

基于 RSSI 与移动锚节点运动轨迹的定位算法

赵雅坤, 徐 娟, 蒋娇龙

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘 要: 无线传感器网络获取消息节点的位置需进行实时定位, 但由于传感器节点存在能量有限、可靠性差等不足, 考虑到能耗和硬件的限制, 提出一种基于接收信号强度指示(RSSI)的定位算法。利用未知节点从锚节点处接收到的 RSSI 值序列估计未知节点的位置, 锚节点在监测区域中按照特定的轨迹运动, 以覆盖区域内所有的点。仿真结果表明, 该算法是可行的, 且具有较高的定位精度。

关键词: 无线传感器网络; 接收信号强度指示; 移动锚节点; 定位技术; 距离误差

中文引用格式: 赵雅坤, 徐娟, 蒋娇龙. 基于 RSSI 与移动锚节点运动轨迹的定位算法[J]. 计算机工程, 2019, 45(1): 35-39.

英文引用格式: ZHAO Yakun, XU Juan, JIANG Jiaolong. Location algorithm based on RSSI and motion trajectory of mobile anchor node[J]. Computer Engineering, 2019, 45(1): 35-39.

Localization Algorithm Based on RSSI and Motion Trajectory of Mobile Anchor Node

ZHAO Yakun, XU Juan, JIANG Jiaolong

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

[Abstract] The location of the Wireless Sensor Network (WSN) to obtain the message node needs to be located real time. However, due to the limited energy and poor reliability of the sensor node, a localization algorithm based on Received Signal Strength Indication (RSSI) is proposed, considering the limitation of power consumption and hardware. The location of the unknown node is estimated by the sequence of RSSI values received by the unknown node from the anchor node, and the anchor node moves according to a specific trajectory in the monitoring area, covering all points in the area as much as possible. Simulation results show that the algorithm is feasible and has high localization accuracy.

[Key words] Wireless Sensor Network (WSN); Received Signal Strength Indication (RSSI); mobile anchor node; localization technology; distance error

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0048783

0 概述

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN)^[1-2] 是一种分布式传感器网络, 是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成, 通过无线通信方式形成一个多跳的自组织网络系统。无线传感器网络的目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息, 并发送给观察者。

传感器网络最基本的功能之一就是确定事件发生的位置或获取消息节点的位置。然而, 监测区域内随机分布的未知节点 (本文中未知节点指待定位的传感器节点) 无法事先知道自身的位置, 所以节点

布置后必须进行实时定位。由于传感器节点携带的电池能量有限, 考虑到能耗和硬件的限制, 因此一般采用接收信号强度指示 (Received Signal Strength Indication, RSSI) 来进行测距。

本文提出一种基于 RSSI 和移动锚节点运动轨迹的定位算法, 在目标区域内使用少数锚节点对整个区域内的未知节点进行定位, 锚节点按照既定的轨迹做匀速直线运动, 尽可能覆盖区域内所有的点。根据未知节点接收到的来自移动锚节点的 RSSI 值序列, 使用最小二乘法拟合该序列得到对应的多项式, 通过计算找到未知节点在锚节点轨迹上的垂点, 可以得到过该垂点锚节点轨迹的垂线, 2 条垂线的交点即未知节点。

基金项目: 国家自然科学基金 (61202384); 中央高校基本科研业务费专项资金 (221201700186)。

作者简介: 赵雅坤 (1996—), 女, 硕士研究生, 主研方向为无线传感网络定位技术、MAC 协议; 徐 娟, 副教授; 蒋娇龙, 硕士研究生。

收稿日期: 2017-09-25 **修回日期:** 2018-01-17 **E-mail:** cecilia_zhao96@163.com

1 相关研究

传感器网络定位算法可分为 2 类:基于测距的定位算法和无需测距的定位算法。基于测距的节点定位技术通过电波信号获取未知节点和锚节点间的距离,再通过合适的计算方法估算出节点的大致位置。测距技术一般分为 4 种:基于到达时间(Time of Arrival, TOA)^[3-4],基于到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)^[5],基于到达角度(Angle of Arrival, AOA)^[6-7]和基于接收信号强度指示(RSSI)^[8]。其中,基于 RSSI 的定位技术不需要额外的硬件且能耗较低,对于无线传感器网络来说是一种经济方便的方法,未知节点在获取与邻近锚节点的距离或与邻近锚节点间的相对角度后,通常使用三边测量法、三角测量法或极大似然估计法计算自身位置。

