

## 基于蓝牙 RSSI 的贝叶斯区域判别定位算法

彭 昊<sup>a</sup>, 彭 敏<sup>b</sup>, 安 宁<sup>b</sup>, 周清峰<sup>b</sup>

(合肥工业大学 a. 工业与装备技术研究院; b. 计算机与信息学院, 合肥 230009)

**摘 要:** 传统基于接收信号强度指示(RSSI)的多点定位方法定位精度较低,稳定性较差。为此,提出一种基于蓝牙 RSSI 的区域判别定位算法。对 RSSI 信号建立区域判别模型并构建不同区域的 RSSI 向量组,通过贝叶斯估计分析对 RSSI 强度测距求加权值,判别接收到 RSSI 时的精确区域并选用该区域的 RSSI 向量进行多点质心定位。实验结果表明,在可信度为 95% 的线性拟合条件下,该算法的区域定位准确度达 90.63%,平均定位误差低至 0.897 m。

**关键词:** 接收信号强度指示;线性拟合;区域定位;贝叶斯估计;多点定位

**中文引用格式:** 彭昊,彭敏,安宁,等. 基于蓝牙 RSSI 的贝叶斯区域判别定位算法[J]. 计算机工程,2019,45(3):125-131,137.

**英文引用格式:** PENG Hao, PENG Min, AN Ning, et al. Bayesian region discriminant location algorithm based on Bluetooth RSSI[J]. Computer Engineering, 2019, 45(3):125-131,137.

## Bayesian Region Discriminant Location Algorithm Based on Bluetooth RSSI

PENG Hao<sup>a</sup>, PENG Min<sup>b</sup>, AN Ning<sup>b</sup>, ZHOU Qingfeng<sup>b</sup>

(a. Institute of Industry and Equipment Technology; b. School of Computer and Information,  
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**【Abstract】** The traditional multi-point location method based on Received Signal Strength Indication(RSSI) has low positioning accuracy and poor stability. To solve this problem, a region discriminant location algorithm based on Bluetooth RSSI is proposed. The RSSI vectors of different regions are constructed after the region discriminant model of RSSI signals is established. The weighted value of RSSI intensity ranging is calculated by Bayesian estimation and analysis. The precise region when RSSI signals are received is discriminated and the RSSI vectors of the region are selected for multi-point centroid location. Experimental results show that the accuracy of the proposed algorithm can reach 90.63%, and the average positioning error can be as low as 0.897 m under the condition of linear fitting with 95% credibility.

**【Key words】** Received Signal Strength Indication(RSSI); linear fitting; region location; Bayesian estimation; multi-point location

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0049839

### 0 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由大量传感器节点组成、以无线方式进行通信的自组织网络<sup>[1]</sup>。定位是 WSN 应用的关键技术之一<sup>[2]</sup>,室内定位系统广泛应用于博物馆、图书馆或超市等室内场景,以实现对人员、商品或展品的精确定位。

目前,已有较多室内定位技术被提出,其中的典型代表有接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)测距、到达时间(Time of Advent, TOA)或到达时差(Time Difference of Arrival, TDOA)测距、到达角(Angle of Arrival, AOA)测距等<sup>[3]</sup>。相较于其他测距方法, RSSI 定位基于 WSN 中接收器接收到的信号强度,通过信号衰减模型估

计接收器与发射器之间的距离,其具有硬件成本低、易于实现等优点。但在实际应用中,受多径效应、测量方向等因素影响, RSSI 定位技术测得的结果准确度较低。文献[4]提出一种基于贝叶斯估计和高斯滤波处理的 RSSI 室内定位算法,但其运算较复杂且测量过程过长,不利于实际运用。文献[5]采集信号的离线特征然后进行测试匹配,并提出一种改进的基于贝叶斯的位置指纹算法。文献[6]提出一种基于 RSSI 深相似域高斯拟合的室内定位算法,对不同信号强度进行高斯拟合并定位。文献[7]阐述一种基于 RSSI 的 WSN 空间定位算法,其计算未知节点相对于锚节点的定点角度并用于定位估计。文献[8]提出一种基于区域划分的 RSSI 定位方法,该方法先利用信号强度对区域进行划分,再对信号指

**基金项目:** 国家自然科学基金(61601164, 61471156); 广东省科技规划项目(2016B010108002); 佛山市科技创新项目(2015IT100095)。

**作者简介:** 彭 昊(1993—),男,硕士研究生,主研方向为分布式实时系统;彭 敏,博士;安 宁、周清峰,教授、博士生导师。

**收稿日期:** 2017-12-25 **修回日期:** 2018-02-11 **E-mail:** pengmin@hfut.edu.cn

纹数据库匹配移动设备位置。文献[9]提出一种基于信号强度的 WIFI 室内定位方法,通过训练信号模型计算误差的概率分布。文献[10]布置多个蓝牙信号发射器以构建室内蓝牙指纹,通过贝叶斯估计评估在信号强度下定位的概率分布。文献[11]提出一种贝叶斯融合估计定位方法,用以构建室内信号强度的指纹定位地图。

为降低直接处理 RSSI 并进行定位所引起的误差,本文基于贝叶斯估计与统计推断理论<sup>[12-14]</sup>,在接收器接收到信号强度时,根据 RSSI 区域定位模型得到区域信息与可信度,在此基础上,提出一种蓝牙区域判别定位算法,以判别精确区域与位置信息。

