



中国第一所现代大学
FOUNDED IN 1895

天津大学

TIANJIN UNIVERSITY

全日制工程硕士学位论文 DISSERTATION OF FULL-TIME MASTERS OF ENGINEERING

领 域: 电子与通信工程

作者姓名: 杜佳星

指导教师: 张 静 副教授

企业导师: 赵 泽

天津大学研究生院

2016 年 11 月

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：杜佳星

签字日期：2016 年 11 月 30 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：杜佳星

导师签名：张铮

签字日期：2016 年 11 月 30 日

签字日期：2016 年 11 月 30 日

基于蓝牙 4.0 的室内定位算法研究

Indoor Location Algorithm Based on Bluetooth 4.0

工程领域: 电子与通信工程

作者姓名: 杜佳星

指导教师: 张静 副教授

企业导师: 赵泽

天津大学电子信息工程学院

二零一六年十一月

摘要

随着通信基础设施建设的逐步完善以及物联网时代的到来,无线传感器网络技术作为实现物联网全面感知功能的底层重要底层网络技术,在军事、民用、商用等室内环境中广泛应用。室内定位技术的目前代表定位方案有 Wi-Fi、蓝牙等,这些都是承载到无线传感器网络中实现局部区域的覆盖。基于最新 BLE4.0 技术的蓝牙模块因其具备功耗低、反应快、性能好等卓尔不群的性能而在众多设计方案中脱颖而出。蓝牙技术这种性能优良、短距离、低成本的无线互连通信技术,非常胜任室内定位工作,逐渐成为室内定位领域中研究的热门方向。

本课题在对现有室内定位方法进行深入研究分析的基础上,针对现有室内定位方法存在的缺陷,同时结合现有的发展现状,本文提出一种基于蓝牙 4.0 的信号强度 RSSI 室内定位优化算法,从测距和定位两方面对传统的 RSSI 定位算法进行优化处理,其中具体优化策略包括采用聚类分析算法进行信号强度优化处理、分段拟合无线信号衰减模型以及优化权值、距离修正的加权质心定位算法优化方法,以此来消除多径干扰、非视距、长距离传输等影响因素,从而有效提高室内定位精度和定位算法适应性,并在实际环境中进行了应用。结果证明该方法可以有效改善系统的定位精度,在非对称定位环境下比传统基于高斯滤波的 RSSI 信号处理优化策略的定位算法精度提高了 35.6%,且定位平均误差基本不超过 0.5m,可适应室内定位精度要求。

关键词: 室内定位,接收信号强度 RSSI,聚类分析,距离修正,加权质心

ABSTRACT

With the gradual improvement of the communication infrastructure and the arrival of the Internet of Things, wireless sensor network technology is widely used in the military, civil, commercial and other indoor environments as the underlying underlying network technology to realize the comprehensive perception function of Internet of Things. Indoor positioning technology is currently on behalf of positioning programs are Wi-Fi, Bluetooth, etc, which are carried to the wireless sensor network to achieve coverage of local area. Bluetooth module based on the latest BLE4.0 technology because of its low power consumption, fast response, good performance and other features that stand out in many design options. Bluetooth technology, this excellent performance, short-distance, low-cost wireless interconnection communication technology, is very qualified for indoor positioning, indoor positioning has become a popular research direction.

In this paper, based on the analysis and research of existing indoor location methods, aiming at the shortcomings of the existing indoor positioning methods, combined with the existing development status. In this paper, an RSSI indoor positioning optimization algorithm based on the signal strength of Bluetooth 4.0 is proposed. The traditional RSSI localization algorithm is optimized from two aspects, ranging from location and location. The specific optimization strategies include the clustering algorithm for signal strength optimization, Segmentation fitting wireless signal attenuation model and optimization weighting and distance correction weighted centroid localization algorithm optimization method, in order to eliminate multipath interference, non-line of sight, long-distance transmission and other factors, thereby effectively improve the indoor positioning accuracy and positioning algorithm and applied in practical environment. The results show that this method can improve the localization precision of the system effectively, and the localization precision of the algorithm is 35.6% higher than that of traditional Gaussian filtering based RSSI signal processing optimization method, and the average error of positioning is not more than 0.5m. The results meet the indoor positioning accuracy requirements.

KEY WORDS: Indoor Location, Received Signal Strength Indication(RSSI), Cluster Analysis, Distance Rectification, Weighted Centroid Algorithm

目录

摘 要	I
ABSTRACT.....	II
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 室内定位系统的国内外发展现状.....	2
1.3 本课题研究内容	5
1.4 论文结构框架	6
第 2 章 室内定位工作原理研究	7
2.1 现有室内定位方案及算法.....	7
2.1.1 基于短距离无线通信技术定位方法.....	7
2.1.2 基于惯性导航的室内定位方法.....	8
2.2 无线定位的基本技术	9
2.2.1 基于测距技术的定位算法.....	10
2.2.2 与距离无关的定位算法.....	14
2.3 现有定位方法存在的问题.....	17
2.4 本章小结	18
第 3 章 基于蓝牙 4.0 室内定位算法	19
3.1 蓝牙室内定位框架	19
3.1.1 蓝牙技术特点	19
3.1.2 蓝牙 4.0 协议栈体系结构.....	20
3.1.3 iBeacon 技术及工作原理	21
3.2 无线信号传播模型	23
3.2.1 自由空间传播	23
3.2.2 阴影衰落模型	23
3.2.3 无线信号传播模型拟合方法.....	24
3.3 RSSI 数据信息处理策略.....	25
3.3.1 中值滤波	26
3.3.2 高斯均值滤波	26
3.3.3 卡尔曼滤波	26

3.4 基于无线信号定位	27
3.4.1 三边测量法	27
3.4.2 三角测量法	28
3.4.3 质心算法	29
3.4.4 极大似然估计法.....	29
第4章 基于聚类分析优化的距离修正室内定位算法设计	31
4.1 系统架构	31
4.2 分段拟合无线信号衰减模型.....	32
4.3 聚类分析高斯混合模型优化策略.....	33
4.3.1 高斯混合模型	33
4.3.2 最大期望算法的应用.....	35
4.3.3 赤池信息量准则.....	37
4.4 修正距离优化的四边定位算法.....	39
4.4.1 优化权值的加权质心算法.....	39
4.4.2 基于距离修正的室内定位算法.....	41
4.4.3 四边定位算法	43
4.5 基于聚类分析优化的距离修正室内定位算法伪代码.....	44
第5章 室内定位系统的实现与实验分析	47
5.1 系统开发平台	47
5.2 树莓派连接 iBeacon	48
5.3 分段拟合无线信号衰减模型.....	49
5.4 RSSI 基于聚类分析优化策略的测距实验	50
5.5 RSSI 优化方案的定位实验	52
5.5.1 非对称环境下定位实验.....	52
5.5.2 对称环境下定位实验.....	53
5.5.3 移动终端定位实验.....	53
5.6 实验结果分析与小结	55
第6章 总结和展望	57
6.1 工作总结	57
6.2 工作展望	57
参考文献	59
发表论文和参加科研情况说明	65
致谢	67

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

定位技术^[1]是指凭靠已知区域内存在的信号基站具体位置信息，来估测该区域内用户位置信息的一种技术，它最早使用于军事作业，如应用于授时、海陆空作战行动、武器制导、救援定位等。全球定位系统(Global Positioning System, GPS)定位技术，作为室外导航领域的黄金标准，为目前最成熟的军民两用定位系统，是美国在上世纪六十年代为海陆空三大领域提供全天候、全球性、实时的位置导航服务为目的研发的卫星定位系统，是当前最成熟、最精准、覆盖范围最大的定位系统。伴随科技化生产力的与日俱积，GPS 定位技术已经日趋完善的融入日常工作生活与位置服务相关的方方面面，如监控管理、车载导航，物流配送等，定位技术给人们的生活和日常带来了许多便利与帮助。

虽然 GPS 定位技术主要在开阔的室外环境中提供了精准的位置服务需求，但在室内条件下，由于障碍物阻挡，使卫星信号发生散射、衍射、折射等多径效应的影响，无法接收到有效的 GPS 信号，如此，室外定位技术在室内条件下精度较低，不适用于该条件。然而，人们的日常生活和工作大都处于室内，对室内定位技术的要求与日俱增，比如在剧院、大型购物商场、机场、火车站等交通枢纽，以及矿井等领域，都是 GPS 定位系统无法施展拳脚的盲区，而另一面，人们对位置信息需求量日渐增加，急切需要一种精准高效的室内定位技术来满足位置信息全覆盖。例如，当火灾发生时，通过定位受灾人员的位置，及时地提供相应的救援，尽量避免生命财产损失；在购物商场中预先配置室内定位系统可为购物用户提供优质便利的定位、寻查和导航服务。在此背景下，室内定位技术应运而生，它的目标是利用现有的网络基础设施和技术手段，以较低的成本实现复杂室内环境下的高精度定位，满足室内用户的位置信息需求^[2]，弥补现有技术缺陷的不足。