移动锚节点的概念由文献[9]提出,其中一个未知节点从多个锚位置接收信标。使用诸如三边测量法、三角测量法或极大似然估计法等任一种定位方法,可以得到节点的估计位置,最终将估计位置的加权平均作为节点位置。定位精度随接收信标数量的增加而增加。

文献[10]提出一种基于 RSSI 趋势的定位算法,该算法利用未知节点从锚节点处接收到的 2 条 RSSI 趋势估计未知节点的位置。该算法较为新颖并考虑误差减少机制,但仍存在一些问题:使用了多个锚节点,锚节点路径不确定性过高;锚节点的路径是随机的,每改变一次运动轨迹都要利用轨迹的表达式重新计算,增加额外的计算量。在本文算法中,锚节点的轨迹是固定的,无需重复计算锚节点轨迹。

文献[11]通过对 WSN 中基于测距的定位进行误差分析并提出一种求精算法,该算法在每次迭代中首先根据“磁极”思想确定“误差节点”和“有效节点”,然后在误差节点的邻居节点中选择 2 个相对偏差最小的节点作为圆心,以它们到误差节点的测距值为半径分别作圆,得到 2 个交点,最后在它的当前定位位置和这 2 个交点之中选择较小的误差作为本轮的求精位置。该算法能够降低多边形定位模型产生的节点位置误差,有效提高网络的定位精度。

文献[12]提出一种辅助定位信标节点的移动路径规划算法,该算法利用移动 sink 节点对监测区域进行定位,并通过蚁群算法获得能覆盖整个监测区域的信标节点移动路径。

文献[13]对无人值守情况下无线传感器网络定位的安全进行了研究。通过计算未知节点接收到的 RSSI 方差将方差较小的一组所对应的节点信息剔除,从而抑制虫洞攻击对定位的影响。

2 系统模型

2.1 模型假设

本文模型假设锚节点在传感区域中沿直线做匀速运动,并周期性地广播其位置信息。未知节点接收到锚节点在运动过程中广播的信息,会获得一组 RSSI 值。当锚节点靠近未知节点时, RSSI 值增大;当锚节点远离未知节点时, RSSI 值减小。假设信道模型为对数正态阴影模型,与发射器相距距离 d 处的 RSSI 值由式(1)、式(2)^[14]得出:

$$RSSI(d) = P_t - P_L(d) \quad (1)$$

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10\eta \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (2)$$

其中, P_t 是发射功率, $P_L(d_0)$ 是信号传输参考距离(即 d_0)的路径损失,通常取 $d_0 = 1 \text{ m}$, η 是路径衰减因子,一般取 2~5, X_σ 为平均值为 0 的高斯分布随机数。

2.2 RSSI 值的多项式模型

在锚节点的运动轨迹上定义一些信标点,信标点的位置即锚节点发送信息的位置。将第 1 个信标点看做参考点或初始点,其余信标点与它的距离称为相对距离。如图 1 所示,未知节点接收到的 RSSI 值随着相对距离的变化而变化, RSSI 值越大,对应的信标点与未知节点的距离就越小。锚节点轨迹上距离未知节点最近的点对应最大的 RSSI 值。使用多项式最小二乘曲线拟合方法^[15]获得每组 RSSI 的多项式。令 $P(x)$ 表示 RSSI 值的 j 阶多项式,定义如下:

$$P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_jx^j \quad (3)$$

将 n 个相对距离带入式(3)可以估算出相关系数 $a_0, a_1, a_2, \cdots, a_j$ 。

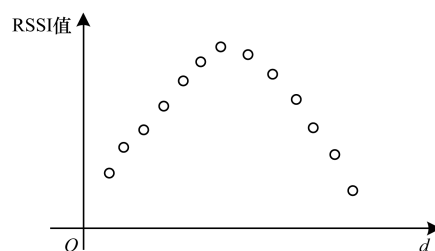


图 1 未知节点接收到 RSSI 值和相对距离 d 的关系

本文采用的多项式次数为 2 次,即拟合一组 RSSI 值得到的多项式为:

$$R(d) = a_0 + a_1d + a_2d^2 \quad (4)$$

其中, d 为信标点的相对距离。

2.3 基于最大 RSSI 值的定位

已知未知节点和锚节点轨迹间的最短距离是连接未知节点和最近点的垂线。未知节点需要获得 2 条不同锚轨迹上的最大 RSSI 点来得到过该点的锚节点轨迹的垂线,2 条这样垂线的交点即未知节点。图 2 显示了对应于 2 条锚轨迹的 2 条线段 L_1, L_2 。令 (x, y) 表示未知节点的位置,坐标 (x_1, y_1) 、 $(x_2,$

y_2) 分别表示 L_1 和 L_2 上的最大 RSSI 的最近点, L_3 、 L_4 分别表示 L_1 、 L_2 的垂线。

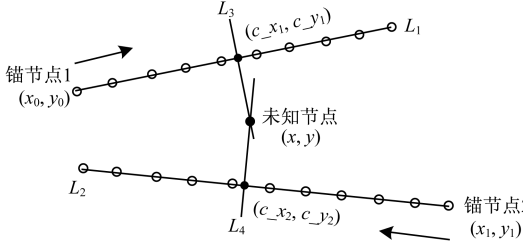


图2 基于轨迹上最近点计算的未知节点

如图3所示,锚节点沿着一个方向做匀速直线运动,圆圈为信标点, (x_s, y_s) 为锚节点初始位置的坐标, (x_d, y_d) 为锚节点运动轨迹上的一个信标点。锚节点运动轨迹与水平方向的夹角为 θ , 由式(5)计算得到。

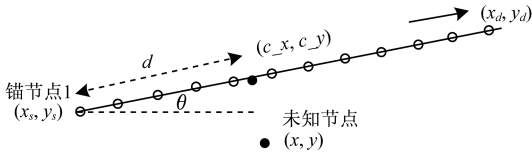


图3 未知节点和锚节点的运动轨迹

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_d - y_s}{x_d - x_s}\right) \quad (5)$$

假设直线 L_1 的斜率为 k_1 , 直线 L_2 的斜率为 k_2 , 则根据几何关系: L_1 垂线 L_3 的斜率为 $-1/k_1$, L_2 垂线 L_4 的斜率为 $-1/k_2$ 。

因此 L_3 的表达式为:

$$y = -\frac{1}{k_1}(x - c_{x1}) + c_{y1} \quad (6)$$

L_4 的表达式为:

$$y = -\frac{1}{k_2}(x - c_{x2}) + c_{y2} \quad (7)$$

其中, c_{x1} 表示锚节点 1 的运动轨迹 L_1 上距离未知节点最近的一个点, c_{x2} 表示锚节点 2 的运动轨迹 L_2 上距离未知节点最近的一个点, c_{x1} 和 c_{x2} 可通过第3节所述的方法求得。

联合式(6)和式(7)求解,得未知节点坐标:

$$\begin{cases} x = \frac{k_1 c_{x2} - k_2 c_{x1} + k_1 c_{y2} - k_2 c_{y1}}{k_1 - k_2} \\ y = \frac{c_{x1} - c_{x2} + c_{y1} - c_{y2}}{k_1 - k_2} \end{cases} \quad (8)$$

2.4 锚节点轨迹的选择

锚节点在监测区域中运动,向未知节点广播自己的位置信息。由于无线电波的传播损耗,只有在锚节点的通信范围内的未知节点才有可能接收到锚节点的信息。锚节点在监测区域中沿着一条直线运动,对于部分未知节点,只有少数信标点处发送的信息可以接收到。且对于一个未知节点,要想计算出坐标,至少需要两组 RSSI 序列。因此,锚节点在监

测区域中的运动轨迹不止一条,出于对能耗的考虑,可以事先确定锚节点的个数和各自的运动轨迹,同时保证锚节点的通信范围尽量覆盖监测区域。

假设在监测区域中采用一个锚节点,那么锚节点需要多次改变运动方向,其通信范围才能覆盖整个监测区域。且部分未知节点在一段时间内接收不到信号,例如未知节点第1次从坐标 $(0,0)$ 处沿着直线运动到坐标 $(50,50)$ 处,那么坐标 $(0,50)$ 处的未知节点在锚节点这次运动过程中接收不到锚节点广播的信息。