## 1 RSSI 测距定位原理

### 1.1 RSSI 测距

RSSI 测距的原理是:基于无线信号传输中普遍采用的信号随距离变化的渐变模型,即随着距离的增加信号有规律的衰减<sup>[15]</sup>,在检测 WSN 中已知节点的信号强度时,根据采样信号构建信号衰减数学模型,将测量过程中的 RSSI 转换成距离,最终计算测量点的位置。本文采用对数距离路径损耗模型进行建模,如下:

$$Pl(d) = Pl(d_0) + 10n \lg(d/d_0) + X_\sigma \quad (1)$$

其中, $Pl(d)$ 和 $Pl(d_0)$ 为未知节点在距离为 $d$ 和 $d_0$ 时对应的接收信号功率(单位为 dBm), $X_\sigma$ 表示标准偏差为 $\sigma$ 的正态随机变量, $\sigma$ 的取值与信号跳变程度有关。在实验室环境中,由于多径、障碍物、绕射等多方面原因,需采用线性回归的方法来拟合距离与信号强度的关系。线性拟合模型如下:

$$p(d) = A - 10n \lg(d) \quad (2)$$

其中, $A$ 为相距 1 m 时便携设备接收到的无线信号强度的 RSSI 值, $n$ 为环境干扰系数。为便于表达,通常取 $d$ 为 1 m。在实验室环境中,通过改变测量设备的方向或移动测量设备的距离,再经过线性拟合,可得出距离衰减模型,如图 1 所示。

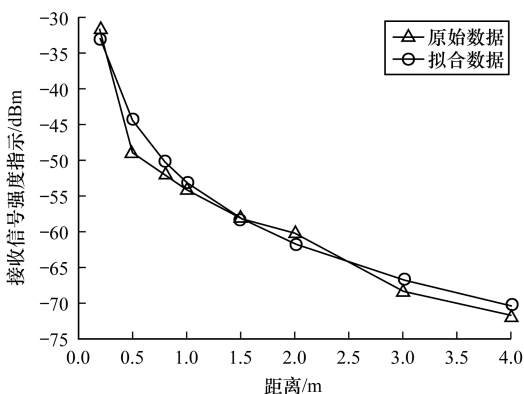


图 1 距离衰减模型

根据拟合结果可知,在置信度为 95% 的拟合条件下, $10n = -28.68$ , $A = -53.03$ ,即拟合的 RSSI-距离模型如下:

$$RSSI = -53.03 - 28.68 \lg(d) \quad (3)$$

由图 1 可以看出,信号强度衰减模型拟合值趋近于实际值,模型近似服从对数分布模型。图 2 所示为由图 1 信号强度衰减模型计算得到的距离与实际距离的误差折线关系。由图 2 可以看出,随着距离的增大,拟合结果与实际值的误差先减小后增大。当测量距离较小时,接收的 RSSI 值较大,随着距离的增加,多径干扰的外界环境影响逐渐增大,信号强度逐渐减弱,即信号具有不稳定性。综上,在测量 RSSI 值时,测量均值与信号衰减模型相符,但距离较远时单次测试 RSSI 值具有较大的跳变性。

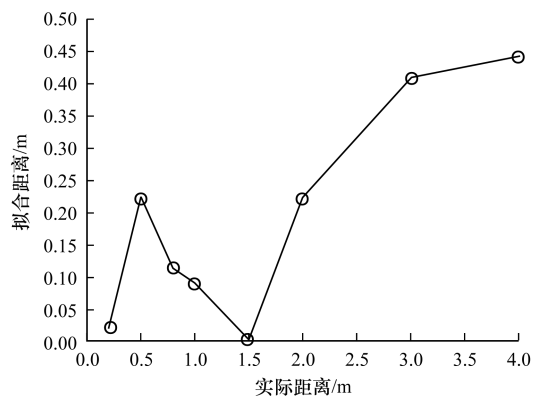


图 2 拟合误差折线图

### 1.2 最小二乘定位测量法

在实际定位中,常采用最小二乘定位算法,如图 3 所示。基于上述 RSSI 测距的基本原理,在一个定位区域内放置 A、B、C 三个信号发射点, $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$  分别为 A、B、C 三点的坐标, $S_A$ 、 $S_B$ 、 $S_C$  为接收到的来自 A、B、C 的信号, $D$  为接收点, $(x, y)$  为待求的 D 点坐标。

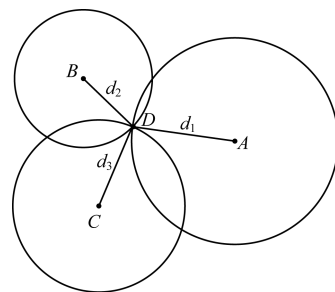


图 3 三点最小二乘定位示意图

$d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  的计算公式如下:

$$d_i = 10^{(A - RSSI)/10n}, i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

当接收到的蓝牙广播设备数量  $m = 3$  时,三点定位算法表达式如下:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = d_2^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)为非线性方程组, 简化后可得线性方程组  $AX = b$ , 其中,  $X = [x, y]^T$ 。经过求解式(6)可以得到  $D$  点的坐标  $(x, y)$ :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2(x_1 - x_3) & 2(y_1 - y_3) \\ 2(x_2 - x_3) & 2(y_2 - y_3) \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2 + d_3^2 - d_1^2 \\ x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2 + d_3^2 - d_2^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

### 1.3 改进的四点质心定位算法

在实际测量过程中, 由于 RSSI 的测量具有不稳定性, 通过信号衰减模型求得的距离公式相较真实距离会存在一定的误差, 运用最小二乘定位算法求得的测量点坐标会有相应的定位漂移<sup>[16]</sup>。为解决该问题, 本文采用四点质心定位算法来减小相应误差<sup>[17]</sup>。

