

文章编号: 1000-582X(2012)12-139-05

无线传感器网络协同定位算法

冯文江, 毕晓伟, 邓 岑, 胡 幻

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 针对无线传感器网络中基于 RSS 的定位算法存在的不足, 提出一种协同定位算法。该算法包含 2 个方面: 一是引入参考信标节点, 以增加节点定位的容错性; 二是采用狄克逊(Dixon) 检验法剔除异常 RSS 值, 同时引入 RSS 标准差阈值和学习模型, 减小基于 RSS 的测距误差, 有效提高定位精度。通过仿真实验对算法性能进行了评估, 结果表明, 该算法定位精度得到了有效提高, 健壮性和稳定性较好。

关键词: 无线传感器网络; 协同定位; 接收信号强度

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

A cooperative localization algorithm for wireless sensor networks

FENG Wenjiang, BI Xiaowei, DENG Cen, HU Huan

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the existing RSS (received signal strength) based localization algorithm for wireless sensor networks (WSN), a cooperative localization algorithm (CLA) is proposed. A reference anchor node is introduced to tolerant some minor error including the node position error. Dixon detection method is applied to remove abnormal RSS values, while the standard deviation threshold of RSS and learning model are introduced to reduce the RSS ranging error and effectively improve the precision. Simulation experiments are performed to evaluate the performance of the proposed algorithm. The results demonstrate that the localization accuracy is improved effectively, while the stability and robustness are better.

Key words: wireless sensor networks; cooperative localization; received signal strength (RSS)

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 由一组无线传感器节点自组织形成, 无需固定基础设施的支持, 具有快速部署、抗毁性强、自组织、低功耗和低成本等特点^[1-2], 特别在物联网提出后, WSN 备受关注。但是对于多数应用, 如果未知传感器节点位置, 感知数据无意义。因此, 结合实际应用需求, 研究适合 WSN 的无线定位算法具有重要意义。

无线定位算法大体分 2 大类: 基于测距算法和无需测距算法^[3]。基于测距算法通过测量节点间的

距离或角度信息^[4], 运用三边测量、三角测量或最大似然法估计节点位置。常用的测距参数有 RSS (received signal strength)^[5], TOA (time of arrival)^[6], TDOA (time difference of arrival)^[7] 和 AOA (angle of arrival)^[8]; 无需测距算法则不需要距离和角度信息, 直接利用网络连通性等信息实现节点位置估计。

就 WSN 定位而言, 由于传感器节点具备通信能力, 且通信控制芯片通常会提供 RSS 测量功能,

收稿日期: 2012-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60872038); 重庆市自然科学基金重点资助项目(CSTC2009BA2064)

作者简介: 冯文江(1963-), 男, 重庆大学教授, 主要从事宽带无线接入技术、认知无线电、通信信号处理等方向研究, (Tel)023-65105811; (E-mail)fengwj@cqu.edu.cn。

在信标节点广播自身坐标的同时可进行 RSS 测量,许多学者将 RSS 作为一种低功率、低成本的测距手段。基于 RSS 的定位算法优缺点十分明显,可以方便、廉价地应用于各种系统,但对复杂环境的适应能力弱,多径效应、阴影衰落、非视距传输等都会对其产生影响^[9],定位精度低。为了改善基于 RSS 定位的精度,任维政等^[10]提出差分似然估计法;Kumar 等^[11]提出基于 RSS 测距与误差估计联合处理算法;Bulusu 等^[12]提出质心定位算法,该算法虽然运算量小,但精度仍较低;文献^[13]对其进行改进,提出一种加权质心定位算法,利用 RSS 衡量通信范围内的节点,并通过权重提升距离目标节点最近节点的效应,但权重衰减指数设置相同,与实际环境不符;Chen 等^[14]对其做进一步改进,提出一种基于 RSS 的自适应加权质心目标定位算法,其权重衰减指数根据目标节点所处环境自适应调整。

影响基于 RSS 定位的精度的主要因素包括信标节点位置误差、测距误差以及数据处理误差等。前述算法都是针对部分因素展开,具有一定的局限性。综合考虑影响定位性能的诸因素,并结合 WSN 的特点,提出一种协同定位算法。

