

# 一种位置指纹 - 最小二乘融合的蓝牙 室内定位方法及实现

张伟

(1. 北京奇虎科技有限公司 360 未来安全研究院, 北京 100015; 2. 扬州大学 信息工程学院, 江苏 扬州 225001)

**摘要:** 在复杂的室内环境中, 结合最小二乘法的数据误差优化和位置指纹定位法数据库匹配, 提出了一种基于位置指纹 - 最小二乘融合 (F-LS) 的高精度低功耗蓝牙 (Bluetooth Low Energy, BLE) 室内定位方法。采用位置估计、模型优化的方法, 并在 Android 上实现了室内准确定位, 将结果以二维图像形式显示出来。经实际测定, 在 6.51 m×10.12 m 的室内环境下, F-LS 的定位精度优于 75 cm, 完全可以满足人们对日常目标定位的要求。该方法的实现程序已开源至 GitHub: [https://github.com/Charmve/Bluetooth-Location\\_2D](https://github.com/Charmve/Bluetooth-Location_2D)。

**关键词:** 室内定位; 蓝牙; Beacon; Android; 位置指纹定位; 最小二乘定位

**中图分类号:** TN926

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-1302 (2022) 03-0004-03

## 0 引言

随着便携式智能设备的广泛普及, 人们可以通过便携式设备获取个人定位及目标物体 (车辆、商品、包裹等) 的位置信息。然而, 相较室外定位技术发展的成熟<sup>[1]</sup>, 室内定位技术<sup>[2-3]</sup>一直处于欠发展的阶段。从目前来看, 室内定位技术的多样性不能与定位算法的优点有效结合起来<sup>[4-6]</sup>, 还存在较多问题, 例如功耗低但实现过于复杂等。

本文采用基于 BLE 接收信号强度指示的位置指纹定位法<sup>[7]</sup>与最小二乘法<sup>[8]</sup>相融合的方式来实现室内定位 (本文命名为“F-LS 方法”), 并通过构建的定位系统验证了该融合算法, 能够提高定位精度, 也较容易实现。

## 1 定位方法

根据实际定位场景下的具体环境, 目前的定位方法一般包括位置估计和位置跟踪两大类<sup>[2-3]</sup>, 并且都包含物理测量、数据预处理、算法选择三个环节, 如图 1 所示。本文所提出的测距定位方法中, 物理测量采用基于 BLE 接收信号强度<sup>[9-10]</sup>的测量及数值优化方法实现, 数据预处理和算法选择是本文的核心。

### 1.1 最小二乘定位

最小二乘定位通过最小化误差的平方和来寻找数据的最佳匹配, 从而达到优化结果的目的。以信标节点数  $n=4$  为例 (如图 2 所示), 采用最小二乘方法, 得到被测定位点的最终位置计算式为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_2) & 2(y_1 - y_2) \\ 2(x_1 - x_3) & 2(y_1 - y_3) \\ 2(x_1 - x_4) & 2(y_1 - y_4) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} (d_2^2 - d_1^2) + (x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2) \\ (d_3^2 - d_1^2) + (x_1^2 - x_3^2) + (y_1^2 - y_3^2) \\ (d_4^2 - d_1^2) + (x_1^2 - x_4^2) + (y_1^2 - y_4^2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_2) & 2(y_1 - y_2) \\ 2(x_1 - x_3) & 2(y_1 - y_3) \\ 2(x_1 - x_4) & 2(y_1 - y_4) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \\ \mathbf{b} &= \begin{bmatrix} (d_2^2 - d_1^2) + (x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2) \\ (d_3^2 - d_1^2) + (x_1^2 - x_3^2) + (y_1^2 - y_3^2) \\ (d_4^2 - d_1^2) + (x_1^2 - x_4^2) + (y_1^2 - y_4^2) \end{bmatrix} \\ \Rightarrow \mathbf{x}_{LS} &= (A^T A)^{-1} A^T \mathbf{b} \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $[x_1, y_1], [x_2, y_2], \dots, [x_n, y_n]$  为  $n$  个 Beacon 对应的位置坐标。根据信号强度的对数衰减模型得到相应距离为:  $(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 。