在现今科技领域飞速扩大下，随着物联网、无线通信技术和分布处理技术等领域的水乳交融，为无线信号技术的室内定位方法的发展创造了无限的机遇与挑战^[3]。目前，热门的室内定位技术主要包括蓝牙定位技术^[4]，WI-FI 定位技术^[5]，ZigBee 定位技术^[6]，超声波定位技术^[7]等，各类技术各有千秋，但都是在室内环境中的布置传感器节点、搭建无线传感器网络而进行测距定位。但因布置难度大、

功率损耗问题、室内空间随机多变、系统适应性等因素的难以克服,至今尚未出现性能稳定定位精确的室内定位统一标准。此外室内定位算法对室内定位的影响也是举足轻重,算法的性能对室内定位系统的使用品质影响起到的是关键性的作用。因此室内定位技术的研究热点就是主要关注定位系统算法优化完善,例如,如何提高算法的容错能力、如何部署节点,如何对采样信息进行优化筛选,如何消弱多径效应的影响,如何提高算法适应性等都属于算法领域。而目前并未出现能完全解决上述困难的室内定位算法。因此,对室内定位技术的研究,意义非常重大,还极其的需要进行深入研究和探讨。

1.2 室内定位系统的国内外发展现状

室内定位是指采用无线信号、基站定位、惯性导航定位等多种技术,在室内环境中实现定位来感知位置信息,从而实现对室内人员、物体等的位置相关的管理监控。室内定位技术发展相对较晚,它的起步是在于 GPS 的定位技术和利用基站定位满足不了生活和工作中对定位导航的需求时才发展起来的。

伴随新兴技术的飞速发展,尤其是物联网技术、微型电子机械技术等科技领域的交叉互融,对现代室内定位系统的发展作用斐然。当前,风靡的室内定位技术主要包括:蓝牙定位技术、WI-FI 定位技术、RFID 定位技术、ZigBee 定位技术以及基于硬件发展出现的惯性导航定位技术^[8]等。其中定位的原理包括两大类型,即基于测距的定位算法和与距离无关的定位算法。其中,基于测距的算法包括基于到达时间法(TOA)^[9],基于到达时间差法(TDOA)^[10],基于到达角度法(AOA)^[11],和基于信号强度指示法(RSSI)^[12]等;与距离无关的定位算法包括DV-Hop 算法^[13]、位置指纹识别算法^[14]、APIT 近似三角形内点测试法^[15]等。

目前已有多种室内定位技术的提案,如伪信标技术^[16]、GPS 转发技术^[17]以及网络定位技术^[18]等。人们研究和利用现无线信号技术来研发室内定位系统始于上世纪九十年代,最早研制的系统最典型的是来自英国剑桥大学研发的基于红外线技术的室内定位系统 Active Badge^[19],这一时期所研发的系统一般要求在特定环境中通过布置特定的设备才能使用,未得到大规模应用。下面概括性介绍现今的一些典型的室内定位系统。

1、基于蓝牙技术定位:蓝牙信号具有短距离、低功耗等特点。其工作原理是:布置蓝牙局域网接入点使之可覆盖整个室内环境,将网络连接模式设置成多用户环境下的模式,当蓝牙模块开启时,通过测量蓝牙局域网接入点的接收信号

强度 (Received Signal Strength Indicator, RSSI) 进行未知位置定位^[4]。如今蓝牙定位技术已得到广泛应用, 例如, 诺基亚引入蓝牙 4.0 技术, 研发了基于蓝牙的三角定位模块 (HAIP) 来进行室内精确定位, 该模块定位精度最高可达毫米级。

2、基于 Wi-Fi 定位: 其定位方式采用经验测试和传播模型相结合, 通常的 Wi-Fi 室内定位, 一是需要离线采集数据建库, 二是在线定位, 即使用用户搜集到的 Wi-Fi 强度去跟指纹库中的众多数据进行匹配, 以此实现定位。例如, 2011 年 Wi-FiSLAM 推出的结合 Wi-Fi 和手机自带的加速计和指南针进行手机自定位, 其 Wi-Fi 技术利用 Skyhook 和 Google 等公司创建并维持的多个数据库进行指纹匹配定位^[21]。

3、基于 RFID 技术定位: 主要通过射频标签 (Tag) 和读卡器 (Reader) 构成的 RFID 系统实现定位。读卡器通过射频信号进行双向通信读取交换有标签对象的相关信息来获取位置信息。RFID 系统已广泛用于公司管理、防伪认证和物流等领域中, 在室内定位中也同样得到了应用。例如, 2000 年 MIT 实验室研发的 Cricket 系统^[22]和 2004 年 Youbisensi 公司^[23]研发的基于 RFID 技术, 以三维形式虚拟出建筑内的工作者和物体摆件的空间位置的新型定位系统, 误差极低, 可方便地实现室内工作的监管和寻查。

4、基于 ZigBee 技术定位: ZigBee 是一种基于 IEEE 802.15.4 标准的新兴无线网络技术, 因为其数据传输方式类似蜜蜂采蜜时的“Z”字形舞蹈, 所以命名为 ZigBee, 其最显著的优点是短距离、低功耗、低成本。ZigBee 的技术优点对于室内定位的应用需求很贴切, 但目前并未出现支持 ZigBee 协议的智能终端, 因此对于基于 ZigBee 实现定位的技术解决方案的研究并不热门, 比较突出的系统有由杭州辰林信息技术公司研发的利用 Zigbee 无线通信技术所涉及的应用于矿工作业监管的定位系统, 有操作方便、能耗低和实时性高等优点。

5、基于惯性导航定位: 惯性测量装置 (IMU) 主要包括加速度计、陀螺仪和磁力计 (又称惯性导航组合)。惯性元件用来测量运载体本身的加速度和角加速度, 经过积分得到速度和角速度, 再对速度积分得到位移和方向, 在初始位置已知的情况下确定位置, 实现对运载体导航定位的目的。惯性导航定位工作时一般不需要依赖外界信息, 也不向外界发射信号, 因此不易受外界环境的干扰, 是一种应用较广泛的自主式导航系统。代表的有 Broadcom 和 Intel^[24], 他们推出利用手机自带惯性导航传感器数据进行定位计算的硬件解决方案。

除了上述定位技术之外, 还有基于光跟踪定位^[25]、网络定位^[26]、计算机视觉^[27]、磁场强度^[28]以及近场通信 (Near Field Communication, NFC) 信标定位^[29]等

的室内定位方案。但是，目前有些技术方案（如磁场强度的定位技术）仍处于理论测试阶段。例如，IndoorAtlas 基于地球磁场，利用其在每一个具体位置的磁场信息不同这一特征来进行室内定位，该方案定位精度高，但导航过程比较繁琐；杜克大学研发的 UnLoc 应用^[30]，该方案通过采用递归、过滤和“无形的路标”等方式提供更高准确的室内定位，所谓“无形路标”是指感知 Wi-Fi、3G 信号的死角以及一些特殊场景的运动特征等作为参考点，来对移动用户进行定位和位置校正，该方案精度误差控制在 1.6 米左右。

另外，将不同定位技术进行融合的也是一种实现高效定位的可行方法。例如，Trimble 公司将其 GPS 技术与 Rosum 公司^[31]基于电视的定位技术进行组合，提供室内外连续无缝的定位效果。Rosum 利用宽带大功率数字信号或模拟电视台广播信号来进行定位，信号能深入市区的建筑物内或其他各种室内环境中。通过利用地图信息匹配和大数据处理感知位置定位信息也是一种改善定位效果的方式，比如谷歌自 2015 年研发的本地向导 APP “Local Guides”^[32]是通过采用众包功能，鼓励用户上传所在位置具体环境平面图来进一步完善地图服务数据源，并以此来提高室内定位与导航的精度。用户在应用谷歌的本地向导进行室内定位与导航时，谷歌会收集用户位置处的 GPS、Wi-Fi、基站等信息，通过其拥有的强大的数据处理分析计算后，为用户提供更准确的定位导航服务。随着微型电子机械系统（MEMS）和物联网技术的高速发展，基于无线传感器网络和便携式传感器相融合的定位技术也成为目前室内定位研究的热门。例如，博通公司研制了一种用于室内定位的新型芯片（BCM4752）^[33]，提供三维定位功能（即对目标位置加入高度信息）。该芯片可通过 Wi-Fi、蓝牙、近场通信(Near Field Communication, NFC)传感器、惯性导航传感器等技术组合使用来提供快速的室内位置服务信息，达到高效且高精度的定位目标。该芯片可以结合多种实际生活场景，如购物应用程序，引导用户更快找到特定的商店，商场，具有很大商业价值。