1 协同定位算法

1.1 电波传播路径损耗模型

电波传播路径损耗对于基于 RSS 定位算法的定位精度有很大影响。常用的传播路径损耗模型有:自由空间传播模型、对数距离路径损耗模型、哈塔模型、对数-常态分布模型等^[10]。在实际应用中,由于多径、绕射、障碍物分布等因素,电波传播路径损耗与理论值相比有较大差异。依据对数-常态分布模型,采用式(1)计算节点接收信标信号的路径损耗

$$PL(d) = PL(d_0) + 10k \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (1)$$

式中: $PL(d)$ 为电波传播距离 d 后的路径损耗 (dB); X_σ 为均值为 0 的正态分布随机变量,其标准差为 σ ; $k=2\sim 5$ 为路径衰减因子。 $PL(d_0)$ 是自由空间传播模型取 $d=1$ m 时的路径损耗,即

$$\begin{aligned} PL(d_0) &= \text{Loss}(d = 0.001 \text{ km}) = \\ &32.4 + 10 \times k \times \lg(d = 0.001 \text{ km}) + \\ &10 \times k \times \lg(f) = 32.4 - 30k + 10 \times k \times \lg(f), \end{aligned} \quad (2)$$

式中 f 为电波频率 (MHz)。那么,由式(1)可得各未知节点接收信标节点信号时的信号强度为

$$RSS = P + G - PL(d), \quad (3)$$

式中: P 为信标节点发射功率; G 为天线增益。

1.2 协同定位模型

协同定位算法依据以下网络模型

1) N 个传感器节点随机分布在一个 $M \times M$ 的

正方形区域内;

2) 每个节点具有唯一的 ID,且都具有相同的处理和通信能力,在网络中地位平等;

3) 每个节点都具备数据融合处理功能,节点之间连接对称;

4) 目标节点可以移动,也可以处于静止状态,每一信标节点都具有相同的检测半径 R ,如果目标节点位于检测半径内,则进行定位,否则不予定位。

协同定位模型如图 1 所示,目标定位需要 4 组输入参数,每组包括信标节点 RSS 的标准差 RSS_{SD} 和 RSS 值,协同定位处理后的输出为目标节点坐标。

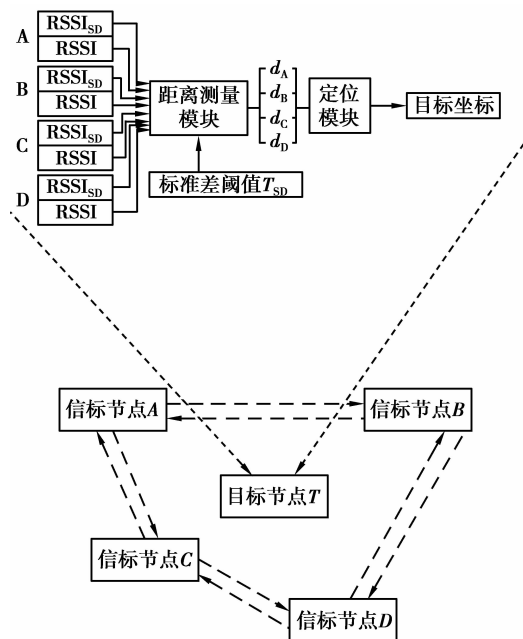


图 1 协同定位模型

信标节点广播 $n(0 \leq n \leq 100)$ 个具有连续序号的字节组成的数据帧,目标节点根据接收到的数据帧记录每个字节的 RSS 值 R_i ,采用狄克逊(Dixon)检验法^[15]剔除异常 RSS 值,统计得到 $q(0 \leq q \leq n)$ 个 RSS 有效值,每次接收到的所有 RSS 值的标准差记为 R_{SD} ,标准差阈值设定为 T_{SD} 。则距离测量模块获得的 RSS 值 R_{avg} 为

$$R_{avg} = \alpha R_{avg1} + (1 - \alpha) R_{avg2}, \quad (4)$$

式中

$$R_{avg1} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i, R_i \leq \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q R_j, \quad (5)$$

$$R_{avg2} = \frac{1}{q-m} \sum_{i=1}^{q-m} R_i, R_i > \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q R_j, \quad (6)$$

m 为 RSS 有效值小于等于均值的个数

$$\alpha = \begin{cases} 0.5 \left(\frac{T_{SD} - R_{SD}}{T_{SD}} + 1 \right), & R_{SD} \leq T_{SD} \\ 0.5 \left(1 - \frac{R_{SD} - T_{SD}}{T_{SD}} \right), & R_{SD} > T_{SD} \end{cases}, \quad (7)$$

