

# 3D-RABLC: 一种基于 LQI 置信度的三维空间定位求精算法

舒坚<sup>1,2</sup>, 刘琳岚<sup>1,3</sup>, 陈宇斌<sup>1,2</sup>, 龚佳杰<sup>4</sup>

(1. 南昌航空大学 物联网技术研究所, 江西 南昌 330063; 2. 南昌航空大学 软件学院, 江西 南昌 330063;  
3. 南昌航空大学 信息工程学院, 江西 南昌 330063; 4. 福建星网锐捷网络有限公司, 福建 福州 350002)

**摘要:** 提出一种基于 LQI 置信度的三维空间定位求精算法(3D-RABLC)。通过大量节点实验, 获得节点间一跳 RSSI 值与距离的关系、LQI 与分组错误率的关系, 依此划分 LQI 置信度, 对测得的 RSSI 值进行过滤, 建立三维多跳求精模型或弥补求精方法对置信度低的 RSSI 值进行修正。节点实验表明, 该算法大大降低了 RSSI 测距误差, 比已有三维定位算法具有更好的定位精度。

**关键词:** 无线传感器网络; 三维空间定位; LQI 置信度; RSSI; 定位求精

中图分类号: TP393

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)07-0125-10

## 3D-RABLC: a novel refinement algorithm based on LQI confidence for three-dimensional localization

SHU Jian<sup>1,2</sup>, LIU Lin-lan<sup>1,3</sup>, CHEN Yu-bin<sup>1,2</sup>, GONG Jia-jie<sup>4</sup>

(1. Internet of Things Technology Institute, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;  
2. School of Software, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;  
3. School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;  
4. Fujian Xingwang Ruijie Networks Ltd. Co., Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** A novel refinement algorithm based on LQI confidence for three-dimensional localization (3D-RABLC) was proposed. LQI confidence was obtained in terms of the relationships between RSSI and one hop distance, LQI and packet error rate (PER), which derived from experimental data. The measured RSSI was filtered by LQI confidence. Moreover, the RSSI with lower confidence was modified by a three-dimensional multi-hop model or a compensating refinement method. The experiment results show that the algorithm reduces the RSSI range error, and improves the accuracy of three-dimensional localization significantly.

**Key words:** wireless sensor network; three-dimensional localization; LQI confidence; RSSI; location refinement

## 1 引言

无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)是一种由大规模、低功耗、能量受限的微型传感器节点自组织形成的网络<sup>[1]</sup>。在传感器网络中, 位置

信息对传感器网络的监测活动至关重要。目前, WSN 节点自身定位的研究集中在二维平面<sup>[2]</sup>, 很难直接将二维定位算法应用于三维空间, 因为三维空间的环境因素更加复杂, 节点的计算量大大增加, 求精问题的复杂度大大提高。而实际应用中, 节点

收稿日期: 2011-01-14; 修回日期: 2012-04-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60773055); 江西省科技支撑计划重点基金资助项目(2009BGA01000, 2011BBE50030)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (60773055); Jiangxi Key Technology R&D Program (2009BGA01000, 2011BBE50030)

往往被随机部署在三维空间,有些甚至是人类无法到达的恶劣环境,很难预先知道所有节点的地理位置。因此,研究高精度、低能耗、低成本的三维定位算法已成为 WSN 广泛应用和发展的迫切需要。

由于受无线传感网络节点硬件资源、能量与成本限制,基于测距的节点定位算法一般采用低成本、低能耗的基于接收信号强度指数(RSSI, received signal strength indicator)、到达时间差(TDOA, time difference of arrival)、到达时间(TOA, time of arrival)、到达角度(AOA, angle of arrival)等测距技术。因受环境干扰、节点硬件精度有限等因素的影响,这些算法所采集的数据往往包含各种误差,其中较大的测距误差是粗差(outlier)<sup>[3]</sup>,它对定位算法的精度和顽健性有较大影响。

本文介绍了无线传感器网络节点三维定位的典型成果,重点阐述了与本文相关三维定位算法的研究现状,提出一种基于链路质量指标(LQI, link quality indicator)置信度的三维空间定位求精算法(3D-RABLC, novel refinement algorithm based on LQI confidence for three-dimensional localization),节点实验验证了该算法的有效性。

## 2 相关研究

国内外在三维空间无线传感器网络节点定位方面进行了相关研究。其中较早的研究成果有 Jeffery Hightower 等人设计的 SpotON 射频电子标签定位系统<sup>[4]</sup>、Bat System 系统<sup>[5]</sup>、3D-ID 定位系统,虽然定位精度较高,因其覆盖面较小、价格昂贵,必须预先人工部署大量基站,无法实现 WSN 节点的自身定位,其中,测距方法和测距所依赖的硬件系统的设计仍然是值得借鉴的。

近年来,代表性的研究包括:文献[6]中节点通过向 2 个邻居节点发射同频率信号来确定相对位置,邻居节点接收叠加后的信号、记录复合信号的强度值、计算复合信号的相位偏移,并推算出节点之间的距离,如果有 8 个节点参与计算,就可以计算出 8 个节点之间的三维坐标相对值,仿真实验表明,该算法平均定位精度达到 3cm。

文献[7]选择离待定位节点最近的 3 个信标节点估算未知节点的位置,采用三角剖分法对三维地形进行网格划分,建立地域模型,以获得节点的三维空间坐标。仿真实验表明,其节点定位精确度较高且与网络密集性相关,但定位过程需要较多的信标

节点参与,定位成本较高,且未对获得的 RSSI 测距进行修正。

文献[8]通过移动信标节点发送超宽带(UWB, ultra-wideband)信号的方法进行测距,基于 TOA 技术获得未知节点到信标节点的距离,采用空间距离交叉法进行节点定位。仿真实验表明,该算法可获得较好的定位精度,但整个定位过程需要高精度的测距仪器,定位成本较高。