如图4所示, 四点质心定位算法是在信号接收器接收到信息后, 选取这些相邻交点的质心作为该未知接收点的估计位置, 即质心定位接收到一定的数量后, 确定接收点位置为信号发射器组成的多边形的质心。在图4中,  $A, B, C, D$  四点为信号发射点, 也为圆心,  $(x_A, y_A), (x_B, y_B), (x_C, y_C), (x_D, y_D)$  分别为  $A, B, C, D$  四点的坐标,  $S_A, S_B, S_C, S_D$  为接收到的来自  $A, B, C, D$  的信号,  $I$  为信号接收点,  $(x, y)$  为待求的信号接收点  $I$  的坐标。  $d_1, d_2, d_3, d_4$  的计算过程如式(4)所示。  $E, F, G, H$  为4个圆两两的交点, 其中,  $E$  点坐标  $(x_E, y_E)$  为  $D, C$  两个圆的交点, 该坐标的计算如式(7)所示。

$$\begin{cases} (x_D - x_E)^2 + (y_D - y_E)^2 = d_4^2 \\ (x_C - x_E)^2 + (y_C - y_E)^2 = d_3^2 \\ (x_B - x_E)^2 + (y_B - y_E)^2 \leq d_2^2 \\ (x_A - x_E)^2 + (y_A - y_E)^2 \leq d_1^2 \end{cases} \quad (7)$$

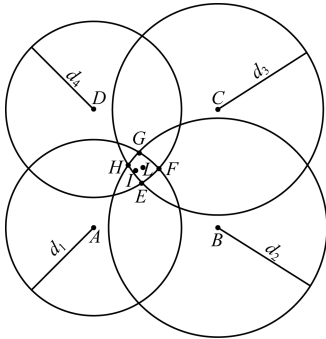


图4 四点质心定位算法示意图

根据上述原理可以计算得到其他的圆交点坐标  $F(x_F, y_F), G(x_G, y_G), H(x_H, y_H)$ , 并通过式(8)求得

$E, F, G, H$  四点的质心  $L$  的坐标  $(x_L, y_L)$ :

$$(x_L, y_L) = \left( \frac{x_E + x_F + x_G + x_H}{4}, \frac{y_E + y_F + y_G + y_H}{4} \right) \quad (8)$$

圆的半径由信号衰减模型求得, 因此, 存在信号跳变导致的系统误差。针对该问题, 本文提出一种改进的四点定位方法。为符合实际工程应用的需要, 取  $A, B, C, D$  四个信号发射点构成一个边长为  $d$  的正方形, 分以下5种情况进行讨论:

1) 如图5所示, 接收器所在位置为  $I$ , 且满足  $d_1 + d_2 < d, d_2 + d_3 < d, d_3 + d_4 < d, d_1 + d_4 < d$ , 即按信号衰减模型计算得到半径构成的圆之间没有交点。在这种情况下, 取圆心  $A, B, C, D$  构成的对角线与圆的交点  $E, F, G, H$  四点, 并计算  $E, F, G, H$  的质心  $L$  的坐标作为接收器的定位坐标, 如式(9)所示。

$$\begin{cases} (x_E, y_E) = (x_A + d_1 \cos 45^\circ, y_A + d_1 \cos 45^\circ) \\ (x_F, y_F) = (x_B - d_2 \cos 45^\circ, y_B + d_2 \cos 45^\circ) \\ (x_G, y_G) = (x_C - d_3 \cos 45^\circ, y_C - d_3 \cos 45^\circ) \\ (x_H, y_H) = (x_D + d_4 \cos 45^\circ, y_D - d_4 \cos 45^\circ) \end{cases} \quad (9)$$

$$(x_L, y_L) = \left( \frac{x_E + x_F + x_G + x_H}{4}, \frac{y_E + y_F + y_G + y_H}{4} \right)$$

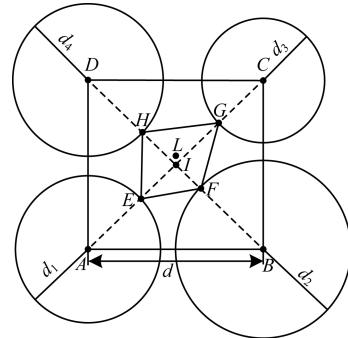


图5 改进的质心定位算法示意图1

2) 如图6所示, 接收器所在位置为  $I$ , 且满足  $d_1 + d_2 < d, d_2 + d_3 < d, d_3 + d_4 > d, d_1 + d_4 < d$ , 即按信号衰减模型计算得到的半径构成的圆之间存在交点  $G$ , 取无交点的发射器的相对圆心对角线与圆的交点为  $E, F$  两点, 定位点  $L$  的坐标为  $E, F, G$  三点的质心坐标, 如式(10)所示。

$$\begin{cases} (x_E, y_E) = (x_A + d_1 \cos 45^\circ, y_A + d_1 \cos 45^\circ) \\ (x_F, y_F) = (x_B - d_2 \cos 45^\circ, y_B + d_2 \cos 45^\circ) \\ (x_G - x_D)^2 + (y_G - y_D)^2 = d_4^2 \\ (x_G - x_C)^2 + (y_G - y_C)^2 = d_3^2 \\ \min(d_{GA} + d_{GB}) \end{cases}$$

$$(x_L, y_L) = \left( \frac{x_E + x_F + x_G}{3}, \frac{y_E + y_F + y_G}{3} \right) \quad (10)$$