标准差阈值 T_{SD} 由实际应用环境决定。目标节点根据每次获得的一组 RSS 值计算 RSS 标准差 R_{SD} , 并与标准差阈值 T_{SD} 进行比较, 如果标准差不超过标准差阈值, 则获得的 RSS 数据处于稳定态, 由式(7)计算 α 值, 此时 $\alpha \in (0.5, 1)$; 如果标准差大于标准差阈值, 则获得的 RSS 数据处于不稳定态, 此时 $\alpha \in (0, 0.5)$, 进而由式(4)得到 RSS 的修正值。

此外, 在协同定位算法中引入学习模型, 信标节点之间采用学习算法, 使标准差阈值 T_{SD} 具有自适应性。具体流程如下

Step 1: 信标节点广播学习帧, 等待邻居节点的应答消息帧;

Step 2: 在规定最大接收时间间隔 T_{max} 内, 如果信标节点没有收到邻居节点的应答消息帧, 则增大发射功率, 继续发送学习帧, 直到接收到应答消息帧为止; 如果信标节点收到邻居节点的应答消息帧, 转入 Step 3;

Step 3: 邻居节点 i 接收 n ($0 \leq n \leq 100$) 个学习帧, 并记录每个学习帧的 RSS 值 R_k ($k=1, \dots, n$), 计

算其均值 $R_{avg0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n R_k$, 进而得到标准差: $S_{0i} = \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (R_k - R_{avg0i})^2 \right)^{1/2}$;

Step 4: 信标节点之间通信交换 S_{0i} , 取 S_{0i} 的 50% 分位数作为新的标准差阈值, 即 $T_{SDnew} = 50\% \text{Median} \left(\sum_i S_{0i} \right)$ 。

1.3 算法描述

由于 WSN 能量受限, 三角测量法、极大似然估计等计算复杂度较高的算法不适用。协同定位算法 (cooperative localization algorithm, CLA) 定位模块采用质心算法 (centroid algorithm, CA), 质心算法将多边形质心作为节点坐标, 计算复杂度低, 能有效降低能耗。

CLA 算法引入参考信标节点的概念, 涉及 2 套坐标系之间的转换, 如图 2 所示。 xOy 是绝对坐标系, A, B, C, D 4 个信标节点的坐标分别为 (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) 、 (x_C, y_C) 、 (x_D, y_D) , 目标节点 T 的坐标为 (x_T, y_T) 。 $x'B'y'$ 是相对坐标系, 对应 4 个信标节点的坐标依次为 (x'_A, y'_A) 、 $(0, 0)$ 、 (x'_C, y'_C) 、 (x'_D, y'_D) , 目标节点 T 的坐标为 (x'_T, y'_T) 。根据坐标转换关系有 $x'_A = x_A - x_B, y'_A = y_A - y_B; x'_C = x_C - x_B, y'_C = y_C - y_B; x'_D = x_D - x_B, y'_D = y_D - y_B$ 。在获得 RSS 值后, 选择其值最小的节点作为参考信标节点, 选其为相对坐标系原点, 如图 2 中的 B 点。由式(1)~(3)可导出目标节点 T 与 A, C, D 之间的距离 d_A, d_C, d_D , 建立如下方程

$$(x'_T - x'_A)^2 + (y'_T - y'_A)^2 = d_A^2; \quad (8)$$

$$(x'_T - x'_C)^2 + (y'_T - y'_C)^2 = d_C^2; \quad (9)$$

$$(x'_T - x'_D)^2 + (y'_T - y'_D)^2 = d_D^2, \quad (10)$$

由式(8)和(9)可得: $y'_T = k_1 x'_T + b_1$, 其中

$$k_1 = \frac{(x'_C - x'_A)}{(y'_C - y'_A)},$$

$$b_1 = \frac{(d_A^2 - d_C^2 + x'_C{}^2 - x'_A{}^2 + y'_C{}^2 - y'_A{}^2)}{(2 \times (y'_C - y'_A))},$$