文献[9]利用未知节点与信标节点的角度关系计算位置坐标,一定程度上减小了 RSSI 测距误差。仿真实验表明,该算法比普通的基于 RSSI 测距方法在定位精度和响应时间上有了明显的改进,但在实际应用中,其角度关系难以获得,因此很难在节点上实现。

文献[10]提出一种基于球面坐标的动态定位机制,将定位问题抽象为多元线性方程组求解问题,利用克莱姆法则解决多解、无解问题,引入最小二乘法理论来估算节点位置以及结果过滤策略以减小定位误差。仿真结果表明,在网络规模一定的情况下,算法的定位精度不依赖于信标节点的密度以及通信半径,算法的通信量适中。但在实际应用中,该算法因计算复杂度较大,不易在节点上实现。

文献[11]利用多球空间相交建立了空间定位模型,结合无线信道对数距离路径衰减模型,分析了三维定位模型因误差导致的定位问题的不稳定性。提出利用 Tikhonov 正则化方法解决定位中的不稳定性问题,利用偏差原理解决最优正则参数选择问题。室内定位实验结果表明:当正则化参数 $\alpha$ 取 55 时,定位误差可以控制在 8%左右,优于经典的极大似然法。

文献[12]基于区域立体网格化表示的思想,提出一种分布式非测距三维定位算法,通过对立体网格投票,选取得票值最高的所有网格的质心作为未知节点的估计位置。仿真结果表明:在无线传播环境理想、未知节点通信半径  $R=50\text{m}$ 、所有节点均随机部署在  $100\text{m}$  三维区域的情况下,定位误差小于未知节点通信半径的 8%。

文献[13]采用三维空间抽样和范围约束的方法,并结合对成功样本点的加权筛选来获得节点的三维估计坐标。利用该方法,未知节点可以直接从采样区域获得节点三维坐标的估计,从而减少了累加误差。仿真实验表明,该算法在信标节点比例为 20%时,定位误差低于通信半径的 25%;当测距误差增大到通信

半径的 50% 时, 定位误差不超过通信半径的 35%。

Shang 等提出既可以用于基于测距定位, 也可以用于非基于测距定位的 MDS-MAP (multidimensional scaling map) 算法<sup>[4]</sup>。首先, 计算节点间最短路径距离, 使用该距离建立 MDS 矩阵, 再用经典 MDS 算法, 生成节点间相对地图, 当有 3 个或 4 个及以上个已知位置的节点(锚节点)时, 使用坐标变换, 将相对坐标转化成绝对坐标。该算法使用节点间最短路径距离代替实际几何距离, 当最短路径距离与实际距离相差较大时, 误差较大。

针对 MDS-MAP 算法的不足, 文献[15]提出一种改进的 MDS 算法, 仅使用节点间一跳距离, 并通过改进后的迭代算法求解 MDS, 使得估计的距离与节点间实际距离尽量接近。该算法降低了对网络节点的处理硬件要求, 仿真实验结果表明, 该算法在规则网络中定位误差较小, 最优情况下误差可以小于 5%, 在非规则网络中也能具有较低的定位误差, 但定位精度与整个迭代次数和信标节点个数有关。

文献[16]提出一种基于簇的三维定位算法 (CBLALS, cluster based localization algorithm for large scale wireless sensor network)。通过对待定位节点进行簇区域划分, 减少待定位节点之间多跳距离的产生, 并采用不同发射功率与三角形原理修正 RSSI 测距, 在一定程度上提高了定位精度。仿真实验比较了在未修正测距误差、修正测距误差和使用 10% 的信标节点修正测距误差情况下, CBLALS 算法的定位误差, 证明修正测距误差可提高定位的精度。但文章未对待定位节点多跳距离进行误差修正, 且采用最短路径代替实际距离, 累积的多跳误差影响定位精度。

综上所述, 目前对无线传感网络中基于测距的三维定位算法, 还停留在仿真实验阶段, 大多基于 RSSI 值的空间定位算法未对测距造成的误差进行修正。本文基于 CBLALS 算法<sup>[16]</sup>, 设计了 3D-RABLC 算法, 主要贡献如下。

1) 通过大量节点实验获得节点间一跳 RSSI 值与距离的关系、LQI 与分组错误率 (PER, packet error ratio) 的关系, 并依此划分 LQI 置信度。

2) 基于 LQI 置信度, 修正 RSSI 值。置信度高的一跳 RSSI 值, 直接参与坐标计算; 对置信度低的 RSSI 值或一跳不可达的节点, 则通过建立三维多跳求精模型进行修正或采用弥补求精方法求得

其 RSSI 值后参与坐标计算, 以减少测距误差对三维定位精度的影响。

### 3 LQI 置信度的划分

#### 3.1 相关定义

**定义 1** 设  $d'$ 、 $d$  分别为节点之间的估测距离与实际距离,  $d_{\text{error}}$  为相对测距误差, 则

$$d_{\text{error}} = \frac{|d - d'|}{d} \times 100\% \quad (1)$$

**定义 2** 设  $(X_{\text{est}}, Y_{\text{est}}, Z_{\text{est}})$ 、 $(X_{\alpha}, Y_{\alpha}, Z_{\alpha})$  分别为待定位节点的估测坐标和实际坐标,  $R$  为节点的通信半径,  $P_{\text{error}}$  为相对定位误差, 则

$$P_{\text{error}} = \frac{\sqrt{(X_{\alpha} - X_{\text{est}})^2 + (Y_{\alpha} - Y_{\text{est}})^2 + (Z_{\alpha} - Z_{\text{est}})^2}}{R} \times 100\% \quad (2)$$

**定义 3** 设传输过程中产生的错误分组数为  $n_{\text{error}}$ , 分组丢失数为  $n_{\text{loss}}$ , 探测分组总数为  $N_{\text{total}}$ , 分组错误率为  $PER$ , 则

$$PER = \frac{n_{\text{error}} + n_{\text{loss}}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \quad (3)$$

