

一种基于 Euclidean 的无线传感器网络三维定位算法

唐良瑞, 官 月, 罗艺婷, 柯珊珊
(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘 要: 针对传感器网络在三维空间的应用, 基于 Euclidean 定位算法, 提出了对无线传感器节点进行三维定位的算法. 将计算未知节点与锚节点间距离问题抽象为求解六面体顶点间的距离. 根据问题的抽象, 本文使用所提出的坐标法进行求解, 并采用循环迭代的方式来提高节点的定位比例. 仿真结果表明, 三维空间的 Euclidean 定位算法各项指标均为良好, 能有效地实现三维环境中的传感器节点定位.

关键词: 无线传感器网络; 三维定位; Euclidean 定位算法

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)04-0821-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.04.032

A 3D Position Algorithm Based on Euclidean for Wireless Sensor Networks

TANG Liang-rui, GONG Yue, LUO Yi-ting, KE Shan-shan

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: According to the application of wireless sensor networks in three dimensions, a novel 3D positioning algorithm based on Euclidean for wireless sensor networks is proposed. The problem of the distance calculation between an unknown node and an anchor node is transformed into a solution of the distance between the vertices in Hexahedral. It can be realized by the method of coordinates. The coverage is increased by the way of cyclic iterative method. Simulation results indicate that the performance of the algorithm is good and the algorithm can effectively realize the position of nodes for wireless sensor networks in three dimensions.

Key words: wireless sensor network; 3D position; Euclidean algorithm

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN), 作为一种新的数据采集技术, 在军事侦察、目标追踪、环境监测、医疗卫生等众多领域有着广阔的应用前景^[1]. 在这些应用中, 感知数据只有与感知地点相关联时才有意义^[2]. 因此, 传感器节点必须能够获取自身准确或近似的位置信息^[3]. 然而对于具有大量分布的大型传感器网络, 手动记录每个传感器的位置是不切实际的. 同样对于价格低廉的传感器设备, 为每个传感器额外配备一个昂贵的 GPS 芯片, 也不是一个最佳的选择^[4]. 因此对无线传感器网络节点定位技术的研究成为了必要.

现有的无线传感器网络定位算法大体分为基于测距的定位算法和基于非测距的定位算法两大类^[5]. 基于测距的定位算法对网络的硬件设施要求较高, 通常需要多次测量来提高定位精度, 大大增加了网络的计算量和通信开销. 而基于非测距的定位算法, 无需实际测量节点间距离和角度, 仅根据网络连通性等信息实现待定位

节点的位置. 因此, 如: 质心定位算法^[6]、APS^[7]系列算法、APIT^[8]算法和 MAP 算法^[9]等, 受到越来越多的关注. 在这些已有算法中, Euclidean 定位算法给出了精确计算与锚节点相距两跳的未知节点位置的方法, 突破了未知节点必须与锚节点相邻才能定位的限制, 较 DV-Hop 等需要估计平均每跳距离的算法有更高的精确度. 但 Euclidean 定位算法所存在的不足是: 所应用的平面几何理论不能直接扩展到三维空间, 导致 Euclidean 定位算法不能应用于三维空间的节点定位.

目前, 三维空间定位算法的研究也有很多, 如 Landscape-3D^[10]、Constrained 3-D^[11]、APIS^[12]等. Landscape-3D 算法借助移动的定位辅助装置 LA (Location Assistant) 周期性地广播其自身的位置信息, 网络中未知节点通过接收到的位置信息以及通过接收信号强度指示 (Received Signal Strength Indication, RSSI)^[13] 方法计算得到的与 LA 之间的距离来确定自身位置. 该算法的特点是未知节点之间无须通信, 通信开销小, 每个节点单独计算自身位置, 算法的计算复杂度与网络的规模无关, 但其即时迭

代过程虽对节点的硬件要求不是很高,但计算量较大,而离线迭代过程虽然降低了节点的计算量,但对节点的存储能力有较高的要求;而且整个定位过程主要依靠 LA 设施,对 LA 设施有很高的要求. Constrained 3-D 算法主要是基于传统的三角计算,未知节点依靠测量与邻近锚节点之间的距离来推算自身位置. 但该算法中的所有锚节点初始位置都部署在同一平面内、所有未知节点都与之分离的假设限定了算法的应用;而且算法的定位精度受锚节点密度的影响较大. APIS 算法是在 APIT 算法的基础上进行改进,将其扩展到三维空间中,由于采用球壳分割方法, APIS 算法的计算开销和通信开销较大.

