠参考信标结点集数量不足, 无法运行三边测量定位算法. 对于直接可靠参考信标结点集不够的普通结点, 我们考虑把该普通结点邻居结点的直接可靠参考信标结点集增加为其自身的可靠参考信标结点集, 并称其为该普通结点的间接可靠参考信标结点集. 如在图 2 中, 我们考虑普通结点 S2 的可靠参考信标结点集. 首先可以把 A2 和 A4 选定为普通结点 S2 的直接可靠参考信标结点集, A1 到 A3 的最短路径由于不经过 S2, A1 和 A3 就不能选定为 S2 的直接可靠参考信标结点集. 如果 S2 的可靠参考信标结点集数量不足, 由于 S1 是 S2 的邻居结点, A1 和 A3 又是 S1 的直接可靠参考信标结点集. 这时就可以增加 A1 和 A3 为 S2 的间接可靠参

考信标结点集. 下表是我们在多次实验中利用间接可靠参考信标结点集定位时, 可定位结点数量的增加情况. 实验环境与 4.1 节“仿真环境设置”相同.

表 1 间接可靠参考信标结点对可定位结点数量的增加情况

	依靠间接可靠参考信标结点集定位的结点数量相对于只用直接可靠参考信标结点集定位的结点数量的增幅(%)			
	500 sensors	600 sensors	700 sensors	800 sensors
5% anchors	148.7	143.8	126.2	118.8
10% anchors	71.2	67.4	61.7	43.1

3.4 普通结点定位估算

通过表 1, 我们看到, 对于有孔洞的各向异性网络, 在保证结点一定定位准确性的前提下, 间接可靠参考信标结点集较大幅度地增加了可定位结点的数量. 但是, 很多时候, 在采用上述直接和间接可靠参考信标结点集对结点进行定位时, 依然有少数结点由于参考结点数量不足而无法定位. 此时, 我们按照 Shang Y 提出的方法^[12], 按跳数距离由小到大选择若干信标结点对这部分普通结点进行定位.

在有孔洞的各向异性网络中, 基于不同信标结点对最短路径上的平均单跳距离差异较大的事实, 选择最短路径上平均单跳距离较大、该最短路径通过待定位普通结点的信标结点为直接可靠参考信标结点集. 进一步, 普通结点以邻居结点的直接可靠参考信标结点集扩充为自身的间接可靠参考信标结点集. 采用直接可靠参考信标结点集和间接可靠参考信标结点集相结合的方法, 对普通结点进行定位, 可以同时提高定位结点的比例和结点定位的准确性.

4 算法性能评估

为了验证算法有效性, 本文搭建实验平台, 实现了 DAD 定位算法, 进行了广泛的实验仿真, 从多方面验证了算法性能, 并与 N4 算法^[12]进行了对比分析.

4.1 仿真环境设置

我们采用的实验场景是一个边长为 100m 的正方形区域. 正方形区域中间有一个半径为 20m 左右的圆形孔洞. 传感器结点在正方形中不属于圆形孔洞的区域随机分布. 结点数量从 400 个逐渐变化到 800 个, 多次实验中结点通信半径保持为 10m 不变. 信标结点比例按 5% 和 10% 做两组实验. 按结点无线通信半径对定位误差归一化. 图 3 是我们多次实验中一个 600 个结

点的含洞无线传感器网络分布图, 红色实心结点为信标结点.

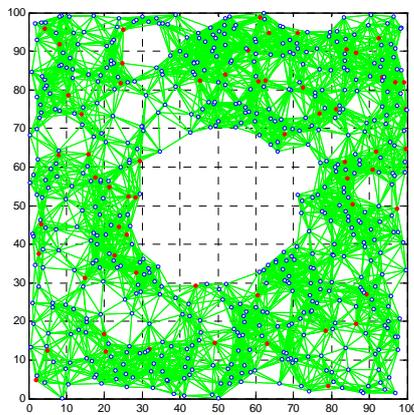


图 3 一个有孔洞无线传感器网络示例

4.2 实验结果分析

图 4 是 10%信标结点比例下定位误差随结点总数变化情况. 普通结点定位准确性随着网络结点总数的增加而提高. 当普通结点数量在 400 到 800 之间变化时, DAD 定位算法结点定位准确性都要优于 N4 算法, 定位误差减小 1-2 个百分点. N4 算法选择距离待求普通结点较近的信标结点作为定位参考结点, 并不能保证距离估计的准确性, 而且也会排除距离较远但距离估计较准确的信标结点作为定位参考结点; DAD 定位算法采用直接可靠参考信标结点和间接可靠参考信标结点思想, 提高了普通结点到参考信标结点距离估计的准确性, 也极大地扩充了普通结点的可靠参考信标结点集, 从而降低了普通结点定位误差, 提高了定位结点比例.