#### 3.2 建立 RSSI 信号衰减模型

在室外自由空间无障碍物的直视路径传播过程中, 对于具有单位增益、无方向性的传输天线而言, 基本电波传送损失由载波频率和距离而定, 接收信号强度 (RSS, received signal strength) 与距离之间关系如<sup>[17]</sup>

$$PL(d) = -32.44 - 20 \log f_c - 20 \log d \quad (4)$$

其中,  $f_c$  为载波频率,  $d$  为发送端与接收端的距离,  $PL(d)$  为相距  $d$  时接收端的 RSSI 信号强度。

在实际应用环境中, 由于无线信号受到各种障碍物的干扰, 温度和传播模式的影响, 电磁波传输损耗符合对数正态阴影模型, 可用修正的路径损耗模型<sup>[18]</sup>描述

$$PL(d) = PL(d_0) - 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right) - X_{\sigma} \quad (5)$$

其中,  $d_0$  为参考距离,  $n$  为通道衰减指数,  $X_{\sigma}$  是均值为零、方差为  $\sigma$  的高斯随机噪声变量,  $PL(d_0)$  为相距  $d_0$  时接收端 RSSI 信号强度。

本文假设有  $k$  个传感器节点, 接收节点  $i$  与发送节点的距离为  $d_i$ , 接收节点  $j$  与发送节点的距离为  $d_j$ , 且高斯随机噪声变量  $X_{\sigma}$  相等。由式(5)可得节

点  $i$ 、节点  $j$  的 RSSI 值分别为  $PL(d_i)$ 、 $PL(d_j)$

$$PL(d_i) = PL(d_0) - 10n \log\left(\frac{d_i}{d_0}\right) - X_\sigma \quad (6)$$

$$PL(d_j) = PL(d_0) - 10n \log\left(\frac{d_j}{d_0}\right) - X_\sigma \quad (7)$$

由式(7)减去式(6)，可得：

$$PL(d_j) - PL(d_i) = 10n \log\left(\frac{d_i}{d_j}\right) \quad (8)$$

令  $PL(d_j) - PL(d_i) = \Delta PL(d)$ ，得到  $d_i$  与  $d_j$  之间距离关系

$$d_i = 10^{\frac{\Delta PL(d)}{10n}} d_j \quad (9)$$

通道衰减指数  $n$  可通过如下公式求得

$$n = \frac{PL(d_{ij}) - PL(d_0)}{10 \log d_{ij}} \quad (10)$$

此处，设参考距离  $d_0$  为 1m， $d_{ij}$  为节点  $i$  到节点  $j$  的距离， $PL(d_{ij})$  为节点  $i$  到节点  $j$  的 RSSI 值。

### 3.3 RSSI 值与距离的关系

为获得无线传感器网络中 RSSI 值与距离的关系，本文设置不同场景、不同发射功率，进行了大量的测距实验，实验场景如图 1 所示。

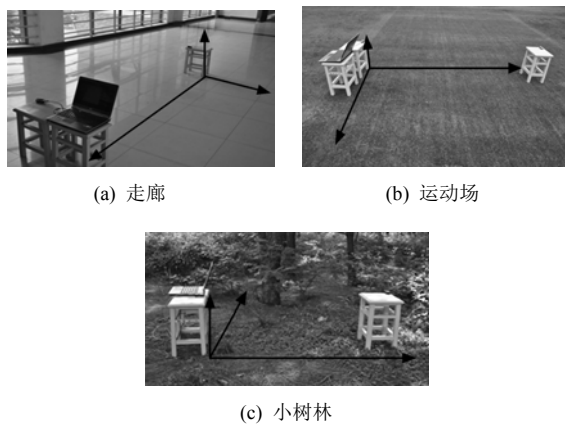
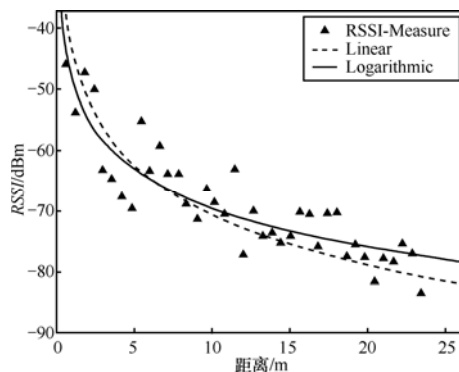
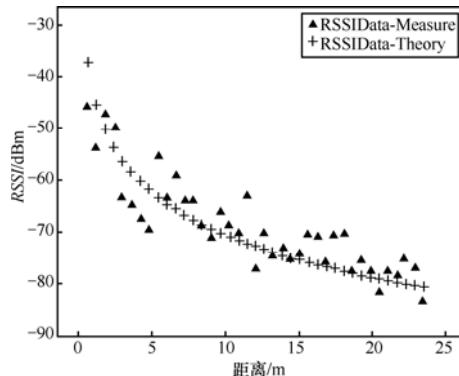


图 1 测距实验场景

实验在一对美国 Crossbow 公司的 TelosB 节点上进行，采取点对点通信方式，节点发射频率为 2.4GHz，设置其发射功率的范围为 [3, 31]<sup>[19]</sup>，即 [-25dBm, 0dBm]，动态设置发射功率并每次发送 500 个数据分组，统计了接收端的 RSSI 平均值和 LQI 平均值。测得上述不同场景下 RSSI 平均值与距离关系的拟合曲线图和散点图分别如图 2~图 4 所示。