基于以上分析,本文提出了一种基于 Euclidean 的无线传感器网络三维定位算法. 该算法将节点定位中的距离估计问题抽象为六面体模型求解顶点间距离问题,并利用所提出的坐标法对距离进行求解,最后采用四边定位法确定未知节点坐标. 本算法利用立体模型及坐标法,对未知节点和锚节点间的距离进行了精确的求解,在提高了定位精度的同时,也减小了算法的计算量. 从仿真的结果可以看出,三维空间的 Euclidean 定位算法的定位精度较二维 Euclidean 定位算法有明显提高,证明了所提出算法的可行性.

2 三维空间的 Euclidean 定位算法

2.1 三维空间的 Euclidean 定位模型

实际应用中,很难做到所有传感器节点都严格地部署在同一平面上. 当不在同一平面的四个点使用二维的 Euclidean 定位算法时,该算法会默认地保持节点间距离不变地将各节点平移到同一平面上,所计算出的坐标也就是节点平移后的坐标,这就会产了较大的

$$\begin{cases} x_d = \frac{(d_{BC}^2 + d_{BD}^2 - d_{CD}^2)}{2d_{BC}} \\ y_d = \pm \sqrt{\frac{(d_{BC} + d_{BD} + d_{CD})(d_{BC} + d_{BD} - d_{CD})(d_{BC} - d_{BD} + d_{CD})(d_{BD} - d_{BC} + d_{CD})}{4d_{BC}^2}} \end{cases} \quad (2)$$

y_d 的正负只改变所建模型在三维直角坐标系中的位置,而不改变 AE 的距离值. 此时节点 B 、 C 、 D 的坐标和 d_{AB} 、 d_{AC} 、 d_{AD} 已知,根据三边定位法,见式(3),可得节点 $A(x_a, y_a, z_a)$ 的坐标(取 $z_a > 0$),见式(4).

$$\begin{cases} x_a = \frac{d_{AB}^2 - d_{AC}^2 + x_c^2}{2x_c} \\ y_a = \frac{d_{AB}^2 - d_{AD}^2 - 2x_a x_d + x_d^2 + y_d^2}{2y_d} \\ z_a = \pm \sqrt{d_{AB}^2 - \frac{(d_{AB}^2 - d_{AC}^2 + x_c^2)^2}{4x_c^2} - \frac{(d_{AB}^2 - d_{AD}^2 - 2x_a x_d + x_d^2 + y_d^2)^2}{4y_d^2}} \end{cases} \quad (4)$$

误差. 并且在二维的 Euclidean 定位算法中,若节点 A 不在节点 C 、 B 、 L 所确定的平面,即 $\angle ACL \neq \angle \alpha + \angle \beta$,如图 1 所示,二维的 Euclidean 定位算法中的公式不再适用. 此时,若要确定唯一的 AL 距离值,需再增加另外的一个节点,即建立三维空间的 Euclidean 定位模型.

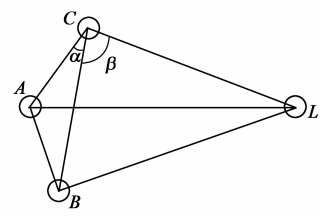


图1 Euclidean定位算法

三维空间的传感器网络中,未知节点 E 若要通过四边定位法确定自身位置坐标,需要获取到四个锚节点的距离,

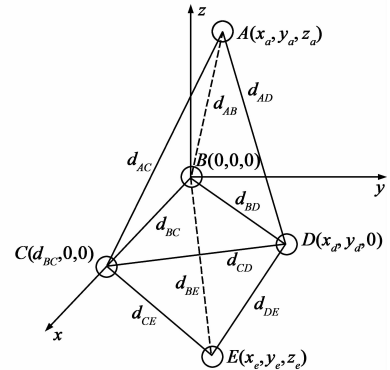


图2 三维空间的Euclidean定位模型

而如何获取则成为了定位技术的关键,本文的解决方法是建立三维空间的 Euclidean 定位模型,如图 2 所示,并采用坐标法计算未知节点与锚节点间距离.