图 5 是 10%信标结点比例、结点总数分别为 800 和 500 时, 结点定位累积误差分布图. 以 800 结点时 DAD 定位算法为例, 定位误差为 30%时对应的定位结点比例约为 58%, 表示定位误差小于或等于 30%的结点占总结点的比例为 58%. 换言之, 在相同的较小定位误差范围内, 定位结点比例越多, 定位性能越好. 从图 5 可以看出, 总结点数为 800 时, DAD 算法定位误差小于 10%~30%的结点比例比 N4 算法要多 2~8 个百分点; 总结点数为 500 时, DAD 算法定位误差小于 10%~30%的结点比例比 N4 算法要多 2~4 个百分点. 所以, 图 5 从累积误差分布所反映的定位结果与图 4 从定位误差随结点总数变化情况所反映的定位结果都表明, DAD 定位算法平均定位误差小于 N4 算法, 定位

性能更好.

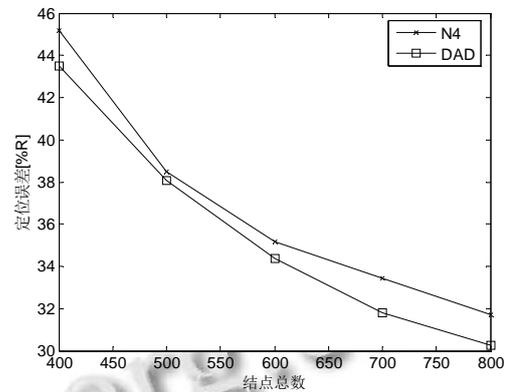


图 4 定位误差随结点总数变化情况(10%信标结点)

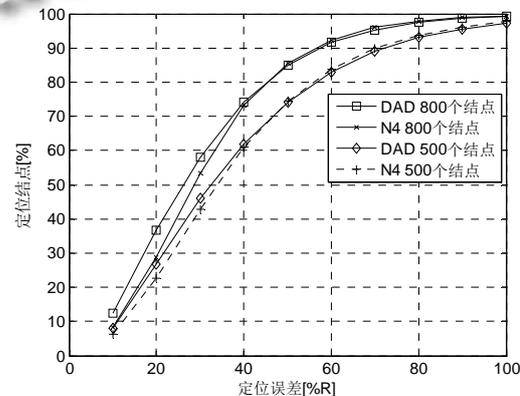


图 5 累积误差分布情况(10%信标结点)

与图 4 和图 5 类似, 图 6 和图 7 分别是 5%信标结点比例时定位误差随结点总数变化情况和累积误差分布情况图. 从图 6 可以看出, 当普通结点数量从 400 增加到 800 时, DAD 算法定位误差比 N4 算法要低 2-8 个百分点. 与图 4 相比, 在有洞的各向异性传感器网络中, 信标结点比例低时, DAD 定位算法更有优越性. 图 7 是总结点数分别为 800 和 500、5%信标结点比例时, 结点定位累积误差分布图. 总结点数为 800 时, DAD 算法定位误差小于 10%~60%的结点比例比 N4 算法多 1~5 个百分点; 总结点数为 500 时, DAD 算法定位误差小于 10%~60%的结点比例比 N4 算法多 1~4 个百分点. 比较图 5 和图 7 可以发现, 在 10%信标结点比例时, DAD 算法结点定位误差小于 40%~60%的结点比例与 N4 算法差不多; 在 5%信标结点比例时, DAD 算法结点定位误差小于 40%~60%的结点比例比 N4 算法多 1~3 个百分点. 所以, 从累积误差分布也反映了 DAD 定位算法在信标结点比例低时更具有优越性.