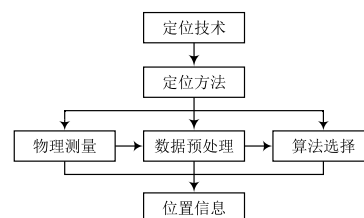


图 1 定位实现流程



图 2 最小二乘定位 (4 个 Beacon 参考点)

## 1.2 位置指纹定位

信号在空间中的多径传播依赖于环境本身的特性,因此每个位置的多径结构都是唯一确定的,进而形成特殊的位置“指纹”。由此产生了位置指纹(Location Fingerprint, LF)定位法<sup>[11-12]</sup>,它的实现过程分为离线训练和在线定位两个阶段,如图3所示。

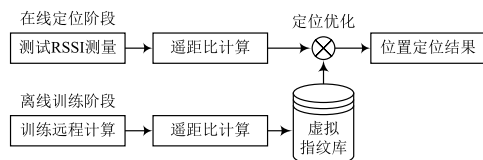


图3 位置指纹定位法原理

在定位区域内完成对 Beacon 信标节点的合理布局后,采集区域内样本点的指纹信息得到指纹库:

$$F_{vi}(i, j) = F_{vi}(i\Delta x, j\Delta y) = [d_{vr}(1, q; i, j) \cdots d_{vr}(2, q; i, j) \cdots d_{vr}(n, q; i, j)],$$

$$d_{vr}(q, q; i, j) = 1 \quad (3)$$

$$F_{vii}(i, j) = \begin{bmatrix} d_{vr}(1, 1; i, j) & d_{vr}(2, 1; i, j) & \cdots & d_{vr}(n, 1; i, j) \\ d_{vr}(1, 2; i, j) & d_{vr}(2, 2; i, j) & \cdots & d_{vr}(n, 2; i, j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{vr}(1, n; i, j) & d_{vr}(2, n; i, j) & \cdots & d_{vr}(n, n; i, j) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $F_{vi}(i, j)$  为一维空间位置指纹库;  $F_{vii}(i, j)$  为二维空间位置指纹库;  $n$  为定位区域内布设的 Beacon 信标节点个数;  $q$  为采样点的个数;  $d_{vr}(n, q; i, j)$  为坐标  $(n, q)$  位置的信号强度。

最终目标定位点的位置表达式为:

$$L_{mm} = [x \ y] = [i\Delta x \ j\Delta y] = \arg \min_{i, j, k} \|F(x, y) - F_v(i, j)\|_2 \quad (5)$$

式中,  $F(x, y)$  为某坐标位置下的信号强度,与该点信号强度的多径相角分量  $F_v(i, j)$  对应。

## 1.3 位置指纹 - 最小二乘融合定位 (F-LS)

使用最近邻法(或贝叶斯法)定位,计算定位误差。当不携带蓝牙设备人员位于某个待定位点时,采集人员用手机在固定位置采集各个参考蓝牙节点的信号强度,采用最近邻法(或贝叶斯法)与数据库中位置指纹比较。融合位置指纹法和最小二乘法,取平均值,确定不携带蓝牙设备人员的位置(如图4中“⊗”所示)。

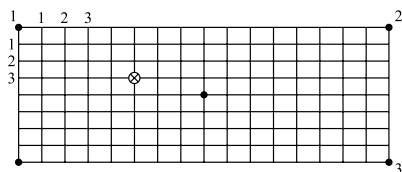


图4 建立的位置指纹

在定位区域内布设  $n \times m$  个 Beacon 信标网格节点,由式(2)