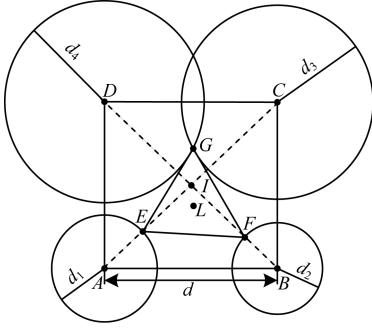


图 6 改进的质心定位算法示意图 2

3) 如图 7 所示,接收器所在位置为  $I$ ,且满足  $d_1 + d_2 < d, d_2 + d_3 < d, d_3 + d_4 > d, d_1 + d_4 > d$ ,即按信号衰减模型计算得到半径构成的圆之间存在交点  $E, G$ ,取无交点的发射器的相对圆心对角线与圆的交点为  $F$  点,定位点  $L$  的坐标为  $E, F, G$  三点的质心坐标,如式(11)所示。

$$\begin{cases} (x_E - x_D)^2 + (y_E - y_D)^2 = d_4^2 \\ (x_E - x_A)^2 + (y_E - y_A)^2 = d_1^2 \\ \min(d_{EC} + d_{EB}) \end{cases}$$

$$(x_F, y_F) = (x_B - d_2 \cos 45^\circ, y_B + d_2 \cos 45^\circ)$$

$$\begin{cases} (x_G - x_D)^2 + (y_G - y_D)^2 = d_4^2 \\ (x_G - x_C)^2 + (y_G - y_C)^2 = d_3^2 \\ \min(d_{GA} + d_{GB}) \end{cases}$$

$$(x_L, y_L) = \left( \frac{x_E + x_F + x_G}{3}, \frac{y_E + y_F + y_G}{3} \right) \quad (11)$$

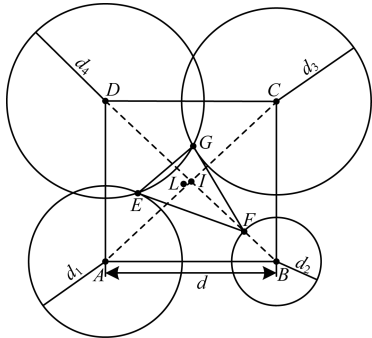


图 7 改进的质心定位算法示意图 3

4) 如图 8 所示,接收器所在位置为  $I$ ,且满足  $d_1 + d_2 > d, d_2 + d_3 < d, d_3 + d_4 > d, d_1 + d_4 > d$ ,即按信号衰减模型计算得到的半径构成的圆之间存在交点  $E, F, G, H$ ,定位点  $L$  的坐标为四点的质心坐标,如式(12)所示。

$$\begin{cases} (x_E - x_A)^2 + (y_E - y_A)^2 = d_1^2 \\ (x_E - x_B)^2 + (y_E - y_B)^2 = d_2^2 \\ \min(d_{ED} + d_{EC}) \end{cases}$$

$$(x_L, y_L) = \left( \frac{x_E + x_F + x_G + x_H}{4}, \frac{y_E + y_F + y_G + y_H}{4} \right) \quad (12)$$

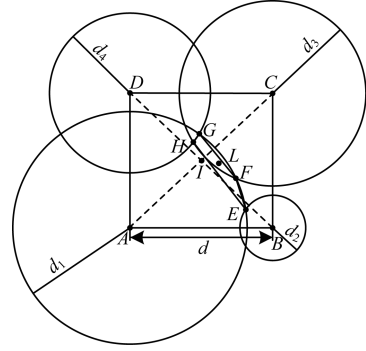


图 8 改进的质心定位算法示意图 4

5) 如图 9 所示,接收器所在位置为  $I$ ,且满足  $d_1 + d_2 < d, d_2 + d_3 < d, d_3 + d_4 > d, d_1 + d_4 > d$ ,即按信号衰减模型计算得到的半径构成的圆之间存在交点  $E, F, G, H$ ,定位点  $L$  的坐标为四点的质心坐标,如式(13)所示。

$$\begin{cases} (x_E - x_C)^2 + (y_E - y_C)^2 = d_3^2 \\ (x_E - x_A)^2 + (y_E - y_A)^2 = d_1^2 \\ \min(d_{ED} + d_{EB}) \end{cases}$$

$$(x_F, y_F) = (x_B - d_2 \cos 45^\circ, y_B + d_2 \cos 45^\circ)$$

$$(x_L, y_L) = \left( \frac{x_E + x_F + x_G + x_H}{4}, \frac{y_E + y_F + y_G + y_H}{4} \right) \quad (13)$$

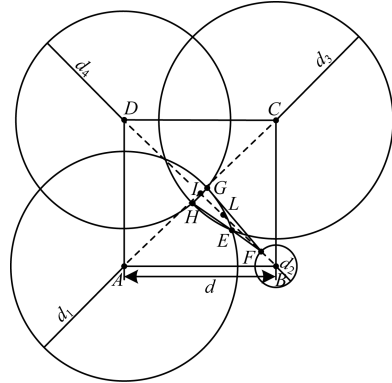


图 9 改进的质心定位算法示意图 5

改进的四点质心定位算法将基于 RSSI 的测距算法与质心定位的非测距算法进行结合,细化了质心定位中不同信号强度的相交情况。信号发射点采用矩形排布,对于其中两圆未相交的情况,采用对角线中的点作为该信号发射点的选择交点,并选取到另外 2 个点中距离最小的点作为质心定位判断点。

本文算法能够有效避免传统质心定位算法中无交点情况导致的定位漂移,并降低最小二乘定位法中的定位误差。此外,与加权质心定位算法相比,本文算法能够缩短加权训练的过程,易于在工程中实现,且具有较高的实用性。

## 2 区域判别法

### 2.1 区域判别定位算法

本文提出一种区域判别定位算法。对整个实验平台进行区域划分,在区域内加权判定信号接收点所处的区域,并对接收到的该区域信号强度和信号

发射器的坐标信息进行处理,通过改进的四点质心定位算法实现优化定位,最终通过贝叶斯优化估计理论进行验证。算法步骤如下:

### 1) 区域划分

对实验平台进行区域划分,划分的区域用  $L$  表示,实验平台内信号发射器的总数为  $N \times M$ 。其中,  $N$  表示整个实验平台内分成的区域个数,即  $L = \{L_1, L_2, \dots, L_N\}$ ,  $M$  表示每个区域内信号发射器的个数。单个区域内信号可以表示为  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_M\}$ , 此区域对应的信号发射器坐标为  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_M\}$ 。

### 2) 降序矩阵排列

在测试点  $O$  处检测到的来自实验平台内所有区域的信号强度组表示为:  $RSSI_O = \{Rssi_1, Rssi_2, \dots, Rssi_M, \dots, Rssi_{N \times M}\}$ , 将上述信号强度组按区域排列,并在每一行将该区域信号强度按降序排列。在测试点  $O$  处检测到的对应信号强度 RSSI 降序矩阵如下:

$$\begin{pmatrix} L_1 a_1 & L_1 a_2 & \dots & L_1 a_M \\ L_2 a_1 & L_2 a_2 & \dots & L_2 a_M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_N a_1 & L_N a_2 & \dots & L_N a_M \end{pmatrix}$$

其中,  $L_N a_M$  表示接收器接收到的区域  $N$  中的对应信号强度最小的 RSSI 值。

### 3) 加权区域判定

由于距离较远时信号衰减模型拟合的误差较大,因此需要选择距离信号接收器最近区域中的信号发射器 RSSI 值作为有效数据。通过信号衰减模型将信号强度 RSSI 的降序矩阵转换为距离降序矩阵,如下:

$$\begin{pmatrix} L_1 d_1 & L_1 d_2 & \dots & L_1 d_M \\ L_2 d_1 & L_2 d_2 & \dots & L_2 d_M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_N d_1 & L_N d_2 & \dots & L_N d_M \end{pmatrix}$$

设加权值向量为  $W = \{W_1, W_2, \dots, W_M\}$ , 计算每一列距离的均值向量  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_M\}$ , 对每一行的距离向量  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_M\}$  与均值  $V$  的差值点乘加权值向量,按式(14)所示取加权值最小的行数  $I$ , 区域  $I$  即为判别求得的定位区域。

$$I = \operatorname{argmin}(W \cdot (D - V)) \quad (14)$$

### 4) 通过改进的四点质心定位算法进行定位

经过加权判定区域后,将由区域  $I$  所代表的信号衰减模型求得的距离序列  $R_I = \{L_I d_1, L_I d_2, \dots, L_I d_M\}$ , 以及对应的信号发射器坐标序列  $X = \{L_I X_1, L_I X_2, \dots, L_I X_M\}$  代入本文第2章中改进的四点质心定位算法,即可计算接收点的定位坐标。

## 2.2 贝叶斯优化估计

当接收器接收到 RSSI 时,可以认为信号强度 RSSI 是符合距离关系的正态分布模型,即在距离一定时,接收到的 RSSI 概率满足一个正态分布模型,如式(15)所示。

$$P(RSSI) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} A e^{-\frac{(RSSI - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (15)$$

其中,  $\mu$  为数学期望,  $\sigma^2$  为方差,数学期望  $\mu$  与距离成正比关系,其概率密度函数的期望值决定了它的位置,标准差决定了它的分布幅度。通过测量固定距离的 RSSI 分布,可以构建高斯分布模型,  $\sigma$  越大,高斯分布模型的平滑程度越好。在实验室环境下,固定接收器与信号发射器的距离为 1 m,实验采集 100 次接收的 RSSI 信号,构建信号强度的概率分布直方图,如图 10 所示。由图 10 可以看出, RSSI 概率分布近似符合高斯分布。

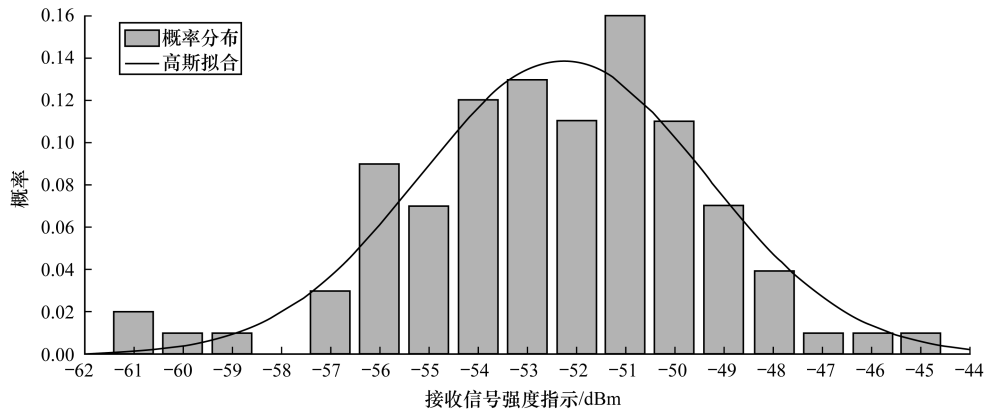


图 10 固定点的 RSSI 概率分布情况

在点  $I$  处检测到的来自不同区域内的信号强度分布组合可以表示为  $RSSI_{MN} = \{Rssi_1, Rssi_2, \dots, Rssi_M, \dots, Rssi_{M \times N}\}$ 。假设每次 RSSI 测量值都是独立的,根据贝叶斯理论估计接收到信号强度组  $RSSI_{MN}$  时每个区域内的定位概率,并选取定位概率

最大区域的 RSSI 向量组用于定位。用  $p(L_i | RSSI_{MN})$  表示接收到 RSSI 组  $R$  时处于区域  $L_i$  的概率,即后验概率,用  $p(L_j | RSSI_{MN})$  表示接收到 RSSI 组  $R$  时处于区域  $L_j$  的概率,  $p(L_i)$  表示定位点分布在区域  $L_i$  的先验概率,  $p(RSSI_{MN})$  表示接收到 RSSI