同理, 由式(8)和(10)可得 $y'_T = k_2 x'_T + b_2$, 其中

$$k_2 = \frac{(x'_D - x'_A)}{(y'_D - y'_A)},$$

$$b_2 = \frac{(d_A^2 - d_D^2 + x'_D{}^2 - x'_A{}^2 + y'_D{}^2 - y'_A{}^2)}{(2 \times (y'_D - y'_A))},$$

联合方程 $y'_T = k_1 x'_T + b_1$ 和 $y'_T = k_2 x'_T + b_2$, 可得

$$x'_T = \frac{(b_2 - b_1)}{(k_1 - k_2)}, y'_T = k_2 x'_T + b_2. \quad (11)$$

结合上述坐标变换关系, 即可得到 (x_T, y_T) , $x_T = x'_T + x_B, y_T = y'_T + y_B$ 。

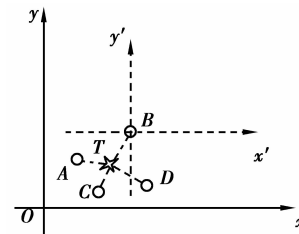


图 2 坐标系之间的关系

CLA 算法流程如下。

Step 1: 由图 1 获得 RSS 值, 选择其值最小的节点作为相对坐标系原点 B , 并得到 $A \sim D_4$ 个信标节点信息: $(x_A, y_A; d_A)$ 、 (x_B, y_B) 、 $(x_C, y_C; d_C)$ 、 $(x_D, y_D; d_D)$;

Step 2: 计算质心 $P_0(x, y)$, 有 $x = (x_A + x_B + x_C + x_D)/4, y = (y_A + y_B + y_C + y_D)/4$;

Step 3: 如果 $y'_C - y'_A \neq 0$ 且 $y'_D - y'_A \neq 0$, 则计算 k_1, k_2 , 转 Step 4; 否则以 P_0 作目标节点坐标。

Step 4: 如果 $k_1 \neq k_2$, 按照式(11)计算 $P_1(x'_T, y'_T)$, 转 Step 5; 否则以 P_0 作目标节点坐标。

Step 5: 计算 P_0 与 P_1 之间的距离 d_{01} , 如果 $d_{01} > R$, 则以 P_1 作目标节点坐标; 否则以 P_0 作目标节点坐标。

2 仿真分析

为了验证算法的性能, 在相同条件下将 CLA 算法与 CA 算法进行仿真实验对比。设置所有节点分布在 $100 \times 100 \text{ m}^2$ 区域内, 检测半径 R 为 5 m, 噪声为加性高斯白噪声。对比测试两种算法中, 信标节点比例与定位误差的关系、测量噪声方差与定位误差的关系以及随着网络节点数增加, 定位误差、节点定位覆盖率的变化情况。2 种算法中随着信标节点比例变化, 定位误差变化的关系如图 3 所示; 测量噪

声方差不同时,定位误差的变化情况如图 4 所示;网络节点数增加,定位误差、节点定位覆盖率的变化如图 5、6 所示。

应用环境不同,噪声方差的差异势必会对定位误差产生影响。图 3 中,信标节点比例为 15%,节点数为 100,噪声方差变化范围为 1~5,步长为 1。可以看出,随着噪声方差的增大,CLA 算法平均定位误差有所增加,但变化平缓,得益于 RSS 标准差阈值与狄克逊检验法的引入。此外,参考信标节点的引入也增强了算法的容错性,CLA 算法的平均误差增加速率远低于 CA 算法,且平均定位误差变化较小,在相同噪声方差下,CLA 比 CA 小 30%,算法健壮性好。