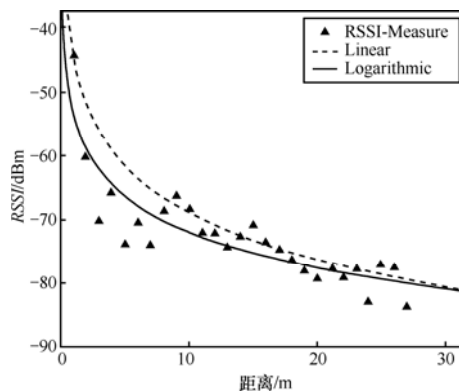


(a) 拟合曲线图

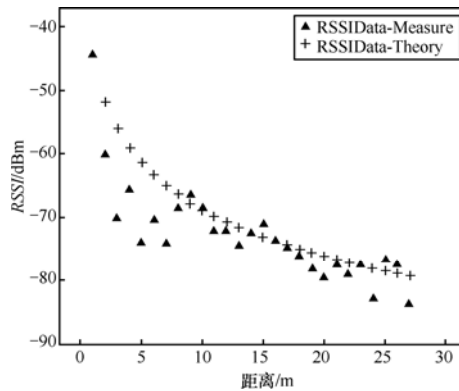


(b) 散点图

图 2 走廊实验 RSSI 值与距离关系

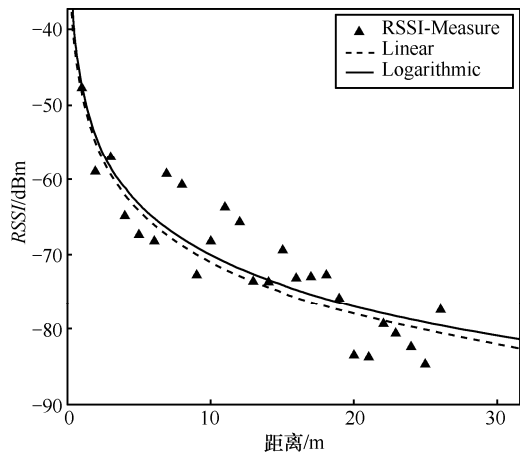


(a) 拟合曲线图

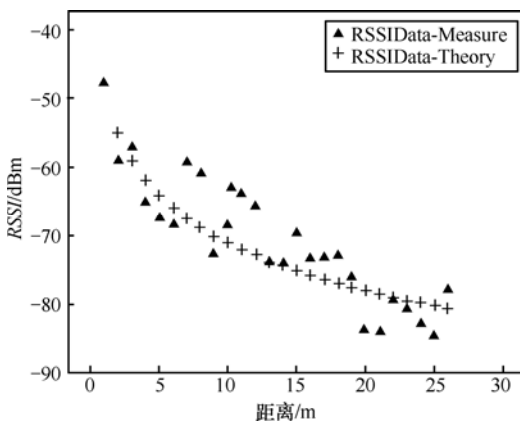


(b) 散点图

图 3 运动场实验 RSSI 值与距离关系



(a) 拟合曲线图



(b) 散点图

图 4 小树林实验 RSSI 值与距离关系

图 2~图 4 中, 拟合曲线图中的实线代表实际测得数据拟合曲线, 虚线代表理论数据曲线; 散点图中“▲”代表实际测得数据值, “+”代表理论数据值。由拟合曲线图和散点图可知: 大部分实测实验数据分布在理论数据曲线附近, RSSI 值符合经验衰减模型且拟合度较高。从实验中获得的 RSSI 平均值和 LQI 平均值中存在少数异常数据, 这些异常数据的 LQI 值一般低于 100。

通过对 3 组不同场景的实验数据进行分析, 可知不同实验环境下的通道衰减指数  $n$  值不同, 分别为 2.74、2.44 和 2.32。

上述大量的实验还证实了 RSSI 值与 LQI 值存在一定的关系, 本文参考 LQI 值对 RSSI 值进行修正。

### 3.4 LQI 值与 PER 值的关系

LQI 值为链路质量指标, 在一定程度上可作为实验环境的参考指标。为获得无线传感器网络中 LQI 值与 PER 值的关系, 本文在一对美国 Crossbow 公司的 TelosB 节点上进行了大量实验, 设置节点发射功

率为  $3(-25\text{dBm})^{[18]}$ , 采取点对点通信方式, 测试距离为 2.5m, 每 100ms 发送一个测试分组, 每次实验发送 500 个测试分组。实验过程中, 进行人为走动干扰、其他节点信号干扰、近地实验和非视距实验, 对同一距离进行测试, 测得节点 PER 值、LQI 值以及 RSSI 值, 绘出 LQI 值与 PER 值的关系如图 5 所示。

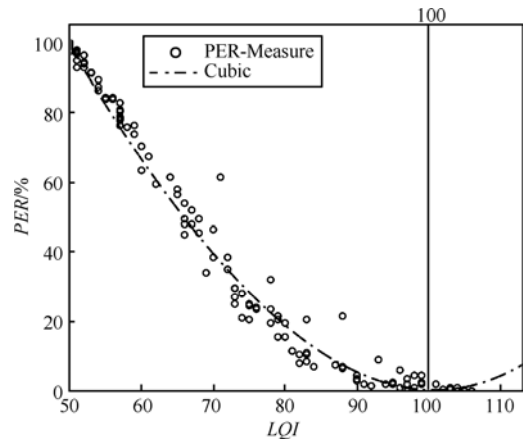


图 5 LQI 与 PER 的关系

由图 5 可知, 当  $LQI < 50$  时, PER 值接近 100%; 当 LQI 值接近 100 时, PER 值接近 0。采用社会科学统计软件 (SPSS, statistical product and service solutions) 对测得的实验数据进行拟合, 得到 PER 值随 LQI 值变化曲线如图 5 中虚线所示, 当 LQI 值接近 105 时, 拟合曲线有上扬的趋势, 主要原因是实验获得的 LQI 值小于或等于 108, 而实验中采用 SPSS 软件是针对  $50 \leq LQI \leq 110$  的整个区域进行拟合, 所以出现了上扬趋势。在本文中, 由于大量实验测得的 LQI 值小于或等于 108, 所以不考虑 LQI 值大于 108 的情况, 因此, 图中的上扬趋势不影响 LQI 值与 PER 值之间的关系。