序列  $R$  的概率,  $p(RSSI_{MN} | L_i)$  表示在区域  $L_i$  接收到信号强度组  $RSSI_{MN}$  的概率。

由贝叶斯公式可以推导出式(16)。

$$p(L_i | RSSI_{MN}) = \frac{p(L_i) \times p(RSSI_{MN} | L_i)}{p(RSSI_{MN})} \quad (16)$$

将最大后验概率对应的区域标识作为接收器接收到信号强度组  $RSSI_{MN}$  时对应的区域。由于整个平台被均匀分成  $N$  个小区, 定位点分布在区域  $L_i$  的先验概率满足  $p(L_i) = 1/N$ , 而每个信号发射点的信号强度独立分布, 则  $p(RSSI_{MN} | L_i)$  符合式(17)。

$$p(RSSI_{MN} | L_i) = \prod_{i=1}^{M \times N} p(Rssi_i | L_i) \quad (17)$$

对于接收到同一信号强度组的信号强度, 用  $p(RSSI_{MN} | L_i)$  表示在区域  $p(RSSI_{MN} | L_i) = \prod_{i=1}^{M \times N} p(Rssi_i | L_i) = \prod_{i=1}^{M \times N} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} A e^{-\frac{(Rssi_i - \mu)^2}{2\sigma^2}}$  接收到的信号强度组合, 其概率符合式(15)中的高斯分布, 则由贝叶斯公式可推导出式(18)。

$$p(RSSI_{MN} | L_i) = \prod_{i=1}^{M \times N} p(Rssi_i | L_i) = \prod_{i=1}^{M \times N} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} A e^{-\frac{(Rssi_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (18)$$

比较最大后验概率可得式(19)：

$$\left\{ \begin{aligned} p(L_i | RSSI_{MN}) &= \frac{p(L_i) \times p(RSSI_{MN} | L_i)}{p(RSSI_{MN})} = \frac{\prod_{j=1}^{M \times N} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} A e^{-\frac{(Rssi_j - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{N \times p(RSSI_{MN})} \\ p(L_j | RSSI_{MN}) &= \frac{p(L_j) \times p(RSSI_{MN} | L_j)}{p(RSSI_{MN})} = \frac{\prod_{j=1}^{M \times N} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} A e^{-\frac{(Rssi_j - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{N \times p(RSSI_{MN})} \end{aligned} \right. \quad (19)$$

接收到信号强度组  $RSSI_{MN}$  时, 不同区域的  $p(RSSI_{MN})$  相等, 即  $RSSI$  序列  $R$  的概率值相同。

由上述结果可知, 不同区域的后验概率比值如下：

$$\frac{p(L_i | RSSI_{MN})}{p(L_j | RSSI_{MN})} \propto \prod_{i=1}^{M \times N} e^{-(Rssi_i - Rssi_j)} \quad (20)$$

由公式  $Rssi_i = A - 10n \lg(d_i)$  可知, 接收到的信号强度组和接收点所在区域, 与每个信号发射器的距离成对数关系, 距离越远, 信号强度越小。在接收到信号强度组  $RSSI_{MN}$  时, 定位区域最大后验概率为来自排列后信号强度最大的区域, 即选取接收信号强度最大的区域作为接收点所在的区域。

### 3 实验结果与分析

本次实验在合肥工业大学翡翠科教楼 18 楼的楼间区域 ( $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ) 进行, 信号发射器选用深圳富明新宇科技有限公司生产的蓝牙信号发射器, 信号接收器采用小米公司的红米 Note2 手机, 用以接收蓝牙信号强度并获取  $RSSI$  值。根据区域判别定位算法, 取  $N=4$ , 即将区域均匀划分成 4 个  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  的区域, 每个区域内放置 4 个信号发射器, 即  $M=4$ 。

定位测量点间隔  $0.25 \text{ m}$  在区域内均匀分布, 共有 64 个测量点, 测量时信号接收器在每个测量点测试 5 次, 并选取来自每个信号发射器的信号强度的均值作为该点接收到的信号强度组  $RSSI_{MN}$  的对应值。实验采用 3 种算法进行定位效果比较：

1) 最小二乘定位法, 其单独计算每个测量点的坐标值。

2) 经过区域判别, 并对区域判别后的信号强度组  $RSSI_{MN}$  进行最小二乘定位。

3) 经过区域判别, 并对区域判别后的信号强度组  $RSSI_{MN}$  进行改进的质心定位。

对于信号强度组  $RSSI_{MN}$ , 选取其中的单点、两点、三点、四点分别进行区域判别, 4 种情况对应的正确率如图 11 所示。

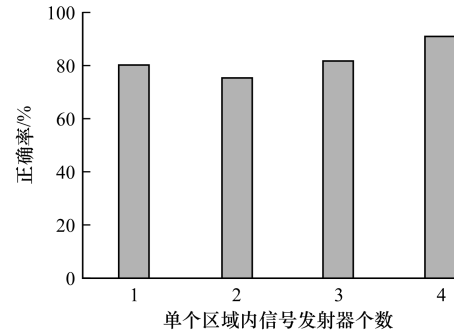


图 11 区域判别正确率分布

由图 11 可以看出, 单点区域判别的正确率为 79.69%, 双点区域判别的正确率为 75%, 三点区域判别的正确率为 81.25%, 四点区域判别的正确率为 90.63%。因此, 在进行四点区域判别时, 可以认为判别区域为测量点所在区域。在每个区域内放置 2 个信号发射器时, 定位正确率会下降, 原因是对称点测得的  $RSSI$  在理论上会出现相同值, 即会产生一定的定位区域判别错误。经过上述实验测试得出, 排序加权值  $W = [16 \ 4 \ 2 \ 1]$  时区域判别的正确率最高。