目前，国内针对室内定位的研究略晚于国外，但目前各大科研院校和商业巨头也将目光汇聚到了对室内定位技术研究中。浙江大学的研究人员设计了分布式定位 iNemo^[34]，该系统主要致力于信号强度差异的零配置、环境自适应等部分的研究；香港科技大学的研究人员利用 RFID 技术研发了经典的 LANDMARC^[35]定位系统，采用最近邻距离思想，对系统进行设计；中国科学院地理科学与自然资源研究所开展了关于室内定位中的普适计算技术研究；北京邮电大学对指纹识别定位算法进行了研究。

总的来说,室内定位技术的研究目前处于蓬勃发展的阶段,但是尚未形成统一的标准,所以定位方案的现状也呈现出多样化的趋势。国际上一些著名科技巨头、大型厂商都致力于室内定位方面的研究,2012 年,由 Nokia、samsung、Sony、博通、高通多家公司成立室内定位研究联盟。室内定位技术的商业化必将带来一波创新高潮,各种基于此技术的应用将出现在我们的面前,其影响和规模绝不会亚于 GPS。彼时在站在传统室内定位的基础上,通过多学科融合,结合新兴科学手段对室内定位技术进行研究,以达到实时、高精度、低功耗的定位目标。

1.3 本课题研究内容

本文首先分析了一些目前热门的室内定位系统解决方案,分析了各自的特点和原理,在此基础上,提出了基于蓝牙 4.0 的室内定位技术方案,蓝牙 4.0 技术是当前蓝牙技术的最新版本,在当前短距离无线通信中出类拔萃,它集成了功耗低、成本低、反应灵敏、传输距离远四大特征,是选取作为室内定位应用技术的最佳选择。

本课题集中研究基于 RSSI 的室内定位技术,常用的无线信号定位方法包括基于测距(range-based)的定位算法和与距离无关(range-free)的定位算法,本文主要研究基于接收信号强度指示(RSSI)的测距定位算法。在采用接收信号强度 RSSI 进行测距定位的方法中,通常利用预先训练模型进行多次拟合确定接收信号强度指示与距离之间一一对应的映射关系,进而拟合得到距离路径损耗函数关系。通过优化权值及改进的距离修正方案的质心定位算法计算此时未知节点的坐标既可以得到目标位置。本文设计的定位算法在以树莓派为核心的微型电脑硬件平台上进行相关的应用开发,实现了一个基于 Linux 平台的移动终端室内定位系统。

本文基于蓝牙的 RSSI 定位的研究基础上,提出了以下几个提高定位性能的改进方法:(1)为最大程度建立适应定位环境的接收信号强度指示与距离之间的信号衰减模型,采用同一采样、单独学习训练以及分段拟合无线信号衰减模型的方式来提高信号强度 RSSI 测距的准确性。(2)利用聚类分析优化策略对采样得到的同一信标节点的信号强度值进行优化,以最大程度规避由多径效应等室内因素产生的噪声对信号强度 RSSI 测距带来的误差;(3)针对传统加权质心算法不足之处,进行了权值优化和距离修正改进,消除了实时定位是异常数据对定位精度造成的影响,增强定位算法在实际应用中的鲁棒性。

1.4 论文结构框架

本文的论文结构安排如下：

第一章：绪论

主要介绍了室内定位方法的基本概念，分析了室内定位系统的研究背景和意义，介绍了国内外定位技术的发展现状和趋势，并在最后说明本文的研究内容等。

第二章：基于无线信号室内定位算法

较为详细的介绍了现有的一些室内定位方法，了解其分别的实现原理，并对它们进行了分类和归纳总结，分析这些室内定位系统方案和算法的优劣，以及提炼现有定位方法所普遍存在的问题，最后简要介绍蓝牙 4.0 室内定位技术。

第三章：基于蓝牙信号室内定位算法

详细介绍了蓝牙室内定位技术，主要包括蓝牙技术的特点、蓝牙软件协议栈部分的主要体系结构以及 iBeacon 技术和工作原理。之后对无线信号室内定位的具体步骤进行了详细阐述。

第四章：基于聚类分析优化的修正距离的室内定位算法

详细介绍了本课题所研究设计的基于聚类算法分析的蓝牙 4.0 RSSI 信号处理优化策略和优化权值及距离修正的四边质心定位算法。本课题对室内定位算法优化的贡献主要体现在四个方面：分段拟合无线信号衰减模型、采用聚类分析策略优化信号强度采样数据、优化加权质心算法的权值以及创新了距离修正定位方案来。这一部分对这四个方面进行了详细说明。

第五章：室内定位系统的实现及实验分析

主要阐明设计的室内定位所使用的微型电脑树莓派 Linux 开发平台、树莓派微型终端上的实现。在布置好 iBeacon 节点的实验室环境下进行数据采集和定位结果的实验验证，通过实验结果分析定位系统的准确性、适应性、鲁棒性等性能。

第七章：总结及展望

对本文提出的室内定位算法作了全面的总结，详细阐述了本课题的创新性和价值性，并对未来工作中可能进一步深入研究的方向进行了展望。

第2章 室内定位工作原理研究

2.1 现有室内定位方案及算法

2.1.1 基于短距离无线通信技术定位方法

基于短距离无线通信技术的定位方法一般需要在室内的定位区域内部署定位相关的基础设施,并需要与之配套的接收器设备,所以一般定位系统的成本比较大。下面根据信号的频段和定位机制的不同将它们分成以下几类,并对它们的实现原理进行简单的介绍:

(1) 红外线定位技术

红外线定位是基于不可见光红外线的一种定位方式,它的工作原理是:待定位红外线发射器发射调制后的红外线,通过在室内的红外线接收装置接收该红外线调制信号并解调进行处理从而得到未知位置信息^[36]。红外线定位的优点是:一,定位精度较高;二,频段范围安全,不受其它电磁波干扰。而红外线定位的缺点是:一,红外线传播距离近,仅在视距范围内传播,而且红外线穿透能力弱,如果红外线发射装置放在狭小空间里,它就难以将红外线发射出去,甚至可能损坏发射装置本身;二,红外线易受光线的影响;三,设备消耗量较大,因为要在室内部署大量的红外线接收装置,而这些装置成本又较高,因此消费成本较大。

(2) 超声波定位技术

超声波定位技术是一种基于测距的定位技术,而测距的方法又是根据到达时间差法进行计算,具体工作流程为:在室内空间部署一定数量超声波接收器,未知位置的超声波发射器向室内空间发射无线电信号,接收应答装置接收到无线电信号后作出回应,发射器根据反馈信号与发送信号的时间差计算出发射器与接受应答装置之间的距离,当同时获取到三个及三个以上不在同一直线上接收应答装置的距离,就可根据三边定位方法求得未知位置信息。

超声波定位技术精度较高,算法及结构简单,且超声波的发射方向可以控制,方向性较强,但缺点是超声波受非视距和多径效应的影响较大,从先天条件上并不适宜室内定位,而且超声波硬件投入成本较高。

(3) 射频识别定位技术

主要通过射频标签(Tag)和读卡器(Reader)构成的RFID系统实现定位。

读卡器通过射频信号进行双向通信读取交换有标签对象的相关信息来获取位置信息。射频识别定位技术的优点是体积小、成本低、定位精度高、反应灵敏。缺点是射频识别信号作用距离短,设备难以整合到智能设备中,普及率不高。

(4) 蓝牙定位技术

室内蓝牙定位技术是目前新兴发展起来的定位技术,其工作原理是:在需定位室内空间中,按科学有效的方法铺放一定数量的蓝牙节点,当蓝牙信号接收装置进入蓝牙覆盖区域获取到蓝牙节点发出的接收信号强度RSSI值,根据室内无线信号衰减传播模型计算出未知节点距离蓝牙节点的距离,然后再根据无线信号定位算法计算出未知位置坐标。