### 3.5 LQI 置信度

使用 SPSS 软件对上述实验数据进行过滤, 得到  $LQI \geq 100$  时, RSSI 值分布情况如图 6 所示。

单样本实验			
	平均差	95%数据的置信区间	
		上	下
RSSI	58.250 000	57.162 085	59.337 915

图 6  $LQI \geq 100$  时 RSSI 值分布情况

由图 6 可知, 当  $LQI \geq 100$  时, RSSI 平均值为 58.25, 且 95%数据的置信区间分布在 [57.162 085, 59.337 915]。

当  $LQI \geq 105$  时, RSSI 值分布情况如图 7 所示。

单样本实验			
	平均差	95%数据的置信区间	
		上	下
RSSI	56.818 182	56.231 113	57.405 251

图 7  $LQI \geq 105$  时 RSSI 值分布情况

由图 7 可知, 当  $LQI \geq 105$  时, RSSI 平均值为 56.818 182, 且 95% 数据的置信区间分布在 [56.231 113, 57.405 251]。

多组实验测得当 PER 为 0 时, RSSI 值为 57dBm, 本文假设该值为理想的 RSSI 值。比较图 6 和图 7, 可以对 LQI 值的置信度区间进行如下划分: 当  $LQI \geq 105$  时, 对应 RSSI 值置信度最高; 当  $100 < LQI < 105$  值介于 100 和 105 之间时, 其对应 RSSI 值置信度较高; 当  $LQI < 100$  时, 对应 RSSI 值置信度最低。

大量实验表明, 当  $LQI \geq 105$  时, 获得的绝大部分 RSSI 值与理论值相符, 符合式(2)描述的路径损耗模型; 当  $100 < LQI < 105$  时, 获得的大部分 RSSI 值与理论值存在较大差异; 当  $LQI < 100$  时, 获得的 RSSI 粗差值更大。显然, 当  $LQI < 105$  时, 若不进行过滤除差处理, 将会严重影响定位的准确性。

## 4 3D-RABLC 算法设计

### 4.1 3D-RABLC 算法步骤

与 CBLALS 算法类似, 3D-RABLC 算法的步骤如下。

**步骤 1** 网络建簇。采用改进的 TOP-DISK 建簇算法将三维空间划分成多个独立的簇<sup>[16]</sup>。

**步骤 2** 测距。获取簇内任意 2 个节点之间一跳 RSSI 值与 LQI 值。

**步骤 3** 基于 LQI 置信度, 修正 RSSI 值。

**步骤 4** 簇内三维坐标求解。采用多维定标算法建立相异性矩阵, 并对其进行双重中心化, 然后进行矩阵分解求得簇内所有节点的相对三维坐标<sup>[16]</sup>。

**步骤 5** 全局坐标转换。通过空间向量关系, 选取簇与簇之间的 3 个或 3 个以上的中继节点, 获得其在不同簇中的坐标关系, 经坐标转换得到过渡矩阵, 最后完成全局坐标的转换, 完成三维定位过程<sup>[20]</sup>。

本文重点介绍步骤 3。

### 4.2 基于 LQI 置信度, 修正 RSSI 值

本文基于 LQI 置信度, 对获得的 RSSI 值进行过滤, 置信度高的一跳 RSSI 值直接参与坐标计算; 而对置信度低的 RSSI 值, 则采用以下方法进行修正: 认为置信度低的两节点之间一跳不可达, 与由于通信半径约束或其他原因造成不能通信的节点同等对待, 通过建立三维多跳求精模型或弥补求精方法求得该类节点间的 RSSI 值。

#### 4.2.1 问题描述

簇内两节点之间由于通信半径约束或其他原因造成其相互之间不能通信, 在簇内可能出现两节点之间一跳不可达的情况, 而不能获得 RSSI 值。目前, 多数三维定位算法采用最短距离来估算多跳节点之间的距离<sup>[14,16]</sup>, 影响节点定位的精度。本文通过建立三维多跳求精模型或弥补求精求得一跳不可达或置信度低的两节点之间的 RSSI 值。

如图 8 所示, 节点 A 与 B 之间能通信, 测得距离  $R_1$ ; 节点 B 与 C 之间也能通信, 测得距离  $R_2$ ; 节点 A 与 C 之间不能通信, 记为  $R_3$ 。

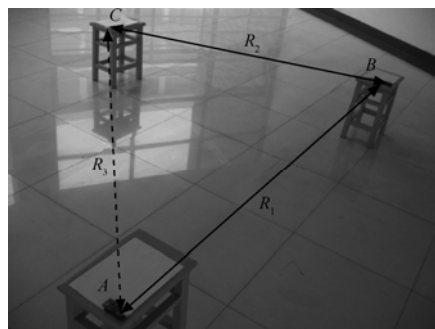


图 8 多跳节点通信示意

#### 4.2.2 建立三维多跳求精模型

本文建立的三维多跳求精模型如图 9 所示。在四面体 ABCD 中, 已知边 AB、BC、AD、BD、CD, 且  $\angle 1$  与  $\angle 2$  可以通过三角余弦定理求得。

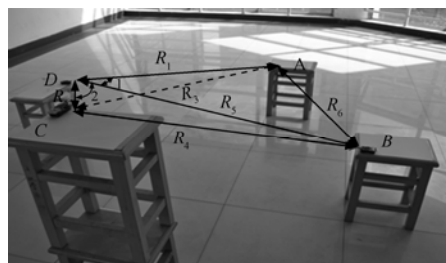


图 9 三维多跳求精示意

在三角形 ACD 中, 采用  $\angle 1$  与  $\angle 2$  之和替代  $\angle ADC$ , 其误差分析如下

$$\angle 1 + \angle 2 = \angle \delta \quad (11)$$

$$\angle \delta - \Delta\theta = \angle ADC \quad (12)$$

$$\cos(\delta - \Delta\theta) = \frac{AD^2 + CD^2 - AC^2}{2 \times AD \times CD} \quad (13)$$

$$AC^2 = AD^2 + CD^2 - 2 \times AD \times CD \times \cos(\delta - \Delta\theta) \quad (14)$$

$$AC'^2 = AD^2 + CD^2 - 2 \times AD \times CD \times \cos\delta \quad (15)$$

$$\cos(\delta - \Delta\theta) = \cos\delta \cos\Delta\theta + \sin\delta \sin\Delta\theta \quad (16)$$