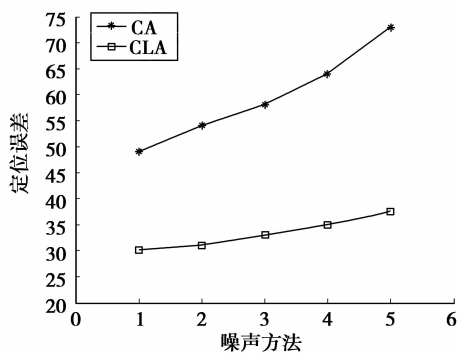


图 3 噪声方差与定位误差的关系

信标节点比例的增加,会减小定位误差。图 4 中,噪声方差为 3,节点数为 100,信标节点比例变化范围为 5%~30%,变化步长为 5%。随着信标节点比例的增加,平均定位误差下降,由于狄克逊检验法剔除了 RSS 异常值,并且 RSS 标准差阈值的引入,有效减少了 RSS 测量误差,在不同信标节点比例下,CLA 算法平均定位误差均优于 CA 算法。

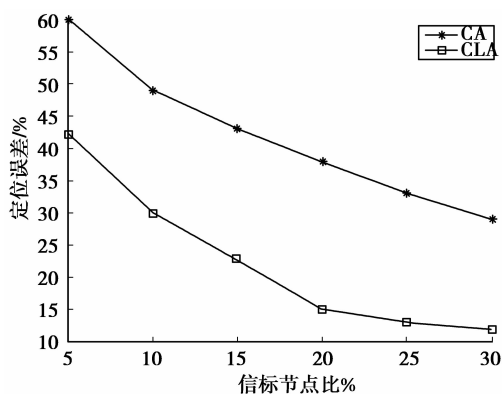


图 4 信标节点比例与定位误差的关系

网络规模会对定位误差产生影响,也是衡量定位算法的一个重要指标。图 5 给出了不同网络节点数下定位误差变化情况。信标节点比例为 30%,噪声方差为 2,网络节点数变化范围为 100~1 200,步长为 100。可以看出,CLA 算法的平均定位误差均小于 CA 算法,且网络规模的变化对平均定位误差几乎没有影响,而 CA 算法则明显出现了平均定位误差的积累效应。这是因为在 CLA 算法中引入了学习模型,网络具有自适应性,能够通过优化 RSS 标准差阈值来减小定位误差。

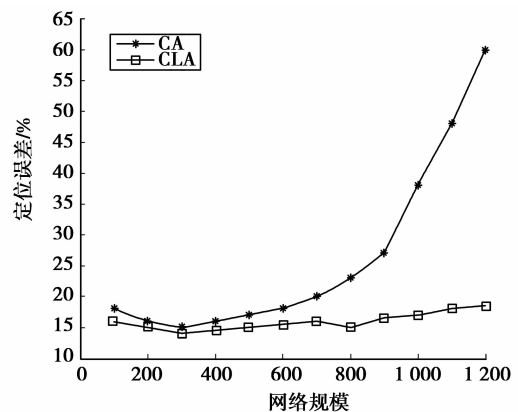


图 5 网络规模与定位误差的关系

图 6 描述了不同网络规模下节点定位覆盖率的变化,图中信标节点比例为 30%,噪声方差为 2,网络节点数变化范围为 500~1 900,步长为 100。不同网络节点数下,CLA 算法与 CA 算法的节点定位覆盖率几乎相同,且随节点数目的增加而增加。可以看出,CLA 算法的稳定性较好。

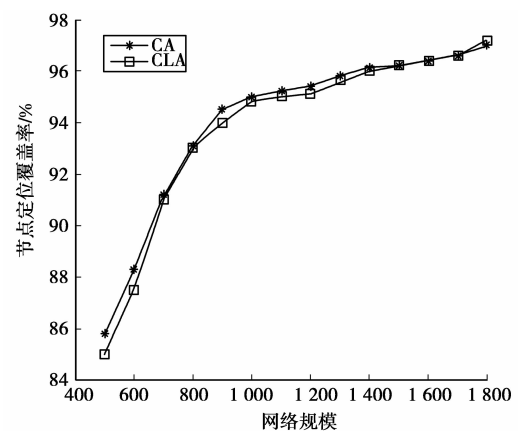


图 6 网络规模与节点定位覆盖率的关系

3 结 论

针对无线传感器网络中基于 RSS 的定位算法

存在的不足,提出了一种协同定位处理算法。一方面引入参考信标节点,增强了节点定位的容错性;另一方面采用狄克逊检验法剔除异常的 RSS 值,同时引入 RSS 标准差阈值和学习模型,从而减小了 RSS 测距误差。仿真实验表明,该算法与质心算法相比具有以下优点:适用于不同规模的无线传感器网络,定位精度能得到有效提高,并且能耗较低、健壮性和稳定性较好。