定位模型中, B 、 C 、 D 三个节点两两间距离已知,节点 B 、 C 、 D 与锚节点 A 和未知节点 E 间的距离分别已知,但 AE 间距离未知,现用坐标法计算 AE 间距离:以节点 B 为原点, BC 为 X 轴, BCD 所在平面为 XOY 平面建立一个新的三维直角坐标系,即 $B(0, 0, 0)$, $C(d_{BC}, 0, 0)$,则在 XOY 平面上可得到:

$$\begin{cases} (x_d - d_{BC})^2 + y_d^2 = d_{CD}^2 \\ x_d^2 + y_d^2 = d_{BD}^2 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可求出节点 D 的坐标 $(x_d, y_d, 0)$:

$$\begin{cases} x_a^2 + y_a^2 + z_a^2 = d_{AB}^2 \\ (x_a - d_{BC})^2 + y_a^2 + z_a^2 = d_{AC}^2 \\ (x_a - x_d)^2 + (y_a - y_d)^2 + z_a^2 = d_{AD}^2 \end{cases} \quad (3)$$

同理可求得节点 $E(x_e, y_e, z_e)$ 的坐标. 最后计算出 A 、 E 间的距离:

$$d_{AE} = \sqrt{(x_a - x_e)^2 + (y_a - y_e)^2 + (z_a - z_e)^2} \quad (5)$$

2.2 算法描述

无线传感器网络中, 假设各节点具有 RSSI 测距能力, 可计算出相邻节点间的距离, 测距误差服从标准正态分布; 锚节点配备 GPS 装置, 可测得自身位置坐标; 节点间具有对称的通信能力, 通信半径一致, 并且所有的消息最终都可被正确接收, 若超出通信半径则认为节点间不能直接通信.

网络初始化后, 各节点建立初始信息链表. 在距锚节点 K (初始值为 2) 跳范围内, 寻找合适节点, 建立 Euclidean 模型, 并利用坐标法计算未知节点与锚节点间距离, 将此距离存储在未知节点的信息链表中. 然后判断网络中已获得四个锚节点距离的未知节点比例是否达到预定值. 若未达到此值, 则与锚节点间距离已知的节点转发各自距离链表, 之后进行下一次循环. 直至达到此预定值时, 所有未知节点采用四边定位法计算自身坐标, 算法结束.

2.3 算法实现

三维空间的 Euclidean 定位算法是一个分布式算法, 各节点在本地利用保存的信息, 通过算法计算得到自身的位置信息. 各节点需要保存表 1、表 2 的信息^[12].

网络进行初始化后, 各节点相互发送信息, 建立各节点初始信息链表. 网络中的所有节点需进行两次泛洪: 第一次泛洪时, 所有锚节点发送包含自身标识、节点 ID 以及三维空间位置信息, 未定位节点发送含有自身标识和节点 ID 的信息. 锚节点的邻居节点需记录锚节点坐标, 各节点采用 RSSI^[12]测出与邻居节点间的距离并记录. 第二次泛洪时, 各节点将第一次泛洪后的信息广播出去, 因此各节点获取与其相隔两跳节点的信息. 如表 1、2 分别为节点 E 保存的锚节点位置信息链表、节点 E 保存的各节点间的距离链表.

表 1 某节点保存的锚节点位置信息

锚节点 ID	横坐标	纵坐标	高度
A	88	56	45
F	43	65	58
...			
I	23	78	64

表 2 某节点保存的各节点间的距离链表

	A	B	C	D	E
A	0m	9m	6m	7m	-
B	9m	0	8m	4m	5m
C	6m	8m	0	6m	8m
D	7m	4m	6m	0	7m
E	-	5m	8m	7m	0
...					

建立模型时, 先选取一个锚节点, 如 A ; 在锚节点 A 的距离链表中取距离值存在且大于 0 的节点, 如 B ; 取在 A 、 B 距离链表中距离值同时存在且大于 0 的节点, 如 C ; 取 A 、 B 、 C 距离链表中距离值同时存在且大于 0 的节点, 如 D ; 取在 B 、 C 、 D 距离链表中距离值同时存在且大于 0, 在锚节点 A 的距离链表中无距离值的节点 E . 建立的模型如图 2 所示.

模型建立后, 利用 2.1 所描述的坐标法, 求出未知节点与锚节点间距离, 并将该距离保存在未知节点的距离链表中. 之后判断网络中已获得四个锚节点距离的未知节点比例是否达到预先设定值. 若未达到此值, 则与锚节点间距离已知的节点转发各自的距离链表, 使该节点的邻居节点能够获得其与其他节点间的距离值. 之后进入到下一次循环, 重复建立模型和计算未知节点到锚节点距离步骤, 直至可定位节点比例达到预定值时, 所有未知节点采用四边定位法计算自身坐标.