可得,被测定位点的位置坐标为:

$$x_{LSn} = (A_n^T A_n)^{-1} A_n^T b_n \quad (6)$$

最终,位置指纹-最小二乘融合定位法 F-LS 测定位置坐标为:

$$x_{F-LSn} = (x_{LSn} + L_{nm}) \times \frac{1}{2} \quad (7)$$

误差累积概率  $F(e; \mu, \sigma)$  为:

$$f(e; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(e-\mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

$$e = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (8)$$

$$F(e; \mu, \sigma) = \int_{-\infty}^e f(e; \mu, \sigma) de \quad (9)$$

式中:  $e$  为所测结果的标准差;  $\sigma$  为总体标准差;  $\mu$  为期望值。

## 2 定位实现

### 2.1 位置指纹数据库建立

建立设备无关指纹数据库时,在空旷的室内环境内的同一平面均匀设计采样点,采样间隔为边长 0.5 m 的方形地砖;然后定位被测目标位置,对每个采样点采集一次数据并记录;最后使用位置指纹-最小二乘融合(F-LS)建立位置指纹数据库。

### 2.2 Android 程序实现

根据蓝牙信号强弱测距、位置估计优化的设计思路,在实际的实验机房完成 Android 程序的设计,实现 Beacon 参考点的测距。Android 程序实现如图5所示。

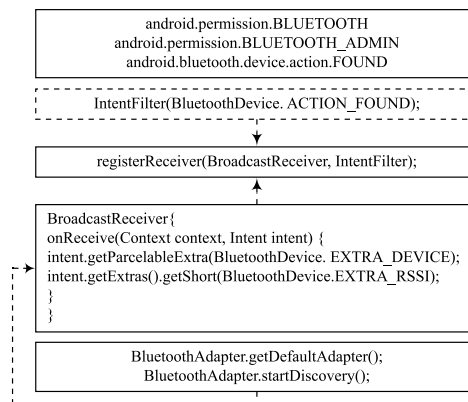


图5 蓝牙测距定位 Android 程序结构示意图

### 2.3 二维图像显示

通过 Android Studio 创建二维图形 Android 应用程序,将图片 bluetooth.png 复制到 AS 的“res/drawable”目录;修改前面的定位程序,将定位结果以二维图形方式显示,如图6所示。

手机或开发板屏幕对应整个室内定位空间,布局文件

activity\_main.xml 包括 2D 图形和控件, MainActivity 访问 MyView 以传送定位点坐标。在 activity\_main 的 MyView 中增加属性 android:id="@+id/myview", 在 MainActivity 中使用 findViewById (R.id.myview) 访问 MyView。



图 6 Android 二维显示界面

### 3 系统测试结果

实验环境为机房室内 (6.51 m×10.12 m), 将 4 个 Beacon 布置在机房的四个角落, 如图 7 所示。本文从测试区域中选取中轴线上的 11 个点, 使用最小二乘法、位置指纹法和本文提出的 F-LS 方法统计各个采样点的测定结果, 并以 Android 界面像素值的 0.001 记入, 见表 1 所列。从测试结果可以看出, 最小二乘定位和位置指纹法的平均误差相差不大, 定位精度不稳定, 误差波动较大; 而通过位置指纹-最小二乘融合 (F-LS) 方法能够有效地规避定位误差的波动, 提高结果的稳定性和定位精度。