由式(11)~式(16)可知: 当 $\Delta\theta$ 越来越小时,  $\angle\delta$ 与 $\angle ADC$ 无限接近, 且 $AC'$ 与 $AC$ 之间的误差逐渐变小; 当 $AD$ 与 $CD$ 之间的乘积较小时, 其误差较小。所以, 在估算三维空间多跳节点之间距离时, 可择优选取三角形中两边乘积最小值作为参考。

如图 9 所示, 在三角形  $ACD$  与三角形  $ABC$  中, 对  $AC$  距离进行估算时, 若  $AB$  边与  $BC$  边之间乘积大于  $AD$  边与  $CD$  边之间的乘积, 则优先考虑在三角形  $ABC$  中对  $AC$  边进行三角余弦求解; 否则, 在三角形  $ACD$  中求解  $AC$  距离。

将三维多跳求精模型进行推广, 在簇内引入更多的参考节点进行三维多跳求精建模, 则可获得更多的三角形参考样本, 以降低多跳距离之间的误差估计。

数学模型表达式如下

$$l = \{(b_i \times c_i)_{\min} | b_i, c_i \in S_{\Delta i}, i \in N\} \quad (17)$$

其中,  $b_i$ 、 $c_i$  分别表示三角形  $S_{\Delta i}$  中  $AB$ 、 $BC$  边长,  $l$  为所求最小乘积。

由式(14)、式(15)对其进行期望值求解

$$\begin{aligned} & E(AC^2 - AC'^2) \\ &= E(2 \times AD \times CD \times (\cos\delta - \cos(\delta - \theta))) \\ &= E\left(4 \times AD \times CD \times \sin\frac{2\delta - \theta}{2} \times \sin\frac{\delta}{2}\right) \end{aligned} \quad (18)$$

令  $AD \times CD = l$ , 可得

$$E(AC^2 - AC'^2) \leq 4 \times l \quad (19)$$

可见,  $E(AC^2 - AC'^2)$  具有上界, 其最大期望值  $E_{\max}(AC^2 - AC'^2)$  由  $l$  决定,  $l$  可由式(17)得到。

### 4.2.3 弥补求精

如不能构建图 9 所示的三维多跳求精模型, 那么对  $A$  与  $C$  之间不能通信、 $A$  与  $C$  之间测得的 RSSI 值被过滤 2 种情况要进行不同处理。

#### 1) $A$ 与 $C$ 之间不能通信

如图 8 所示, 结合半径约束条件与三角形法则, 通过获得样本中最大 RSSI 值 (距离记为  $r$ )、节点  $A$  到  $B$  的 RSSI 值 (距离记为  $R_1$ )、节点  $B$  到  $C$  的 RSSI 值 (距离记为  $R_2$ ), 估算节点  $A$  到  $C$  的 RSSI 值 (距离记为  $R_3$ )

$$R_3 = \frac{r + (R_1 + R_2)}{2} \quad (20)$$

其中,  $r$  为样本空间中最大 RSSI 值所对应的距离。

#### 2) $A$ 与 $C$ 之间测得的 RSSI 值被过滤

如图 10 所示,  $A$  与  $C$  能通信, 记为  $R_3$ , 根据 LQI 置信度可分为如下。

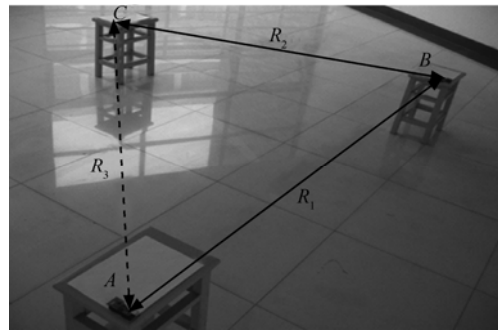


图 10 单跳节点通信示意

当  $LQI < 100$  时, 依据三角形法则中“两边之差小于第三边”, 并结合  $R_3$  与通信半径约束条件进行估算

$$R_3' = \frac{|R_1 - R_2| + R_3 + r}{3} \quad (21)$$

其中,  $R_3'$  为  $A$  到  $C$  之间的估计距离,  $r$  为样本空间中最大 RSSI 值对应的距离。

当  $100 \leq LQI < 105$  时, 观察  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  是否满足三角形三边法则。若满足, 则认为  $A$ 、 $C$  之间的通信距离为  $R_3$ ; 若不满足, 则采用式(21) 估计  $A$ 、 $C$  之间的距离。

## 5 3D-RABLC 算法实验与结果分析

通过节点实验验证 3D-RABLC 算法, 实验环境描述如下: 15 个美国 Crossbow 公司的 TelosB 节点和一台笔记本电脑, 节点 ID 号分别为 1~15, 按预先设置位置分布在  $15\text{m} \times 10\text{m} \times 3\text{m}$  的空间区域, 记录其相对坐标, 15 个节点中有 3 个信标节点 (ID 分别为 1、2、3), 相对距离均为 1m, 设置节点发射功率为  $7(-15\text{dBm})$ <sup>[18]</sup>。