在本次实验中, 3 种算法的定位效果分别如图 12 ~ 图 14 所示。可以看出, 最小二乘定位法的定位分布趋向于区域边界, 而本文区域判别后的改进质心算法的定位趋向于区域中心。

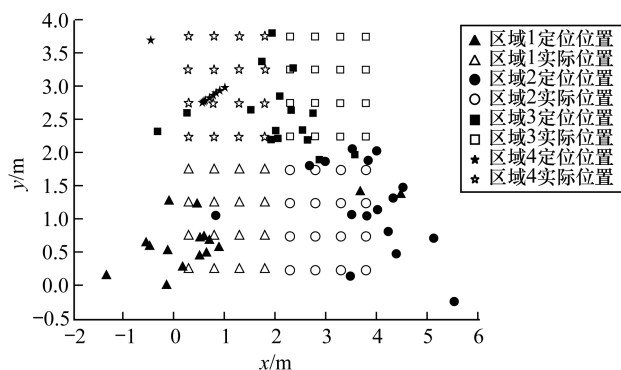


图12 直接最小二乘法定位效果

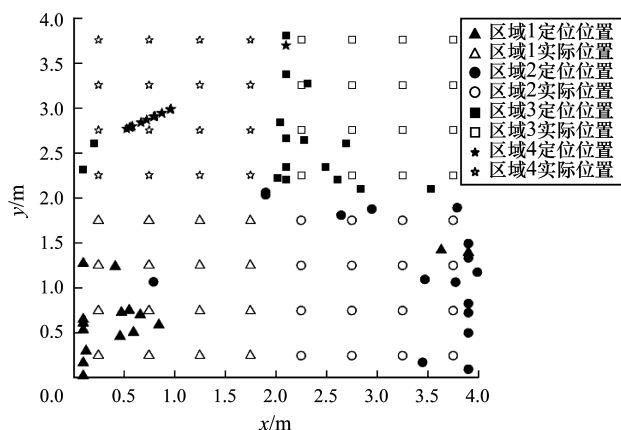


图13 区域判别最小二乘法定位效果

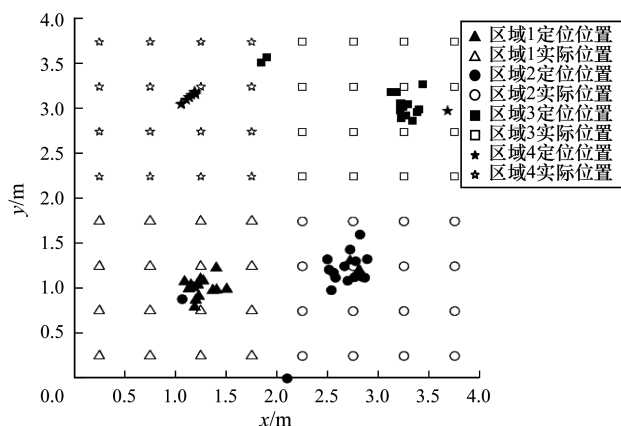


图14 区域判别改进质心算法定位效果

3种算法对整个区域内64个测量点的定位误差对比情况如图15所示。由图15可以看出,最小二乘定位算法平均定位误差为1.237 2 m,区域判别后的最小二乘定位算法平均误差为1.041 2 m,区域判别后的改进质心算法平均误差为0.897 3 m。该实验结果表明,相对最小二乘定位算法,本文区域判别定位算法定位趋向于区域中心,且定位误差更小,定位效果更好。

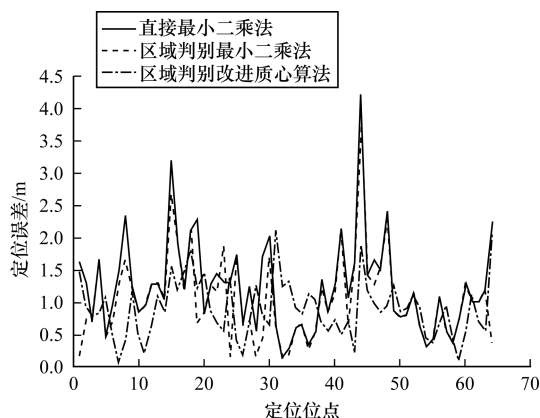


图15 3种算法定位误差对比结果

## 4 结束语

本文提出一种基于蓝牙RSSI的区域判别定位算法。划分定位区域并对接收的信号强度组进行区域判别,在判别的区域内运用改进的质心定位算法实现定位,然后采用贝叶斯估计理论进行优化估计。实验结果表明,相比直接运用最小二乘定位和区域判别后的最小二乘定位,该区域判别定位算法的定位趋向于区域中心,且定位误差较小。下一步考虑将本文定位方法用于室内实时定位系统,如智能家居传感器网络,以提高网络系统的定位精度。

## 参考文献

- [1] 朱莉,顾能华,姚英彪,等. 基于RSSI的WSN二维对数搜索定位算法[J]. 计算机工程, 2014, 40(4): 87-90.
- [2] 汪哈,王坤,路文进,等. 无线传感器网络的锚节点优化布设算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(8): 105-111.
- [3] 钱志鸿,孙大洋, VICTOR L. 无线网络定位综述[J]. 计算机学报, 2016, 39(6): 1237-1256.
- [4] 彭玉旭,杨艳红. 一种基于RSSI的贝叶斯室内定位算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(10): 237-240.
- [5] 徐潇潇,谢林柏,彭力. 一种改进的基于贝叶斯的位置指纹算法[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2015, 14(5): 527-531.
- [6] 夏卓群,戴傲,李平,等. 基于RSSI深相似域高斯拟合的室内定位算法[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(17): 102-106.
- [7] 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.
- [8] 李锋. 一种基于区域划分的RSSI定位方法[J]. 计算机系统应用, 2014, 23(7): 152-155.
- [9] XIANG Z, SONG S, CHEN J, et al. A wireless LAN-based indoor positioning technology[J]. IBM Journal of Research and Development, 2004, 48(5/6): 617-626.
- [10] FARAGHER R, HARLE R. Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(11): 2418-2428.