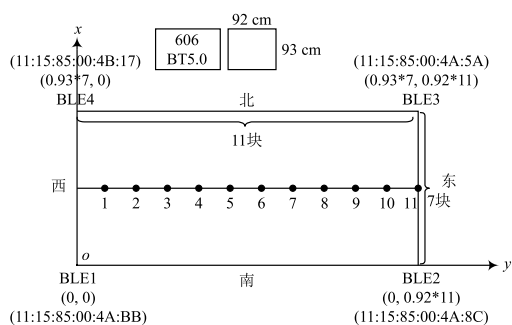


图 7 测试环境示意图

从图 8 中定位结果的误差累积分布可以看出, F-LS 方法的定位误差均小于位置指纹定位法, 定位精度的稳定性优于最小二乘法, 说明了该方法的有效性。

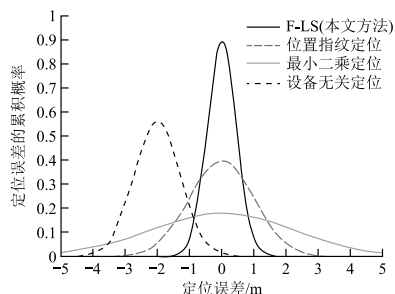


图 8 误差累积分布

表 1 三种定位方法测试结果对比

采样点序号	最小二乘定位		位置指纹定位		设备无关定位		F-LS (本文方法)	
	结果	误差 /%	结果	误差 /%	结果	误差 /%	结果	误差 /%
1	0.039	8.3	0.037	7.9	0.073	7.4	0.034	7.8
2	0.076	8.2	0.078	8.4	0.155	9.4	0.087	8.4
3	0.110	7.9	0.103	7.4	0.204	7.5	0.105	8.3
4	0.154	8.3	0.154	8.3	0.305	8.7	0.162	9.4
5	0.214	9.2	0.216	9.3	0.428	9.4	0.219	9.3
6	0.318	11.4	0.349	12.5	0.390	11.8	0.273	9.2
7	0.430	13.2	0.335	10.3	0.363	12.3	0.400	8.9
8	0.450	12.1	0.379	10.2	0.751	11.5	0.428	8.7
9	0.573	11.2	0.501	9.8	0.811	10.3	0.527	8.3
10	0.575	10.3	0.497	8.9	0.819	9.7	0.541	8.4
11	0.788	12.1	0.677	10.4	1.052	18.6	0.560	8.8

### 4 结 语

本文提出的室内测距定位方法, 主要通过位置估计、模型优化, 在 Android 上实现了室内准确定位, 并将结果以二维图像形式显示出来。经实际测定, 该方法在 6.51 m×10.12 m 的室内环境下, 定位精度优于 75 cm, 完全可以满足日常的目标定位功能。该方法已经在 Android 上实现, 可参考程序地址为: [https://github.com/Charmve/Bluetooth-Location\\_2D](https://github.com/Charmve/Bluetooth-Location_2D)。

### 参 考 文 献

- [1] 郝雨时, 徐爱功, 隋心. GNSS / UWB 高精度室内外组合定位方法 [J]. 导航定位学报, 2016, 4 (4): 17-23.
- [2] 王星星, 丛思安. 室内定位研究方法综述 [J]. 软件导刊, 2019, 18 (9): 9-12.
- [3] 张胜利, 焦诚, 付永恒. 室内定位方法和技术综述 [J]. 数字技术与应用, 2018, 36 (10): 73-74.
- [4] 王健兴. 基于 iBeacon 的室内定位系统 [J]. 通讯世界, 2017, 24(24): 3-5.
- [5] 刘明伟, 刘太君, 叶焱, 等. 基于低功耗蓝牙技术的室内定位应用研究 [J]. 无线通信技术, 2015, 24 (3): 19-23.
- [6] 石志京. 基于低功耗蓝牙的室内定位技术研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2015.
- [7] 吴雅琴, 杨硕, 师兰兰. 基于位置指纹与 PDR 融合的室内定位算法研究 [J]. 矿业科学学报, 2019, 4 (5): 448-454.
- [8] 王健, 闫菲, 陆小军, 等. 一种基于最小二乘法的蓝牙定位方法 [J]. 计算机与网络, 2017, 43 (19): 72-74.
- [9] 李明阳. 基于蓝牙的室内定位技术研究 [J]. 科技经济导刊, 2019, 27 (8): 27.
- [10] 杨保, 张鹏飞, 李军杰, 等. 一种基于蓝牙的室内定位导航技术 [J]. 测绘科学, 2019, 44 (6): 89-95.
- [11] 王旭强, 万亚平, 李洪飞, 等. 基于 WiFi 指纹的室内定位系统 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2019, 26 (5): 133-135.
- [12] 卢恒惠, 刘兴川, 张超, 等. 基于三角形与位置指纹识别算法的 WiFi 定位比较 [J]. 移动通信, 2010, 34 (10): 72-76.