走廊三维定位实验场景如图 11 所示。

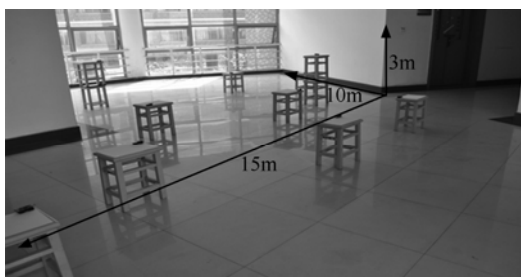


图 11 走廊三维定位实验场景

如图 11 所示，每个凳子上放置一个 TelosB 节点，节点之间通过发送定位探测分组获得 RSSI 值，每个待定位节点都按照 ID 序号依次发送定位探测分组。实验共进行了 20 组，取 RSSI 平均值和 LQI 平均值，根据 LQI 置信度对 RSSI 值进行过滤除差，并进行修正，得到测距误差如表 1 所示。

节点对 ID	修正前测距误差	修正后测距误差
4~10	124.75%	34.56%
4~13	114.45%	9.83%
5~10	340.28%	99.54%
5~12	119.56%	80.62%
6~10	248.85%	60.39%
6~13	113.18%	113.18%
6~14	133.81%	53.53%
10~11	105.23%	2.65%
10~13	104.43%	28.69%
12~15	131.25%	46.07%
13~14	447.98%	4.31%
13~15	218.66%	61.31%
平均值	185.85%	52.46%

通过与理论值对比，144 组 RSSI 值中，20% 的数据出现异常，其中能检测到的异常数据占整个异常数据的 30% 左右。“修正前测距误差”平均值为 185.85%， “修正后测距误差”平均值为 52.46%。可见，本文方法大大降低了节点之间的测距误差。

本实验中，通过信标节点计算得到通道衰减指数  $n$  为 2.32。

从表 1 中不难发现：经过修正后，多数测距误差明显降低，但存在个别未降低情况，如节点 6~13 之间。分析其原因：依据 LQI 置信度对初次测得的

节点 6~13 之间 RSSI 值进行过滤，无法构建三维多跳求精模型，而其 LQI 值介乎 100~105 之间处于较高置信度，且满足三角形三边法则，修正前、后值相同。

修正后的测距仍然存在误差的原因如下。

- 1) 实验环境对 RSSI 信号影响。
- 2) RSSI 采样数据中有部分 RSSI 值被过滤，且在弥补求精过程中，未得到有效的修正。
- 3) 信号衰减指数  $n$  值的合理性。

本文着重分析第 2) 点。对于被过滤的部分 RSSI 值，本文采用建立三维多跳求精模型或弥补求精的方法，处理过程如图 12 所示。

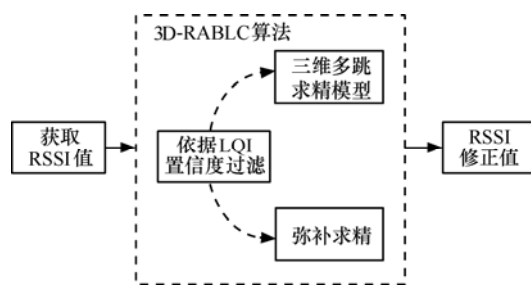


图 12 RSSI 值修正过程示意

假设同一区域范围内，对应的环境衰减指数  $n$  值相同。采用 3D-RABLC 算法进行节点的三维定位，在获取节点间 RSSI 值时，误差就已经存在，依据 LQI 置信度过滤，对 RSSI 值进行筛选；然后对过滤的 RSSI 值、多跳节点之间距离建立三维多跳求精模型，依据三维多跳求精推广方法找到最大参考样本，采取两边乘积最小优化原理，获取最优值。在处理过程中，误差并没有消除，但得到了有效的优化；弥补求精过程中，根据 LQI 置信度划分处理，并基于三角形三边原理与通信半径约束条件进行均值估算，其误差主要来源于引入的通信半径及均值处理的方法。在实际处理中，其误差相对原始样本值也得到有效降低。

采用本文算法对 RSSI 值进行修正后，后台采用 MDS 算法<sup>[14]</sup>求解簇内三维坐标，再进行全局坐标转换<sup>[13]</sup>，计算得到待定位节点的三维坐标，并与 MDS-MAP 算法、改进的 MDS 算法进行比较，实验结果如图 13 所示。

由图 13 可见，ID 为 1、2、3 的节点为信标节点；与不进行 RSSI 值修正的 MDS-MAP 算法、改进的 MDS 算法相比，采用 3D-RABLC 算法时大部分节点相对定位误差较小，但存在少数相对定位误

差较大的异常节点。ID 为 13 的待定位节点, 其相对定位误差较大, 分析表 1 可知, 13 号节点与其他待定位节点相比, 出现的修正次数较多, 误差相对较大。

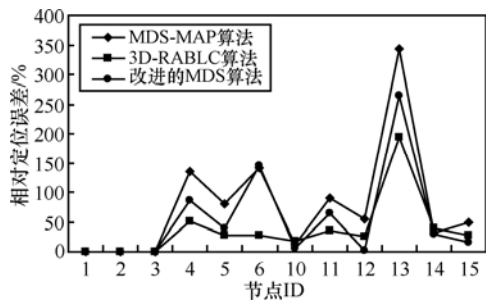


图 13 走廊三维定位误差分析

小树林中三维定位实验场景如图 14 所示。



图 14 小树林中三维定位实验场景

如图 14 所示, 每张凳子上放置一个 TelosB 节点, 草地上放置 2 个 TelosB 节点, 其 ID 分别为 17、18, 实验结果如图 15 所示。

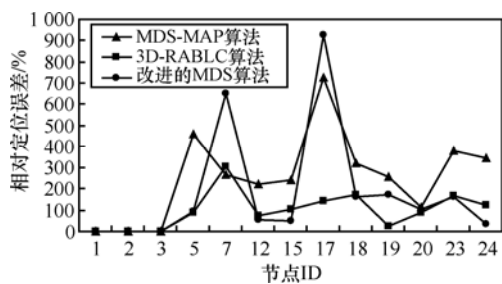


图 15 小树林中三维定位误差分析

由图 15 可见, MDS-MAP 算法、改进的 MDS 算法的相对定位误差较大。如节点 17 误差高达 900% 以上, 这主要是因为近地效应, 造成节点 RSSI 信号受到严重干扰, 粗差非常大; 而采用 3D-RABLC 算法, 可以很好地修正粗差, 节点 17 的定位误差降低到 150%, 其他节点的定位误差也