蓝牙室内定位技术的最突出的特质是功耗低、体积小易铺排、终端集成率高,这些将给室内定位解决方案的推广应用带来突破性进展。只需开启所携带的蓝牙设备,便可立即准确的得知用户位置信息。但蓝牙室内定位系统也存在的一定的缺陷,如稳定性差、受多径效应等干扰大。

本课题将研究基于蓝牙4.0低功耗协议(BLE)的室内定位技术。研究内容重点为基于无线信号接收信号强度(RSSI)的室内定位技术。主流的接收信号强度(RSSI)定位方法主要分两类:基于距离信息的定位算法和无需距离信息的定位算法,本文讨论研究基于距离信息的接收信号强度RSSI定位算法。在采用接收信号强度RSSI进行依靠距离信息进行定位的方法中,通常是利用相关的研究模型拟合出接收信号强度RSSI和距离之间的关系映射曲线,从而得到接收信号强度RSSI和距离之间的函数关系式;或者是通过预先数据采集等方法建立接收信号强度RSSI和距离之间的映射关系数据库,在实际测距工作部分再将获取到的接收信号强度RSSI值代入对应的函数关系式或映射关系数据库中,从而计算出其相应的距离,然后根据获取到的多个与距离相关数据(距离值或者角度值等)依靠几何关系,对目标未知节点进行位置定位。

2.1.2 基于惯性导航的室内定位方法

惯性导航系统是一种不依赖外部信息、也不向外部辐射能量的自主式导航系统。根据惯性传感器的参考坐标系的不同可以分为平台式惯性导航系统和捷联式惯性导航系统两大类^[37]。

惯性导航系统一般利用加速度传感器(Accelerometer)、陀螺仪(Gyroscope)、方向传感器(E-Compass)或磁力传感器(Magnetometer)等硬件装置对移动设备进行的位置和方向实时反馈。该定位系统一般需要提供移动设备的初始位置,而移

动的运动方向和速率可通过传感器计算得到。基于惯性导航系统的室内定位方法根据定位算法不同主要分为两大类型：(1) 一种是基于惯性传感器积分定位的方法，它以牛顿力学定律为基础，将测量得到的数据对时间进行积分，可以计算出 x 、 y 、 z 三个维度上的速度、运动角度和位置坐标等信息。(2) 另外一种是基于航位推测法的定位方法，该方法通过学习用户行走的步数、步长和行走方向进行跟踪定位，相比于前一种，该方法具有更精确的定位效果。

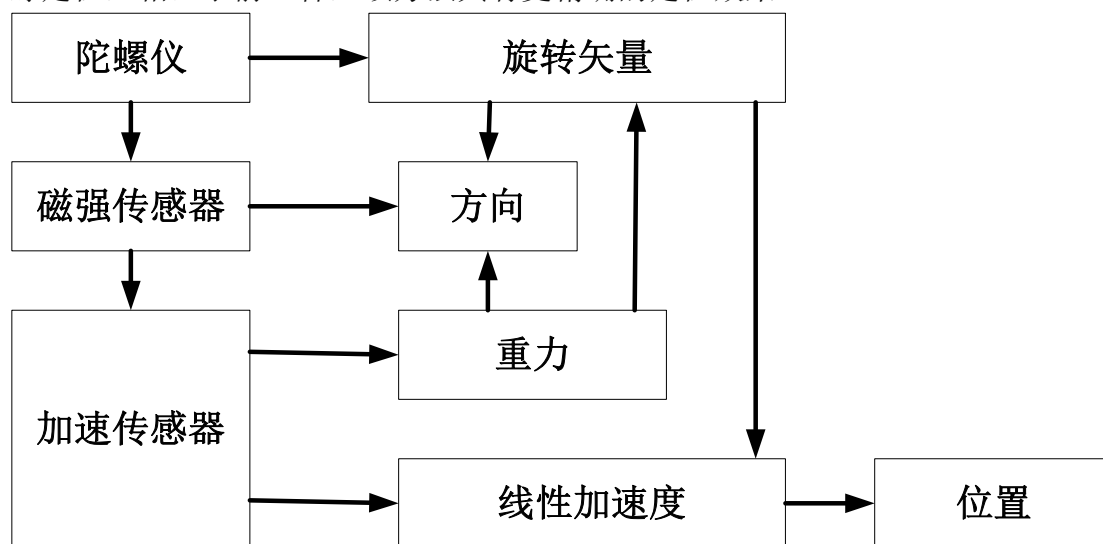


图 2-1 惯性导航算法示意图

基于惯性导航系统的室内追踪系统，其具有很强的自主性、实时性和连续性等优势，但其定位依赖运动的速度和偏航角度这两个因素，因此惯性导航的室内定位追踪系统的定位精度会随时间的推移误差得到累加，定位精度逐渐变差，积无法进行长时间的系统定位。

2.2 无线定位的基本技术

依据距离特性，无线定位技术可以分成基于测距的定位算法和无需测距的定位算法。前者是通过无线信号与距离之间的某种关联，通过学习训练拟合出相关模型用于估算真实距离值，之后依据估算出的距离信息以及相关的几何模型以计算出未知节点坐标信息。后者并不需要进行无线信号与距离之间关系的确立，依靠距离推算的方法进行计算。两种算法相比，前者的定位精确明显优于后者，但后者在成本上更加低廉亲民。

依据时间特性，无线定位的技术可以分成差时型和同步型的。前者的未知节点定位利用时间上差异来进行，未知节点的位置测算首先是从信标节点附近开始

的，逐步向远的区域方向扩散。后者，就是无线传感器网络中的所有节点同时进行未知节点位置信息的计算。两种算法相比，前者的算法存在着误差积增的缺陷，伴随时间的延伸，参与计算的相关信标节点不断增多，累计误差也随之不断加剧，不利于室内定位精度控制。

总之对于具体定位技术的选取，要根据具体情况具体分析，目前尚未出现在室内定位系统中各个指标介处于头筹优势的完善成熟的算法出现。因此需我们重点进行研究。

2.2.1 基于测距技术的定位算法

目前，主流的测距技术主要有：基于到达时间法(TOA)，基于到达时间差法(TDOA)，基于到达角度法(AOA)，和基于信号强度指示法(RSSI)，下面分别介绍这几种测距方法的原理并进行优缺点分析。

(1) 基于 TOA 的测距方法

TOA(Time of Arrival)，即到达时间的测距算法，是通过测量信号在两个信标节点间的传播时间 t ，根据已知的无线信号传播速度 c ，由此得到位置节点与布署的信标节点的距离为 $d = t \cdot c$ ，为了定位未知节点的位置，我们需要三个及三个以上这样的信标节点，当已知未知节点到各个发射节点的距离，就可以通过三边测量关系估算出未知节点的位置，算法具体模型参见下图 2-2：

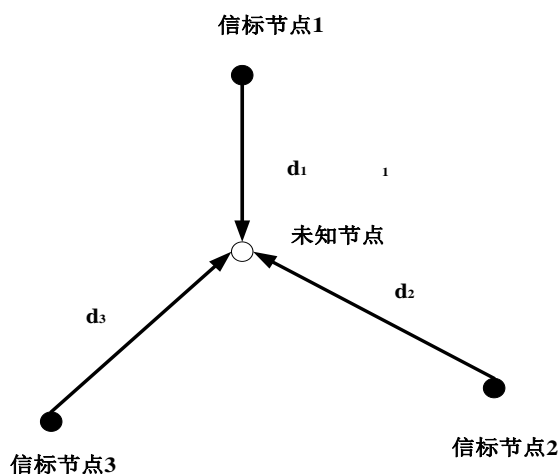


图 2-2 TOA 定位模型

GPS 系统便运用到了这种测距方式，在整个系统中，卫星不断发射导航电文，当用户接收到电文时，通过提取其中的时间并与自己始终做比较，由此计算出与卫星之间的距离。但是由于室内空间距离较短，而无线信号传播速度又极快，所

以非常小的时间差就能使最终结果误差较大，导致多个圆不能相交或相交于一点，还有可能相交于一片区域，因此对时间的要求发射端与接收端有精确的时间同步。但是这样对硬件提出的要求非常高，元器件中的晶振的频率更是需要到纳米级别，由此产生的高额成本违背了室内定位产品的需求，使得 TOA 难以直接运用到室内定位中。

(2) 基于 TDOA 的测距技术

TDOA 即到达时间差测距算法，该算法是 TOA 算法的改进，其又分两种：第一种是通过信标节点发射两种速度不同的信号波，检测两种信号到达未知节点的时间差。第二种是未知节点向周围发射同一种信号，测量信号到不同接收端的时间差，以此来确定信标节点到未知节点的距离。