假设在监测区域中采用2个锚节点,例如锚节点1从 $(0,0)$ 沿着直线运动到 $(50,50)$,锚节点2从 $(0,50)$ 沿直线运动到 $(50,0)$ 。在这个 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的监测区域中,部分未知节点只能接收到锚节点1广播的信息,部分未知节点只能接收到锚节点2广播的信息,只有少部分未知节点能接收到来自1个锚节点的信息。

假设在监测区域中采用3个锚节点,如图4、图5所示。此前只能接收到锚节点1或者锚节点2广播信息的未知节点,此时可以接收到锚节点3广播的信息,因此,所有的未知节点至少能接收到两组用于计算其坐标的 RSSI 值序列,符合前文所述的算法要求。

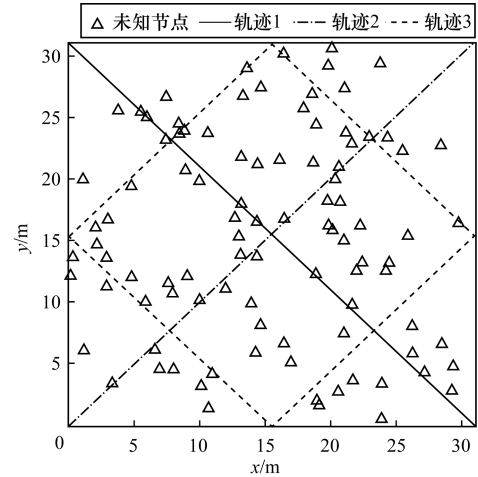


图4 31 m × 31 m 监测区域节点部署

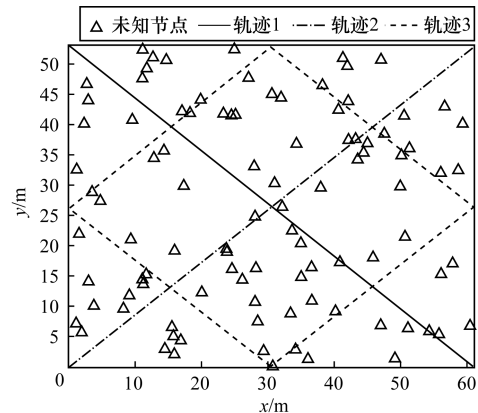


图5 61 m × 53 m 监测区域节点部署

3 算法描述

本文定位算法步骤如下:

步骤 1 初始化。初始化锚节点的轨迹,令锚节点的初始坐标为 (x_0, y_0) , 轨迹的斜率为 k 。

步骤 2 锚节点广播自己的位置信息。对于每条锚节点轨迹,未知节点都会相应接收到一组 RSSI 值序列。

步骤 3 未知节点对 RSSI 值序列应用最小二乘法求得多项式(4),对多项式(4)求导得等式(9),存在一个值 d_m 使 $R'(d_m) = 0$, 则 $R(d_m)$ 对应的点为锚节点轨迹上距离未知节点最近的点,即未知节点在锚节点轨迹上的垂点。

$$R'(d) = a_1 + 2a_2d \quad (9)$$

步骤 4 计算垂点的坐标:

$$c_x = x_0 + d_m \cdot \cos \theta \quad (10)$$

$$c_y = y_0 + d_m \cdot \sin \theta \quad (11)$$

步骤 5 由 2 条锚节点轨迹可得未知节点的 2 个垂点,过垂点分别有轨迹的垂线,其表达式为式(6)和式(7),联立式(6)、式(7)可得未知节点坐标式(8)。

4 仿真结果与分析

本文采用 Matlab 软件对算法进行仿真分析,仿真参数的选择如表 1 所示。在监测区域中随机部署 100 个未知节点,3 个锚节点分别按照各自的轨迹做匀速直线运动,见图 4 和图 5。实验比较了相同监测区域中节点不同的通信范围对结果的影响,以及在相同通信范围的情况下监测区域大小对结果的影响。定位误差的累积分布函数(CDF)图如图 6~图 9 所示。其中,横坐标是计算出的节点坐标和节点实际坐标的距离(即定位误差),纵坐标表示所有定位误差小于相应横坐标的值出现的概率之和。