有不同程度的降低。

### 6 结束语

本文提出 3D-RABLC 算法, 引入 LQI 置信度对 RSSI 的测量值进行修正, 即依据 LQI 置信度过滤 RSSI 值, 建立三维多跳求精模型或弥补求精修正 RSSI 值, 并最终在不同场景下进行节点定位实验。实际实验表明, 本文算法有效地降低了 RSSI 测距误差, 较大程度地提高了三维定位精度。在未来的工作中, 将考虑对三维定位坐标进一步求精, 以及对定位误差的 Cramer-Rao 下界分析。

### 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.  
SUN L M, LI J Z, CHEN Y, et al. Wireless Sensor Networks[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [2] 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.  
WANG F B, SHI L, REN F Y. Self-localization systems and algorithms for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2005, 16(5): 857-868.
- [3] WHITEHOUSE K, KARLOF C, WOO A, et al. The effects of ranging noise on multihop localization: an empirical study[A]. Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks[C]. Los Angeles, California, USA, 2005.73-80.
- [4] JEFFREY H, GAETANO B, ROY W. SpotON: an Indoor 3D Localization Sensing Technology Based on RF Signal Strength[R]. UW CSE, 2000.1-5.
- [5] HARTER A. Distributed location system for the active office[J]. IEEE Network, 1994,8(1):62-70.
- [6] MIKLÓS M P, VÖLGYESI S D. Radio interferometric geolocation[A]. Conference on Embedded Networked Sensor Systems Archive Proceedings of the 3rd International[C]. San Diego, California, USA, 2008.798-806.
- [7] ABDELSALAM H S, OLARIU S. A 3D-localization and terrain modeling technique for wireless sensor networks[A]. FOWANC'09 Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Foundations of Wireless Ad Hoc and Sensor Networking and Computing[C]. New York, NY, USA, 2009.
- [8] SHI Q, HUO H, FANG T, et al. A 3D node Localization scheme for wireless sensor networks[J]. IEICE Electronics Express, 2009, 6(3): 167-172.
- [9] 周艳, 李海成. 基于 RSSI 无线传感器网络空间定位算法[J]. 通信学报, 2009, 30(6):75-79.  
ZHOU Y, LI H C. Space localization algorithm based RSSI in wireless

- sensor networks[J]. Journal on Communications, 2009, 30(6):75-79.
- [10] 戴桂兰, 赵冲冲, 邱岩. 一种基于球面坐标的无线传感器网络三维定位机制[J]. 电子学报, 2008, 36(7):1297-1303.  
DAI G L, ZHAO C C, QIU Y. Localization scheme based on sphere for wireless sensor network in 3D[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7):1297-1303.
- [11] 王雷, 秦念庆, 杜晓通等. 基于 Tikhonov 正则化方法的 WSN 空间定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4):770-775.  
WANG L, QIN N Q, DU X T, *et al.* WSN 3D localization algorithm based on Tikhonov regularization method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010,31(4):770-775.
- [12] 王德华, 邢建平, 张军. 无线传感网的分布式非测距三维定位算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(2):206-209.  
WANG D H, XING J P, ZHANG J. Distributed range-free localization algorithm in wireless sensor networks for 3D space[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(2):206-209.
- [13] 于宁, 万江文, 马万兴. 无线传感网络三维抽样定位[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(3):13-18.  
YU N, WAN J W, MA W X. Sampling based three-dimensional localization algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(3):13-18.
- [14] SHANG Y, RUMMLER W, ZHANG Y, *et al.* Localization from connectivity in sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2004, 15 (11):961-974.
- [15] 陈万明, 梅涛, 孟庆虎等. 无线传感器网络中一种基于多维定标的迭代定位算法[J]. 传感技术学报, 2007, 5(20):1124-1128.  
CHEN W M, MEI T, MENG Q H, *et al.* An iterative localization algorithm based on multidimensional scaling technique in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 5(20): 1124-1128.
- [16] SHU J, ZHANG R L, LIU L L, *et al.* Cluster-based three-dimensional localization algorithm for large scale wireless sensor networks[J]. Journal of Computers, 2009, 4(7): 585-592.
- [17] 周文安, 付秀花, 王志辉. 无线通信原理与应用(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
ZHOU W A, FU X H, WANG Z H. Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [18] CC2420 Datasheet [EB/OL]. <http://www.datasheet5.com/DataSheet5-PDF/CC2420.html>, 2008.
- [19] CHEN M Q. On the Channel Correlation of an MC-CDMA System over Weibull Fading [D]. DaYeh University, 1996.
- [20] SHU J, GONG J J, CHEN Y B, *et al.* BR2OM: RSSI-based refinement and optimization mechanism for wireless sensor networks[J]. Journal of Networks, 2009, 4(10):1017-1025.

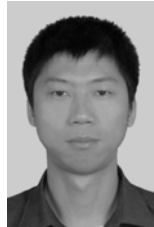
#### 作者简介:



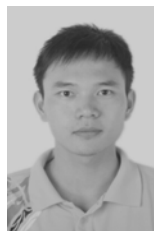
舒坚(1964-), 男, 江西靖安人, 南昌航空大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感网络、嵌入式系统、软件工程。



刘琳岚(1968-), 女, 湖南东安人, 南昌航空大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感网络、软件工程。



陈宇斌(1977-), 男, 江西南昌人, 南昌航空大学讲师, 主要研究方向为无线传感网络、嵌入式系统。



龚佳杰(1987-), 男, 湖南常德人, 福建星网锐捷网络有限公司嵌入式软件开发工程师, 主要研究方向为计算机网络。