前者的模型见图 2-3，这种模型要求节点具有两种信号的收发装置，比较常见的是射频信号和超声波信号。与别的方法相比，该方法成本较高，如果是部署大规模的网络，节点装备信号收发装置就需要一大笔资金。其原理如下：信标节点于 T_0 时刻向未知节点发射无线信号，未知节点于 T_1 时刻接收到该信号，然后信标节点在 T_2 时刻向未知节点发射超声波信号，未知节点在 T_3 时刻接收到该信号。无线信号和超声波信号的传播速度分别是 v_1 和 v_2 。设未知节点和信标节点之间的距离是 d ，其计算方法见公式(2-1)。

$$d = [(T_3 - T_1) - (T_2 - T_0)] \times \left(\frac{v_1 v_2}{v_1 - v_2} \right) \quad (2-1)$$

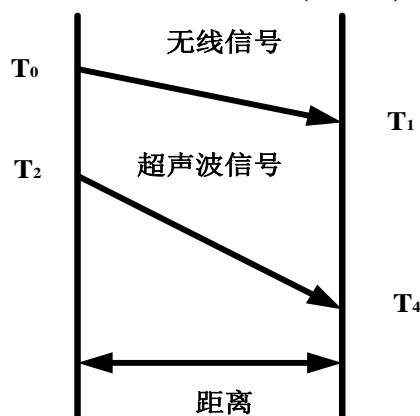


图 2-3 第一种 TDOA 定位模型

第二种 TDOA 定位仅需要各个节点配备一种信号收发器，在某些方面降低了成本，但是却需要各个不同节点之间要时钟同步。其原理为，已知未知节点发射信号到达信标节点 A、B、C 的时间为 t_1 、 t_2 、 t_3 信号的传播速度为 c ，则未知节点与接收端的距离差分别为：

$$\begin{cases} d_{12} = d_1 - d_2 = c \times (t_1 - t_2) \\ d_{13} = d_1 - d_3 = c \times (t_1 - t_3) \end{cases} \quad (2-2)$$

A、B、C 三个接收端分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) ，设未知节点的坐标为 (x_0, y_0) 。可以建立双曲线方程。公式(2-3)通过数学方法对方程求解则可以得到未知节点的位置。

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} - \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} = c \times (t_1 - t_2) \\ \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} - \sqrt{(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2} = c \times (t_1 - t_3) \end{cases} \quad (2-3)$$

求解这个双曲线方程组，可得未知节点的坐标。

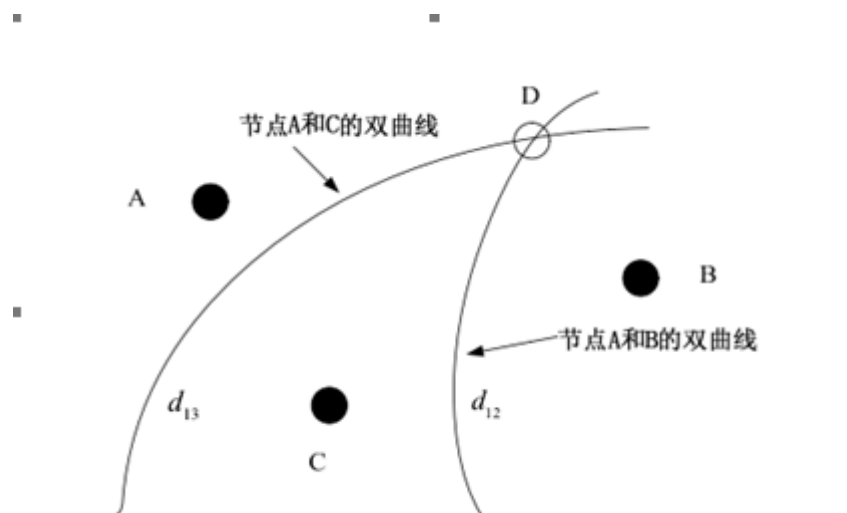


图 2-4 第二种 TDOA 定位模型

(3) 基于 AOA 的测距技术

AOA 即到达角度测距法，其基本原理是利用多个基站来获取用户的未知信息，在 AOA 中，通过接受节点上的特殊硬件设备测量出发射节点信号的到达角度与向对方位，角度是通过不断调控方向天线波束，直到最大的信号长度或者相干相位来得到的。位置通过每个基站轨迹的交汇点计算得出，使用更多的基站能有效的提高精度。系统整体的精度取决于方向采集的精度，以及信号传播精度。

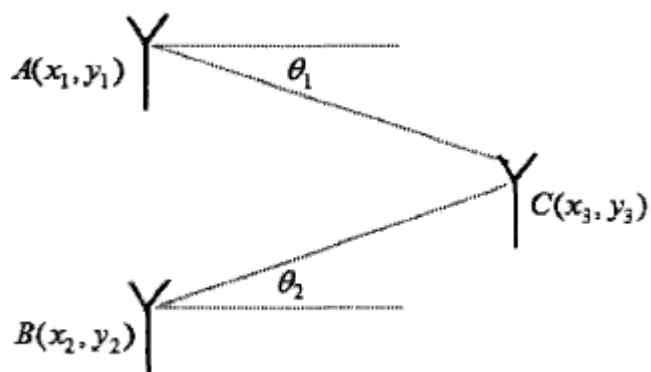


图 2-5 AOA 测距定位原理图

由上图所示几何关系，可以得到：

$$\tan(\theta_i) = \frac{y - y_i}{x - x_i}, i = 1, 2 \quad (2-4)$$

$$\text{展开(2-4)式, } \tan(\theta_i) \cdot x - y = \tan(\theta_i) \cdot x_i - y_i \quad (2-5)$$

由公式(2-5)可知，当锚节点数目较多 ($N \geq 2$) 时，可以利用矩阵知识求解方程组。

$$\text{令 } A = \begin{bmatrix} \tan \theta_1 & -1 \\ \tan \theta_2 & -1 \\ \dots & \dots \\ \tan \theta_n & -1 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} \tan \theta_1 \cdot x_1 - y_1 \\ \tan \theta_2 \cdot x_2 - y_2 \\ \dots & \dots \\ \tan \theta_n \cdot x_n - y_n \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

那么，矩阵方程 $A \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = b$ 的解为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (A^T \cdot A)^{-1} A^T b \quad (2-7)$$

AOA 测量轨迹为直线，如果用户在不同平面内则需要多个基站进行测量，而且针毡所需硬件设备复杂，基站数目要求高，故而不使用于大规模的室内定位需求^[38]。

(4) 基于 RSSI 的测距技术

RSSI 即接收信号强度指示测距法，其原理为：通常无线电信号在传播过程中会随着传播距离的增加而又一定的损耗，其中损耗与传播距离符合相印的数学关系，未知节点检测到发射端的信号强度，通过相应模型转化为两点间的距离，再通过三角形算法计算出未知节点的位置。原理图如图 2-5 所示。

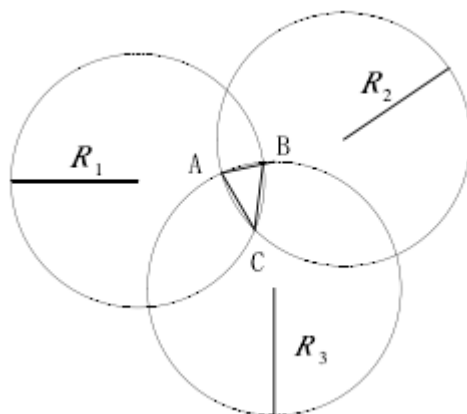


图 2-5 RSSI 测距原理图

现在很多定位节点的芯片中都继承了 RSSI 功能，不需要大量额外的成本，但是实际应用中该方法需要考虑天线增益与信号路径种的干扰等因素。

其中相应的模型主要分为经验模型以及理论模型两种，经验模型需要在各个定位区域检测节点的发射信号强度并进行记录，建立信号强度数据库，在定位是调用数据库信息进行计算。经验模型定位较为准确，但是前期工作不可避免，如果使用期间某项数据发生变化则需要重新测量。理论模型是根据信号的衰减隐私来估计传输距离，但是实际应用中收到环境温度、信号干扰增益等，使得计算距离不太准确，但是当节点位置发生变化不需要重新测定各项参数。

2.2.2 与距离无关的定位算法

(1) DV-Hop 算法

分布式定位方法 DV-Hop(Distance Vector-Hop)是依据最短距离矢量路由方法来计算信标节点与未知节点间在网络拓扑结构中的距离信息，整个定位过程不涉及具体距离值的测定方法。DV-Hop 算法定位具体原理如下：