表 1 仿真参数设置

参数	参数值
仿真区域/ m^2	$31 \times 31, 61 \times 53$
未知节点个数	100
锚节点个数	3
信标点的间距/ m	2
信道模型	对数正态模型
路径损耗指数 η	2
X_σ 的标准差	4
发射功率 P_t/W	1
通信范围/ m	10, 20

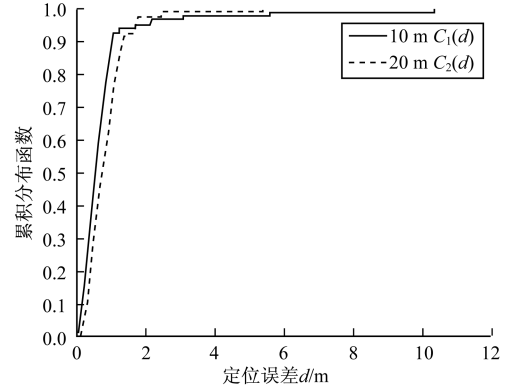


图 6 $31 \text{ m} \times 31 \text{ m}$ 监测区域内不同通信范围情况下定位误差的 CDF

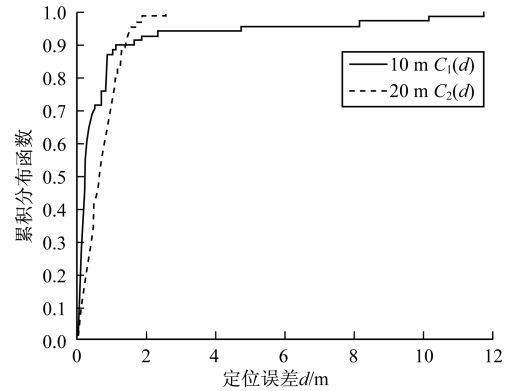


图 7 $61 \text{ m} \times 53 \text{ m}$ 监测区域内不同通信范围情况下定位误差的 CDF

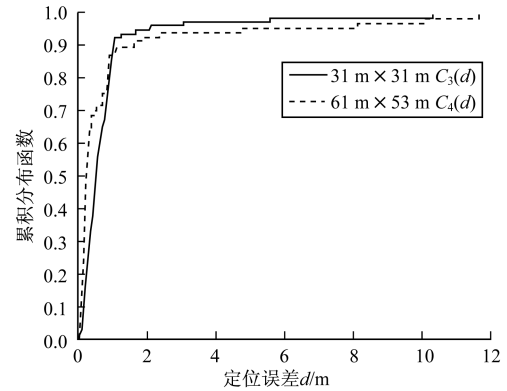


图 8 通信范围为 10 m 时不同监测区域情况下定位误差的 CDF

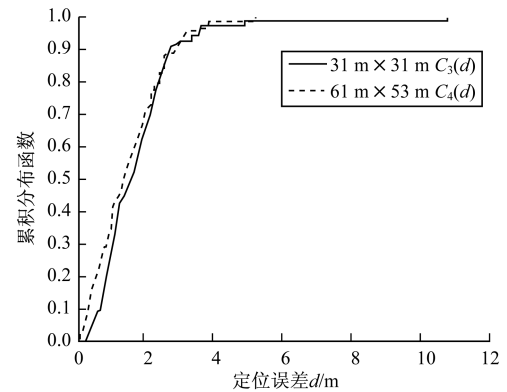


图 9 通信范围为 20 m 时不同监测区域情况下定位误差的 CDF

由图6、图7可见,在同一监测区域,当节点的通信范围为20 m时,最大定位误差小于通信范围为10 m时的最大定位误差。图6和图7中 $C_1(d)$ 与 $C_2(d)$ 两条线都有交点,在交点之前, $C_1(d)$ 大于 $C_2(d)$;在交点之后, $C_1(d)$ 小于 $C_2(d)$ 。累积分布函数图像说明通信范围为20 m时,定位误差的波动更小,定位更加精准。

由图8、图9可见,当通信范围为20 m时, $C_3(d)$ 和 $C_4(d)$ 的图像比较接近,当通信范围为10 m时,两条线的区别较明显。综合来看,通信范围为10 m时,31 m×31 m的监测区域中节点的定位情况更好;而通信范围为20 m时,2个监测区域中节点的定位结果相差不大。