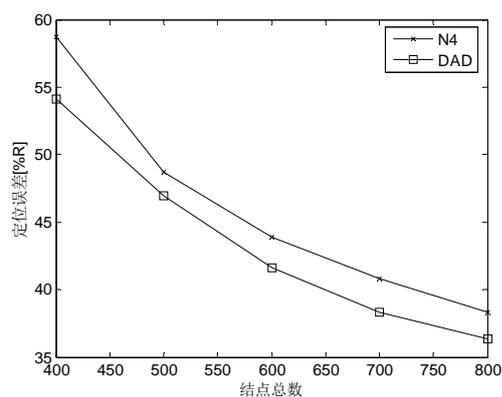


图6 定位误差随结点总数变化情况(5%信标结点)

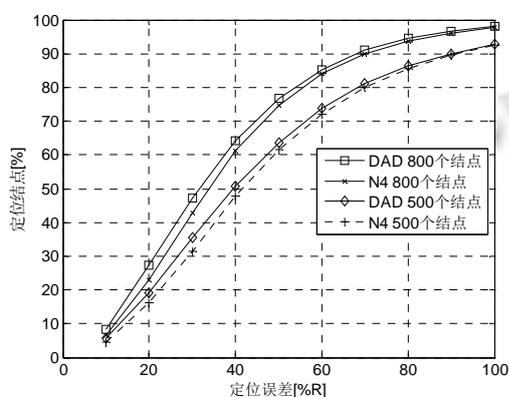


图7 累积误差分布情况(5%信标结点)

图4到图7,在不同信标结点比例情况下,从普通结点定位误差大小、不同定位误差范围内定位结点累积分布情况等方面,对DAD定位算法进行了分析.实验结果表明,在含洞的各向异性无线传感器网络中,DAD定位算法较之前的算法定位准确性有不错的提高,尤其在低信标结点比例时,定位性能改善更明显.

5 结语

本文针对有洞的各向异性无线传感器网络提出一种动态可靠信标结点定位算法.在对普通结点定位时,尽量选取到普通结点基于跳数的最短路径接近于直线的信标结点为参考结点,以提高信标结点到普通结点的距离估计准确性;进一步引申出直接可靠参考信标结点集和间接可靠参考信标结点集,从而提高结点定位准确性和定位结点比例.

参考文献

- 1 Yang SW, Pralav D, Mansi V, Mario G. FreeLoc: calibration-free crowdsourced indoor localization. Proc. of IEEE Infocom. Turin, Italy. Apr. 14-19, 2013.
- 2 Ji SS, Sze KF, Zhou ZR, et al. Beyond convex relaxation: a polynomial-time non-convex optimization approach to network localization. Proc. of IEEE INFOCOM. Turin, Italy. Apr. 14-19, 2013.
- 3 Zhou K, Roumeliotis. Multirobot active target tracking with combinations of relative observations. IEEE Trans. Robotics, 2011, 27(4): 678-695.
- 4 Neal P, Joshua NA, Spyros K, et al. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks. IEEE Signal Process Mag, 2005, 22(4): 54-69.
- 5 Yu XK, Yin XT, Han W, et al. Scalable routing in 3D high genus sensor networks using graph embedding. Proc. of IEEE INFOCOM. Orlando, FL, USA. Mar. 25-30, 2012.
- 6 Liu CL, Cao GH. Distributed critical location coverage in wireless sensor networks with lifetime constraint. Proc. of IEEE INFOCOM. Orlando, FL, USA. Mar. 25-30, 2012.
- 7 Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- 8 Wang J, Ghosh RK, Das SK. A survey on sensor localization. Journal of Control Theory and Applications, 2010, 8(1): 2-11.
- 9 Zhong ZG, He T. Achieving range-free localization beyond connectivity. Proc. of ACM SenSys. Berkeley CA, USA. Nov. 4-6, 2009.
- 10 Shang Y, Ruml W, Zhang Y, Fromherz Markus PJ. Localization from mere connectivity. Proc. of ACM MobiHoc, Annapolis, MD, USA, Jun. 1-3, 2003.
- 11 Xiao B, Chen L, Xiao QJ, Li ML. Reliable anchor-based sensor localization in irregular areas. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2009, 9(1): 60-72.
- 12 Shang Y, Shi H, Ahmed A. Performance study of localization methods for ad-hoc sensor networks. Proc. of IEEE MASS. Fort Lauderdale, FL, USA. Oct. 24-27, 2004.
- 13 Dragos N, Badri N. Ad-Hoc positioning system. Proc. of IEEE Global Communications Conference (Globecom2001). San Antonio, Tx, USA. Nov. 25-29, 2001.