(1) 计算信标节点与网络拓扑结构中其他信标节点之间的最小跳数:信标节点向网络广播自身位置信息和跳数等信息,通过相邻信标节点接收并转发该信息，且转发一次跳数增 1。网络拓扑结构中所有信标节点均接收到该信息，广播结束，每个信息节点将记录跳数的最小值。

(2) 根据跳数信息估算对信标节点与未知节点的距离:根据信标节点接收到的其他节点的位置和最小跳数信息后，就可推算出网络拓扑结构中平均每跳距离信息,这个距离被称为校正值,它通过如下公式(2-8)获得

$$S_p = \frac{\sum \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2}}{\sum h_p}, p \neq q \quad (2-8)$$

式中, S_p 为信标节点 p 的跳数距离, (x_p, y_p) 、 (x_q, y_q) 分别为信标节点 p 、 q 的坐标, h_p 为信标节点 p 、 q 之间的最小跳数。

未知节点只接收距离它最近的信标节点的平均每跳距离信息, 根据跳数信息, 即可估算出未知节点到信标节点的距离, 如式(2-9)所示。

$$d_{ki} = S_k h_{ki} \quad (2-9)$$

其中, S_k 为未知节点采用的跳段距离, h_{ki} 为未知节点和监测节点间的跳数。

(3) 计算未知节点位置信息: 当未知节点能获取到 3 个或 3 个以上的信标节点距离信息时, 通过极大似然估计法或三边定位法就能计算出目标节点位置信息。

DV-HOP 算法在节点数量较少且均匀分布的环境中, 能够得到较高的定位效果, 并且其算法简单, 硬件设备要求低, 易于实现。但是该算法对网络密度和拓扑结构的要求很高, 并且在计算每跳间距离是存在误差, 随着网络密度的增加会导致误差积累, 因此不利于现实生活中大面积推广。

(2) 位置指纹识别法

位置指纹识别法是通过采样观测各个位置点的接收信号强度 RSSI 值, 再与位置指纹库中信号强度 RSSI 的预期值进行匹配来实现定位的, 如图 2-6 所示。位置指纹识别法分为三个阶段: 第一阶段对定位环境进行无线信号基站的覆盖部署; 第二阶段是离线采样阶段, 对所覆盖区域每个位置进行信号强度采集, 构建一个位置——接收信号强度 RSSI 值唯一对应的指纹数据库; 第三阶段是在线定位阶段, 随着待定位目标所获取到得接收信号强度 RSSI 值与指纹数据库中存储的 RSSI 值进行匹配, 从而显示出待定位目标的估计位置。基于位置指纹识别法所涉及的匹配算法有最近邻法、 k 近邻值法 (kNNSS) 和朴素贝叶斯法等。

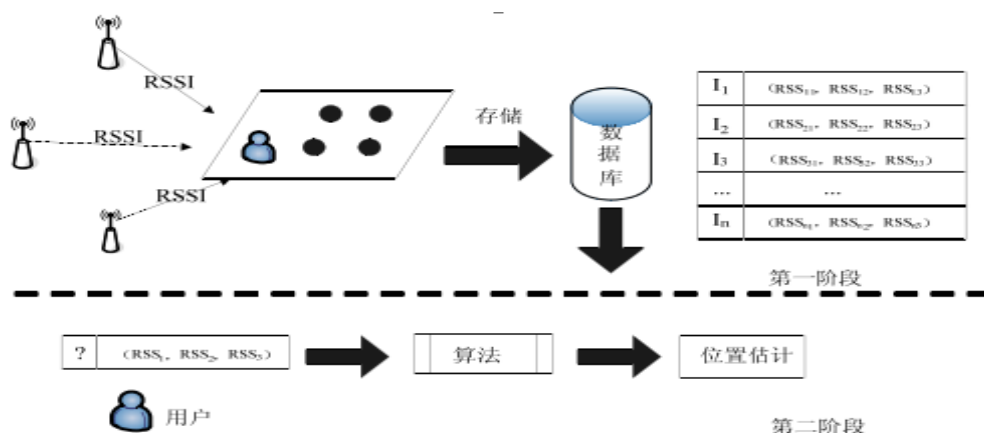


图 2-6 位置指纹识别法室内定位

上图所示可知,位置指纹识别算法主要由三部分构成,即定位覆盖区域、定位匹配算法以及指纹数据库。其中定位覆盖区域是预先将无线传感器布置完备的实验空间;定位匹配算法是依据获取到的信号强度 RSSI 值推算目标位置的技术手段;指纹数据库是在实验空间内通过大量实验训练得到的。

位置指纹识别算法最大的得天独厚的优势在于无需提供其他特定硬件设备、使用成本低、算法简单、易于实现;但在实际环境中,考虑到定位覆盖区域大而导致接收信号强度的预先采集的工作繁琐、指纹数据库的构建工作复杂,因此该算法并不适用于大规模推广。

(3) APIT 算法

近似三角形内点测试法 APIT(Approximate Point-in-triangulation Test),该算法首先通过收集监测节点的信息,将网络覆盖范围内的信标节点分成若干个三角形区域,未知节点通过逐步缩小由信标节点组成的三角形的交叉区域的范围来实现位置估算,算法测试图如图 2-7 所示。

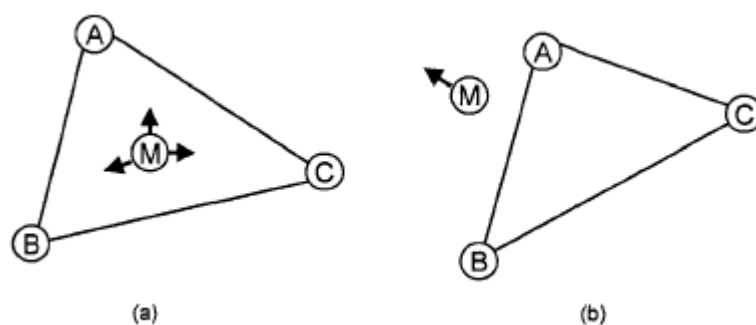


图 2-7 APIT 算法测试图

许多信标节点将所覆盖网络区域分成若干个三角形区域,这样就可以依据未知节点的运动过程变化来逐步缩小锁定未知节点所在三角形区域继而进行位置信息的估算^[39]。其算法核心思想为:如图 2-8 所示,假设节点 M 沿着某一方向运动,对 $\triangle ABC$ 而言,如果未知节点 M 与信标节点 A、B、C 三点的距离同增同减,则说明未知节点 M 在 $\triangle ABC$ 以外,否则就是在 $\triangle ABC$ 范围内。APIT 算法的定位过程为:首先信标节点之间对其本身 ID 等相关信息进行数据交换,而未知节点收集覆盖范围内信标节点的广播信息;在此之后,未知节点通过测试判断是否处于三个信标节点构成的三角形范围内,并对未知节点感知区域内构成的三角形统计计数,计算相关信标节点的交集重叠部分;最后通过对计算重叠区域的质心,来作为未知节点的位置估计坐标。

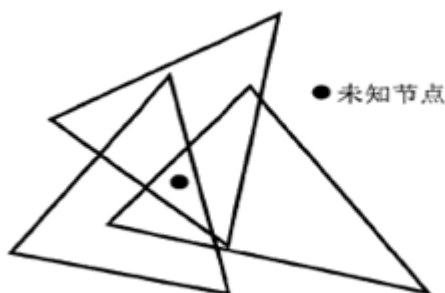


图 2-8 APIT 算法原理图

APIT 算法对于网络拓扑结构的规则性无要求，在随机分布且网络密度高的结构中有较高的定位精度，且其硬件要求不高；当该算法对网络内部连通性要求高，并且对于稀疏分布的网络结构，定位精度不能适应日常生活需要。

2.3 现有定位方法存在的问题

综上所述，可以看到现有的室内定位方法都是各有千秋、优劣共存的现状：在室外环境中已经大范围应用的 GPS 技术，由于卫星信号无法克服障碍物的阻挡，导致定位失效，因此该技术无法适用于室内环境中，即便后来研发的 A-GPS 技术，从一定程度上改善了 GPS 室内定位准确度，这种技术结合网络通信基站定位和 GPS 定位技术，在 GPS 信号较差的场景中进行辅助定位，然而该技术并不能满足室内定位精度的要求^[40]；基于惯性导航系统的定位方法具有自主式的特质，而且依靠微型电子机械技术的发展，传感器设备尺寸缩小至拇指般大小，与此同时价格越来越低，这极大扩展了惯性导航技术的可应用前景，但是由于初始姿态的不确定性、硬件设备本身的构造特性，其在定位过程中会不断累积误差，从而导致定位精度不佳；基于接收信号强度 RSSI 的定位方法利用现有的日益完善的集成设备支持，加之目前绝大部分的硬件设施都支持接收信号强度 RSSI 收发功能，因此利用该方法实现室内定位系统的研发大大降低系统的成本，有利于定位系统的推广和应用，具有一定商业价值。