此外, 为了确保算法的严密性, 需要说明在 2.1 三维空间的 Euclidean 定位模型中, 当已知节点 B 、 C 、 D 的坐标和 d_{BE} 、 d_{CE} 、 d_{DE} , 计算节点 E 的坐标时, 会出现两种情况, 如图 3 所示, 为了解决这一问题, 采用如下方法: 建立模型后, 在该锚节点的邻居链表中取异于节点 B 、 C 、 D 的一到三个节点来替代节点 B 、 C 、 D 中的一个到三个点, 组成与三角形 BCD 共边或共顶点或完全相异的三角形, 这样可得到另外一组节点 E 和 E' 的坐标, 记为 E_1 和 E'_1 , 分别计算 EE_1 、 EE'_1 、 $E'E_1$ 、 $E'E'_1$ 的距离, 将其中距离最小的两个点的坐标取平均作为节点 E 的坐标.

三维空间的 Euclidean 定位算法继承了 Euclidean 算法定位精确度高的优势, 并且突破了 Euclidean 算法只适用于二维空间的局限性, 使其可以应用于实际的三维传感器网络的节点定位中. 虽然算法需要网络节点进行两次泛洪, 增加了通信量, 但本文所提出的坐标法巧妙地解决了三维空间复杂的距

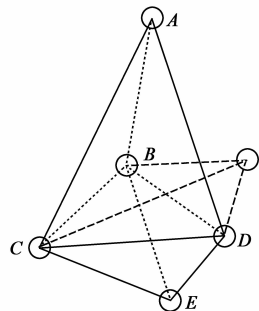


图 3 三维空间的 Euclidean 定位模型

离计算问题, 大大减小了算法的计算量; 所采用的循环迭代的方法, 也有效地增加了节点的定位比例; 同时算法也很好解决了定位过程中节点位置不唯一的问题, 不失为无线传感器网络节点定位中较好的算法.

3 仿真结果

为了验证算法的性能, 本文用 Matlab 对该算法进行了仿真试验. 三维仿真环境为随机在 $100 \times 100 \times$

100m³的区域内部署 300 个节点,二维仿真环境为随机在 100 × 100 m² 的区域内部署 100 个节点,已知节点均匀分布在网络区域.本文通过改变锚节点比例、通信半径、RSSI 误差系数这三类参数,观察分析它们对定位精度的影响,以及多参数共同作用时的影响,并进行了二维 Euclidean 算法和三维 Euclidean 算法相对定位误差的比较,以求全面客观地分析所提算法性能.

3.1 相对定位误差

本文在三维环境下采用的定位误差为:

$$\text{err} = \sqrt{(\hat{x} - x)^2 + (\hat{y} - y)^2 + (\hat{z} - z)^2} \quad (6)$$

其中 (x, y, z) 是未知节点的实际坐标,而 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 是用本文算法估计出的未知节点坐标.二维环境下的定位误差为:

$$\text{err} = \sqrt{(\hat{x} - x)^2 + (\hat{y} - y)^2} \quad (7)$$

其中 (x, y) 是未知节点的实际坐标, (\hat{x}, \hat{y}) 是估计出的未知节点坐标.网络中 M 个未知节点的平均定位误差与通信半径 R 的比值记为相对定位误差:

$$\Delta \text{err} = \frac{\sum_{i=1}^M \text{err}_i}{MR} \quad (8)$$

改变锚节点的比例,在不同通信半径下,观察相对定位误差,结果如图 4 所示.随着锚节点比例和通信半径的增加,相对定位误差基本呈下降趋势.这是由于当锚节点比例增加时,未知节点通信半径内的锚节点数量随之增加,未知节点可以直接获得距这些锚节点的距离,比通过三维定位模型获得的距两跳锚节点的距离更加准确,因此,当锚节点比例增加时,相对定位误差降低.而随着通信半径的增加,未知节点通信半径内的锚节点也随之增加,同上分析可知,随着通信半径的增加,相对定位误差也随之降低.当通信半径 $\geq 30\text{m}$ 时,即使在锚节点比例只有 10% 的情况下,相对定位误差仅在 0.2 左右;当锚节点比例 $\geq 15\%$ 时,相对定位误差在 0.1 左右.