表2、表3分别是通信范围为10 m和20 m时定位的结果。在计算时,定位误差大于15 m的点视为定位失败。表2和表3中的平均定位误差和图6~图9中的定位误差是指定位成功的点的平均定位误差。由表2、表3可知,在相同通信范围的情况下,面积小的监测区域中成功定位的点数多。

表2 通信范围为10 m时的定位结果

监测区域大小/m ²	平均定位误差/m	平均定位的点数
31×31	0.777 43	98.2
61×53	0.914 60	69.6

表3 通信范围为20 m时的定位结果

监测区域大小/m ²	平均定位误差/m	平均定位的点数
31×31	0.853 94	95.1
61×53	0.743 59	94.1

本文通过仿真实验,得出以下结论:

1) 本文提出的算法是可行的。

2) 锚节点运动轨迹和未知节点的相对位置对定位结果有影响,经分析发现,定位误差大于15 m的未知节点大多分布在监测区域的四角,角落位置接收到的RSSI值序列拟合的多项式结果较差,且此时求出的最大RSSI值并非未知节点在锚节点运动轨迹上的垂点。

3) 节点的通信范围对定位结果有影响。对于同一监测区域,节点的通信范围大意味着未知节点能获取的RSSI值更多,计算也会相对更准确。

5 结束语

本文提出一种基于RSSI值的移动锚节点的无线传感网络定位算法。在目标区域内使用少量锚节点对整个区域内的未知节点进行定位,锚节点按照既定的轨迹做匀速直线运动,其通信范围尽可能覆盖区域内所有的点。同时比较了相同监测区域中节点不同的通信范围对结果的影响,以及相同的通信范围情况下监测区域大小对结果的影响。仿真结果表明,本文锚节点轨迹对传感区域内大部分节点可

起到一定作用,且定位精度较高。但是对于少部分未知节点,定位效果一般,下一步将对更多的锚节点路径进行实验,并增加锚节点改变方向的次数,从而定位区域内所有未知节点。

参考文献

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] AKYILDIZ I F, SU W, SANKNRSUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [3] SICHITI M, RAMADURAI V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. Fort Lauderdale, USA: IEEE Press, 2004: 125-136.
- [4] 徐彤阳. NLOS环境下无线传感器网络TOA定位算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(12): 93-96.
- [5] PRADHAN S, SHIN S, KWON G R, et al. The advanced TOA trilateration algorithms with performance analysis[C]//Proceedings of Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, USA: IEEE Computer Society, 2016: 147-158.
- [6] CAO H, CHAN Y T, SO H C. Maximum likelihood TDOA estimation from compressed sensing samples without reconstruction[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(5): 564-568.
- [7] FASCISTA A, CICCARESE G, COLUCCIA A. A localization algorithm based on V2I communications and AOA estimation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(1): 126-130.
- [8] RUSLI M E, ALI M, JAMIL N, et al. An improved indoor positioning algorithm based on RSSI-trilateration technique for internet of things[C]//Proceedings of International Conference on Computer and Communication Engineering. Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society, 2016: 124-136.
- [9] KONG Fanzeng, WANG Jianhui, ZHENG Nae. A robust weighted intersection algorithm for target localization using AOA measurements[C]//Proceedings of Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference. Xi'an, China: [s. n.], 2016: 145-154.
- [10] SAHU P K, WU E H K, SAHOO J. DuRT: dual RSSI trend based localization for wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(8): 3115-3123.
- [11] 姚英彪,姜男澜. 无线传感器网络定位的分布式求精算法[J]. 通信学报, 2015, 36(1): 1-10.
- [12] 陈友荣,万锦昊,苏子漪,等. 辅助定位信标节点的移动路径规划算法研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 160-168.
- [13] 朱青青,杨玉斌,刘娜,等. 无线传感器网络中基于RSSI一致性的安全定位方法[J]. 计算机工程, 2016, 42(10): 151-157, 163.
- [14] RAPPAPORT T S. Wireless communications: principles and practice[M]. 北京:电子工业出版社, 2013.
- [15] GOLUB G. Numerical methods for solving linear least squares problems[J]. Numerische Mathematik, 1965, 7(3): 206-216.

编辑 索书志