本课题的研究目标是实现一种成本低、精确度高、面对复杂环境容错能力强、适应性强、有一定商业价值的室内定位方法，并使用移动智能终端来实现。

2.4 本章小结

目前,依靠物联网设备性能的飞速提高和移动互联网的高速发展,大部分新兴的移动设备,例如智能手机、可穿戴设备、平板电脑等,都支持大量先进的微型传感器装置,具有强大的运算能力、处理能力和感知能力,并且随着公共设施的完善,用户可以时时刻刻利用不同方式接入互联网,例如 Wi-Fi, 4G 等等。因此,本课题在对现有室内定位方法进行深入分析的基础上,针对现有室内定位方法存在的缺陷,同时结合现有的发展现状,提出了基于蓝牙 4.0 协议栈利用微型卡片式电脑树莓派来完成室内定位的方案,并提供具体优化方案:(1) 基于 RSSI 的测距算法:该部分测距方法依靠移动终端树莓派利用无线通信蓝牙 4.0 协议栈获取信标节点 iBeacon 的广播 RSSI 值和信标节点的自身信息(ID、发射功率等),并对采样 RSSI 数据以及无线信号衰减模型进行优化处理,提高测距部分精确度。(2) 优化定位算法:在现有的经典定位算法的基础上,对定位过程中导致误差产生的重点部分进行分析,提出优化处理方案。本课题尝试从优化测距和定位算法这两方面相结合的方式室内定位工作,对室内定位算法的精确度、适应性和鲁棒性都有所提高。

具体的研究方案:为解决单纯的 RSSI 测距算法或室内定位算法精度偏低的问题,可以将无线信号测距和定位算法的优化方案融合使用,以获取更高的定位性能。针对基于 RSSI 的测距方法可从采样数据入手,利用滤波算法对其进行处理,并对路径距离损耗公式进行分段处理来提高定位环境的适应性。针对定位算法部分,通过大量实验优化算法中的权值因子以及对参与定位算法中的距离信息进行修正。通过从以上两个方面对室内定位算法的性能进行改进。

第3章 基于蓝牙4.0室内定位算法

3.1 蓝牙室内定位框架

随着经济建设的逐步发展，室内场所的面积也越来越大。大型商场、办公场所和娱乐场所等的出现更是吸引着人们在日常生活中，更多地停留在室内环境，与此同时，人们对于室内导航、指示或是促销等基于位置服务的需求也就越发强烈。在不增加额外设备负担的前提下，基于用户移动终端的室内定位方案呼声越来越高。随着苹果所提出的 iBeacon 技术之后，利用蓝牙 4.0 协议进行室内定位是研究的热点之一。

3.1.1 蓝牙技术特点

蓝牙是一种短程宽带无线电技术，是实现语音和数据无线传输的全球开放性标准。蓝牙技术使用跳频扩谱（FHSS）、时分多址（TDMA）、码分多址（CDMA）等先进技术，在小范围内建立多种通信与信息系统之间的信息传输。其核心功能是建立普遍适用的无线信号接口及其控制软件的公开标准，使通信技术与计算机更深入融合，使不同制造商生产的移动设备在没有电线或电缆相互连接的情况下，能够在近距离区域内齐备互用、互操作的性能。

蓝牙技术的特点^[41]可归纳为以下几项：

（1）全球范围适用：蓝牙工作在 2.4GHz 的工医科领域（ISM）频段，符合世界大部分国家的 ISM 频段范围，该频段无需许可证且无需缴费；

（2）近距离通信：蓝牙技术根据其功率等级不同，其通信有效范围位 1-100m，可以满足不同设备需要；

（3）抗干扰能力和安全性：蓝牙采用自适应跳频方式，最大程度避免和其他 2.4 GHz ISM 频段无线技术的串扰，并且所有数据包都使用 24-bit CRC 校验，确保最大程度抵御干扰；与此同时，蓝牙使用 AES-128 CCM 加密算法进行数据包加密和认证，以保证链路级的安全；

（4）同时传送语音、数据：蓝牙采用电路交换和分组交换业务，支持异步数据通道、三路并发同步语音通道以及同时传送异步数据与同步语音的通道；

(5) 支持建立临时对等通信：蓝牙设备按照特定方式可组成两种网络：微微网（Piconet）和分布式网络（Scatternet），其中微微网的简历由 2 至 8 台设备组成，且网络中只有一台主设备（Master），余下均为从设备（Slave）；几个相互独立的微微网一特定方式连接在一起构成分布式网络。所有的蓝牙设备都是对等的，因此在蓝牙技术中不存在基站的概念。

(6) 功率低体积小：蓝牙产品输出功率很小，仅是微波炉使用功率的百万分之一，是移动电话的一小部分。

3.1.2 蓝牙 4.0 协议栈体系结构

在蓝牙系统中，为了支持远端设备对于不同应用所需要不同的协议栈，将大部分关键协议依照SIG的关注程度、按层次进行定义和划分，构成了蓝牙协议栈。蓝牙协议栈是蓝牙技术的核心骨干部分，其主要目的是允许遵循规范的蓝牙应用之间能够进行相互操作和数据交换。

蓝牙协议栈体系结构为分层结构，具体如图 3-1 所示

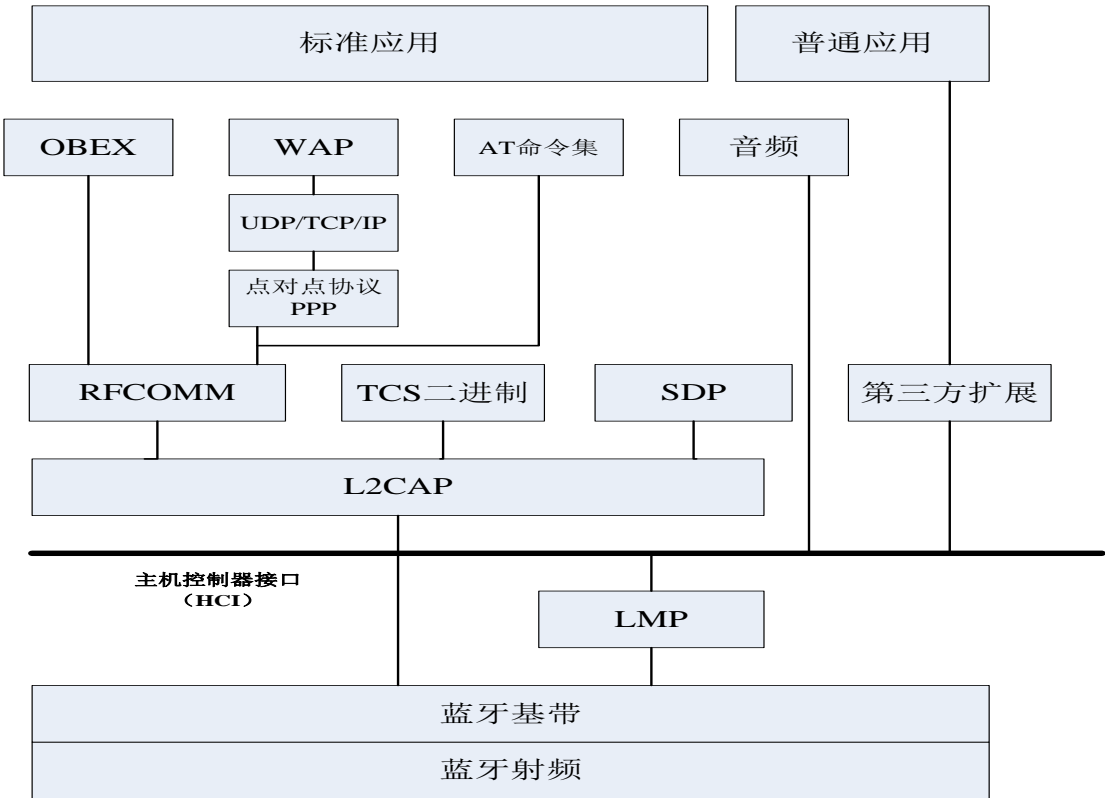


图 3-1 蓝牙协议栈体系结构

按照各层协议在整个蓝牙协议体系中所处的位置，蓝牙协议可分为底层协议、中间层协议和高层协议三大类^[42]。

1、蓝牙底层协议

蓝牙底层协议主要负责蓝牙数据流的设备链路的建立、拆除、安全和控制，是蓝牙协议体系的基础，它包括射频协议、基带协议和链路管理协议^[42]。

射频协议层，它主要定义了蓝牙模块应具备的需求，通过 2.4GHz 无需许可证的工医科领域（ISM）频段，完成信息数据流的过滤和传输^[42]。基带协议层负责跳频和蓝牙数据及信息帧的传输。射频协议层与基带协议层共同构成了蓝牙协议栈的物理层。链路管理层负责链路连接设置、认证、配置等功能，链路管理器可识别远程链路管理器，并与它们通过蓝牙主机控制器接口（HCI）进行消息和数据传递。