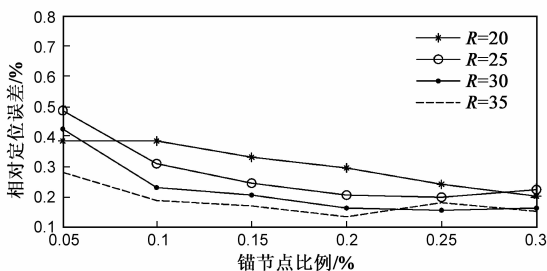


图4 相对定位误差随锚节点比例变化曲线

图 5 为二维 Euclidean 算法和三维 Euclidean 算法相对定位误差比较,两者的相对定位误差都随着锚节点比例的增加和通信半径的增大而下降,具体原因见图 4 分析,二维 Euclidean 算法的原因与三维 Euclidean 算法

相似,都是因未知节点通信半径内的锚节点数增加而导致相对定位误差的降低.从图中可得,当锚节点比例和通信半径一定时,二维 Euclidean 算法的相对定位误差比三维 Euclidean 算法略低,由于二维 Euclidean 算法和三维 Euclidean 算法的相对定位误差都来源于使用 RSSI 估计定位模型的边长或两点间距离时所产生的误差,而二维 Euclidean 算法只需估计 4 条边长和一段两点间距离,而三维 Euclidean 算法则需估计 9 条边长,因此,在相同条件下,三维 Euclidean 算法的相对定位误差会略高于二维 Euclidean 算法.

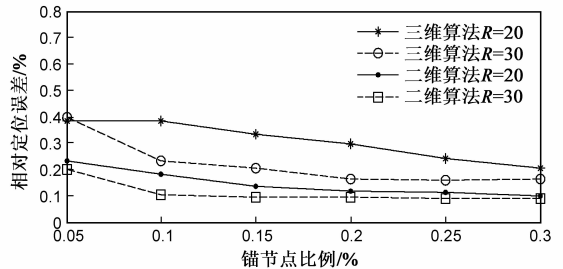


图5 二维Euclidean算法和三维Euclidean算法相对定位误差比较

图 6 表示 RSSI 误差、锚节点比例对定位精确度的影响.用式(9)来模拟 RSSI 测距:

$$\tilde{d}_{ij} = (1 + a \times \text{rand}(1, 1)) \times d_{ij} \quad (9)$$

其中 d_{ij} 为 i, j 两点间的实际距离, \tilde{d}_{ij} 为所模拟的 RSSI 测距值, a 为 RSSI 测距的误差系数, a 越大, RSSI 测距误差越大, $\text{rand}(1, 1)$ 为 $(0, 1)$ 间的随机数.从图 6 中可以看出,随着 RSSI 误差的增加,算法的相对定位误差增加.以图 2 为例说明,由于使用本文坐标法计算 AE 间距离时,需通过 RSSI 测量定位模型棱长, RSSI 的误差越大,定位模型棱长的误差也越大,导致所获得的 AE 间距离误差越大,从而导致 E 点坐标的相对误差增大.而当通信半径和 RSSI 误差系数相同时,锚节点比例越大,相对定位误差越小.

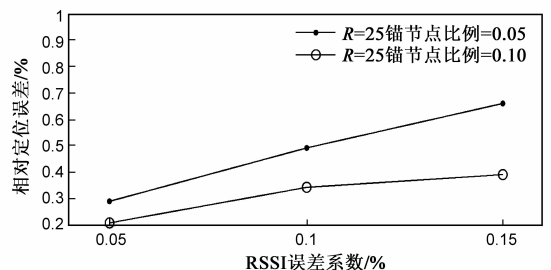


图6 相对定位误差随RSSI误差系数变化曲线

3.2 定位比例

网络中可定位节点个数 n_{known} 与未定位节点(可定位节点 + 不可定位节点)个数 n_{all} 的比值为定位比例:

$$\text{定位覆盖率} = \frac{\text{可定位节点个数}}{\text{可定位节点} + \text{不可定位节点}} \quad (10)$$

改变锚节点的比例,在不同通信半径下,观察定位比例,结果如图 7 所示.当通信半径为 25m 时,定位比例达到 97% 以上;当通信半径 ≥ 30 m 时,定位比例达到 99% 以上,具有较强的实用性.