参考文献:

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] 林金朝,李小玲,刘海波. 无线传感器网络 DV-Hop 算法改进与性能[J]. 重庆大学学报,2010,32(2):127-132.
LIN Jinzhao, LI Xiaoling, LIU Haibo. Improvement and performances of DV-hop localization algorithm in wireless sensor networks [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 32(2): 127-132.
- [3] He T, Huang C D, Blum B M, et al. Range-free localization schemes for large scale sensor networks[C] // Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, September 14-19, 2003, San Diego, California. New York: ACM Press, 2003:81-95.
- [4] Li Y M, Meng M Q H, Li S, et al. Particle filtering for range-based localization in wireless sensor networks[C] // Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 25-27, 2008, Chongqing, China. Piscataway: IEEE, 2008:1629-1634.
- [5] Wang N, Shen X L. Research on WSN nodes location technology in coal mine[C] // Proceedings of IFCSTA 2009 International Forum on Computer Science-Technology and Applications, December 25-27, 2009, Chongqing, China. Piscataway: IEEE, 2009: 232-234.
- [6] Yu K, Guo Y J. Statistical NLOS identification based on AOA, TOA and signal strength [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(1): 274-286.
- [7] Li J D, Sun X Y, Huang P Y, et al. Performance analysis of active target localization using TDOA and FDOA measurements in WSN[C] // Proceedings of the 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications-Workshops, March 25-28, 2008, Okinawa, Japan. Piscataway: IEEE, 2008: 585-589.
- [8] Khauphung C, Keeratiwintakorn P, Kaemarungsi K. On robustness of centralized-based location determination using WSN[C] // Proceedings of APCC 2008 14th Asia-Pacific Conference on Communications, October 14-16, 2008, Tokyo, Japan. Piscataway: IEEE, 2008.
- [9] Noury N, Herve T, Rialle V, et al. Monitoring behavior in home using a smart fall sensor and position sensors [C] // Proceedings of the 1st Annual International Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology, October 12-14, 2000, Lyon, France. Piscataway: IEEE, 2000.
- [10] 任维政,徐连明,邹德君,等. 基于 RSSI 差分似然估计的 WSN 节点定位算法[J]. 数据采集与处理,2009,24(6): 757-761
REN Weizheng, XU Lianming, ZOU Dejun, et al. Positioning algorithm using maximum likelihood estimation of RSSI difference in wireless sensor networks [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(6): 757-761.
- [11] Kumar P, Reddy L, Varma S. Distance measurement and error estimation scheme for RSSI based localization in wireless sensor networks[C] // Proceedings of the 2009 Fifth IEEE Conference on Wireless Communication and Sensor Networks, October 15-19, 2009, Allahabad, India. Piscataway: IEEE, 2009:1-4.
- [12] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D, et al. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices [J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 28-34.
- [13] Blumenthal J, Grossmann R, Golatowski F, et al. Weighted centroid localization in zigbee-based sensor networks[C] // Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, October 3-5, 2007, Alcalá de Henares, Spain. Piscataway: IEEE, 2007: 1-6.
- [14] Chen Y J, Pan Q, Liang Y, et al. AWCL: adaptive weighted centroid target localization algorithm based on RSSI in WSN[C] // Proceedings of the 2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, July 9-11, 2010, Chengdu, China. Piscataway: IEEE, 2010, 9:331-336.
- [15] 国家标准化管理委员会. GB/T 4883-2008 数据的统计处理和解释-正态样本离群值的判断和处理[S]. 北京:中国标准出版社,2008.