(下转第137页)

- [6] NIKOLAKOPOULOS A N, KOUNELI M A, GAROFALAKIS J D. Hierarchical itemspace rank: exploiting hierarchy to alleviate sparsity in ranking-based recommendation [J]. *Neurocomputing*, 2015, 163: 126-136.
- [7] YANG L, HAO F, LI S, et al. An efficient approach to generating location-sensitive recommendations in Ad-hoc social network environments [J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2015, 8(3): 520-533.
- [8] NARUCHITPARAMES J, GUNES M H, LOUIS S J. Friend recommendations in social networks using genetic algorithms and network topology [J]. *IEEE Congress of Evolutionary Computation*, 2011, 47(10): 2207-2214.
- [9] QIAO X, LI X, SU Z, et al. A context-awareness dynamic friend recommendation approach for mobile social network users [J]. *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, 2011, 3(2): 155-172.
- [10] ZHU J Q, LU L, MA C M. From interest to location: neighbor-based friend recommendation in social media [J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2015, 30(6): 1188-1200.
- [11] ZHANG W, DU Y, SONG W. Followee recommendation based formal concept analysis in social network [J]. *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, 2015, 11(4): 1155-1164.
- [12] 董峥. 基于用户行为的社交网络好友推荐算法研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2018.
- [13] 程倩倩, 王路路, 郑涛, 等. 基于多特征分类的微博好友推荐 [J]. *计算机工程*, 2015, 41(4): 65-80.
- [14] 齐会敏, 刘群, 戴大祥. 面向兴趣主题的个性化好友推荐 [J]. *计算机工程与科学*, 2018, 40(2): 348-353.
- [15] 宋波伟, 伍伟丽. 基于信任社交圈的好友推荐算法 [J]. *计算机工程*, 2017, 43(5): 149-155.
- [16] 王禾清. 基于内容的垃圾邮件过滤技术研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- [17] 张志军, 刘弘. 上下文感知的移动社交网络推荐算法研究 [J]. *模式识别与人工智能*, 2015, 28(5): 404-410.
- [18] 邹学强, 包秀国, 黄晓军, 等. 基于层次分析的微博短文本特征计算方法 [J]. *通信学报*, 2016(12): 50-55.
- [19] ANSHELEVICH E, BHARDWAJ O, USHER M. Friend of my friend: network formation with two-hop benefit [J]. *Theory of Computing Systems*, 2015, 57(3): 711-752.
- [20] PANAYIOTOU T, ELLINAS G, ANTONIADES N, et al. Impairment-aware multicast session provisioning in metro optical networks [J]. *International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 2015, 91(C): 675-688.
- [21] WU J, HOU Y, JIAO Y, et al. Density shrinking algorithm for community detection with path based similarity [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, 433: 218-228.
- [22] LEE D, PARK J, SHIM J, et al. Efficient filtering techniques for cosine similarity joins [J]. *International Journal on Information*, 2011, 14(4): 1265-1289.
- [23] 于金霞, 臧利明, 王俊峰, 等. 一种改进相似度的协同过滤算法 [J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(2): 116-121.
- [24] 卢文. 基于局部信息节点相似性链路预测算法的分析与研究 [J]. *电子技术与软件工程*, 2018(20): 31-35.
- [25] ALPHY A, PRABAKARAN S. A dynamic recommender system for improved Web usage mining and CRM using swarm intelligence [EB/OL]. [2017-12-10]. <http://europepmc.org/backend/ptpmrender.fcgi?accid=PMC4502334&blobtype=pdf>.
- [26] WU D, ZHANG G, LU J. A fuzzy preference tree-based recommender system for personalized business-to-business E-services [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2015, 23(1): 29-43.
- [27] WENINGER T, PALACIOS R, CRESCENZI V, et al. Web content extraction: a meta analysis of its past and thoughts on its future [J]. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 2016, 17(2): 17-23.

编辑 吴云芳

(上接第131页)

- [11] CHEN L. Bayesian fusion for indoor positioning using Bluetooth fingerprints [J]. *Wireless Personal Communications*, 2013, 70(4): 1735-1745.
- [12] LIU J, AN N, HASSAN M T, et al. Redundancy reduction for indoor device-free localization [J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2017, 21(1): 5-15.
- [13] XU C, FIRNER B, ZHANG Y, et al. The case for efficient and robust RF-based device-free localization [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2016, 15(9): 2362-2375.
- [14] XU C, FIRNER B, ZHANG Y, et al. Improving RF-based device-free passive localization in cluttered indoor environments through probabilistic classification methods [C]// *Proceedings of International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. New York, USA: ACM Press, 2012: 209-220.
- [15] 吴小竹, 陈崇成, 刘先锋, 等. 集成 iBeacon 室内定位的文化旅游虚拟导览系统 [J]. *计算机工程*, 2016, 42(10): 6-11.
- [16] 申晓龙, 申晓凤. 基于 RSSI 的室内定位关键技术研究 [J]. *物联网技术*, 2017, 7(8): 19-21.
- [17] YUAN Z, YANG J, YOU L, et al. Smartphone-based indoor localization with Bluetooth low energy beacons [J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 596-598.

编辑 吴云芳