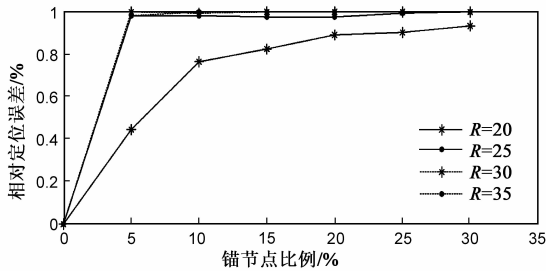


图7 定位比例随锚节点密度变化曲线

4 结束语

本文提出了一种三维空间的 Euclidean 定位算法,成功地将传感器网络中的节点从二维空间定位扩展到三维空间中,能有效地对实际应用中的三维传感器网络节点进行定位.算法的定位精度良好并且具有很高的定位比例,而计算量较小的良好特性也使其更加适用于无线传感器网络的节点定位.但有些工作还有待于进一步的完善,如减小算法的通信量,提高抗干扰性等,希望之后能在此基础上发展更加有效可行的无线传感器网络的定位算法.

参考文献

- [1] Niu Dou, Guan Bo, Zhou Wei. 3D localization method based on MDS-RSSI in wireless sensor network [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems [C]. USA: IEEE Press, 2010. 714 - 717.
- [2] 沙超,王汝传,等.无线传感器网络中一种信标节点可迁移的协作定位方法[J].电子学报,2010,38(11):2625 - 2629.
SHA Chao, WANG Ru-chuan, et al. A cooperating localization method based on beacon transfer in wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(11): 2625 - 2629. (in Chinese)
- [3] Hady S, Stephan Olariu. HexNet: Hexagon-based localization technique for wireless sensor networks [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications [C]. USA: IEEE Press, 2009. 1 - 6.
- [4] 戴桂兰,等.一种基于球面坐标的无线传感网络三维定位机制[J].电子学报,2008,36(7):1297 - 1304.
DAI Gui-lan, et al. A localization scheme based on sphere for wireless sensor network in 3D [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1297 - 1304. (in Chinese)
- [5] Li Baozhu, Wang Hui. A low complexity localization algorithm in wireless sensor network [A]. Proceedings of CICC-ITOE In-

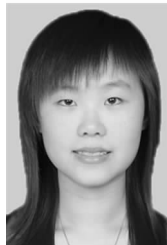
ternational Conference on Innovative Computing and Communication [C]. USA: IEEE Press, 2010. 217 - 220.

- [6] 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.
- [7] Niculescu D, Nath B. Ad-hoc positioning systems [A]. Proceedings of the 2001 IEEE Global Telecommunications Conference [C]. USA: IEEE Press, 2001. 2926 - 2931.
- [8] 王殊,阎毓杰,胡富平,等.无线传感器网络的理论及应用 [M].北京:北京航空航天大学出版社,2007.152 - 154.
- [9] Kuo-Feng Su, Chia-Ho Ou, H C. Localization with mobile anchor points in wireless sensor network [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 1187 - 1197.
- [10] L Q Zhang, X B Zhou, Q Cheng. Landscape-3D: A robust localization scheme for sensor networks over complex 3D terrains [A]. Proceedings of the 31st IEEE Conference on Local Computer Networks [C]. USA: IEEE Press, 2006. 239 - 246.
- [11] J L Liang, J Shao, Y Xu, J D Tan, BT Davis, P L Bergstrom. Sensor network localization in constrained 3-D spaces [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation [C]. USA: IEEE Press, 2006. 49 - 54.
- [12] 吕良彬,曹阳,等.基于球壳交集的传感器网络三维定位算法[J].北京邮电大学学报,2006,29(21):48 - 51.
LV Liang-bin, CAO Yang, et al. Three dimensional localization schemes based on sphere intersections in wireless sensor network [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006, 29(21): 48 - 51. (in Chinese)
- [13] Junqiang Zheng, Chengdong Wu, Hao Chu. Localization algorithm based on RSSI and distance geometry constrain for wireless sensor network [A]. Proceedings of the 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering [C]. USA: IEEE Press, 2010. 2836 - 2839.

作者简介



唐良瑞 男,1966 年生于湖南省永州市.2002 年于北京邮电大学获得博士学位,现为华北电力大学电气与工程学院教授,主要研究方向为电力系统通信、信息安全、无线通信等.
E-mail: tangliangrui@163.com



宫月 女,1986 年出生于黑龙江省齐齐哈尔市.华北电力大学硕士研究生在读,主要研究方向为无线传感器网络节点定位技术.
E-mail: 50940694@163.com