2、中间协议层

中间协议层主要由逻辑链路控制与适配协议（L2CAP）、服务发现协议（SDP）、串口仿真协议（RFCOMM）和电话控制协议规范（TSC）等组成^[42]。其中蓝牙协议栈的核心协议——逻辑链路控制与适配层协议（L2CAP）位于基带的上层，主要负责协议复用、分段重组、服务质量认证和组提取等功能的实现，为上层应用提供服务，是上层协议实现的基础。服务发现协议（SDP）是蓝牙技术框架不可或缺的一层，是应用模型的基础，为上层应用业务模式提供了一种动态的方式来发现、建立网络中所需要的服务的通信信道。RFCOMM 用来实现设备间的串行通信，从而对现有使用串行线接口的应用提供了支持服务。TCS 位于 L2CAP 层之上，主要负责提供蓝牙设备之间呼叫话音的控制信令。

3、高层应用协议

蓝牙高层协议包括对象交换协议（OBEX）、无线应用协议（WAP）和音频协议^[42]。对象交换协议用于支持设备间对象交换，并提供与 HTTP（超文本传输协议）相同的功能；WAP 主要功能是在数字蜂窝电话和一些小型无线设备中实现 Internet 的相关业务；蓝牙音频（Audio）是面向应用层，通过在基带上直接传输 SCO 分组而实现的。除此之外，高端应用层还包含点对点协议（Point-to-Point Protocol, PPP）、传输孔式协议/网络层协议（TCP/IP）、用户数据包协议（User Datagram Protocol, UDP）等。

3.1.3 iBeacon 技术及工作原理

iBeacon 是苹果公司 2013 年 9 月发布的移动设备用 OS（iOS7）上配备的新

功能。其工作方式是，配备有低功耗蓝牙（BLE）通信功能的设备使用 BLE 技术向周围发送自己特有的 UUID，接收到该 UUID 的应用软件会根据该 UUID 采取一些行动^[43]。苹果 WWDC 14 之后，对 iBeacon 加大了技术支持和对其用于室内地图的应用有个更明确的规划。苹果公司公布了 iBeacon for Developers 和 Maps for Developers 等专题页面。iBeacon 技术作为利用低功耗蓝牙技术研发者，有不少团队对其进行研究利用。

iBeacon 工作流程，实现分如下四个步骤：

第一步：服务提供者向云端申请服务，数据服务器生成一个 iBeacon ID，并将其映射到服务提供者提供的服务，再将 iBeacon ID 告诉服务提供者；

第二步：服务提供者把第一步拿到的 iBeacon ID 设置到 iBeacon 设备上，让 iBeacon 设备广播该 iBeacon ID；

第三步：用户在该 iBeacon 设备的信号范围内打开相应 APP，APP 获取到该 iBeacon ID；

第四步：APP 通过第三步拿到的 iBeacon ID，向数据服务器拉取相应的服务，展示在 APP 界面，即用户获取到的商家推送的各种信息；

iBeacon 使用的是 BLE 技术，利用的是 BLE 中名为“通告帧”（Advertising）的广播帧^[44]。通告帧是定期发送的帧，只要是支持 BLE 的设备就可以接收到。iBeacon 通过在这种通告帧的有效负载部分嵌入苹果自主格式的数据来实现。iBeacon 的数据主要由四种资讯构成^[45]，分别是 UUID（通用唯一标识符）、Major、Minor、Measured Power。UUID 是规定为 ISO/IEC11578: 1996 标准的 128 位标识符；Major 和 Minor 由 iBeacon 发布者自行设定，都是 16 位的标识符。比如，连锁店可以在 Major 中写入区域资讯，可在 Minor 中写入个别店铺的 ID 等。另外，在家电中嵌入 iBeacon 功能时，可以用 Major 表示产品型号，用 Minor 表示错误代码，用来向外部通知故障；Measured Power 是 iBeacon 模块与接收器之间相距 1m 时的参考接收信号强（RSSI: Received Signal Strength Indicator）。接收器根据该参考 RSSI 与接收信号的强度来推算发送模块与接收器的距离。苹果将距离简单分为 3 级，采用贴近（Immediate）、1m 以内（Near）、1m 以上（Far）三种距离状态。距离在 1m 以内时，RSSI 值基本上成比例减少，而距离在 1m 以上时，由于反射波的影响等，RSSI 不减少而是上下波动。也就是说，相距 1m 以上时无法推断距离，因此就简单判定为 Far。

设备对接收到的 iBeacon 信号进行解释后，向等待 iBeacon 资讯的所有应用软件发送 UUID、Major、Minor 及靠近程度。发送的靠近程度资讯是 Immediate、Near、Far 中的一种。

接收资讯的应用软件先确认 UUID，如果确认是发送给自己的资讯，则再根据 Major、Minor 的组合进行处理。

3.2 无线信号传播模型

3.2.1 自由空间传播

在理想条件下,无线信号接收信号强度随着距离增加呈 α 次幂减小。如果无线信号发送功率 P_t 发射 d 米距离后,其接收信号强度将与 $P_t d^{-\alpha}$ 成比例降低^[44]。经研究推导,在自由空间接收信号强度中随着距离的平方幂指数 ($\alpha=2$) 而变化。当天线发射信号时,信号能量会均匀扩散至各个方向上,即扩散范围是半径为 d 的球面,信号强度密度等于发射信号功率与球面积 $4\pi d^2$ 之比。因此,在理想状态下,信号发射功率和接收功率之间的关系如下(3-1)式所示:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3-1)$$

这里的 G_t 和 G_r 分别为从发射端到接收端方向增益; d 是收发之间的距离; 载波波长为 $\lambda = \frac{c}{f}$, c 是光速 ($3 \times 10^8 m/s$), f 载波频率。

把 $P_0 = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2$ 作为 $d=1m$ 的接收信号强度,则公式可简化为 $P_r = \frac{P_0}{d^2}$

用分贝 (dB) 形式可表示为如下公式(3-2):

$$10\lg(P_r) = 10\lg(P_0) - 20\lg(d) \quad (3-2)$$

3.2.2 阴影衰落模型

由于接收信号在现实环境中会遇到大型建筑物、起伏的地形、树木花丛等其他物体的障碍而使得接收信号强度进一步遭遇衰减的现象称为阴影衰落或慢衰落。考虑室内定位在比如会存在该种衰落因素,对公式计算路径损耗进行修改,如下式(3-3)所示增加一项随机分量

$$10\lg(P_r) = 10\lg(P_0) - 10\alpha\lg(d) + X \quad (3-3)$$

这里的 X 是一个均值为 0 的高斯随机变量,及高斯概率密度函数的公式为

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3-4)$$

式中, a 是平均接收信号强度, σ 是标准偏差。

在 $d_0 = 1m$ 时,该模型可简化为公式(3-2),其中 A 为实际环境中距离接收器

1m 时的平均信号强度值（包含了正态随机变量 X ）。

$$RSSI = -(10\alpha \lg^d + A) \quad (3-5)$$

A 和 α 的值是随环境变化而变化的，在无线信号传输的实际过程中，很容易受到环境因素的干扰，比如多径、绕射、障碍物、温湿度变化等因素的影响，如果对于不同区域采用同一种环境参数值，将对测距结果造成很大的误差。为了使 $RSSI$ 测距模型能尽量如实地体现室内环境的传播特性，以确保最终的定位精度的准确，要对 A 和 α 的值进行参数优化，得到最合适的环境参数。实际应用中，可采用最小二乘法的方式拟合得到当前环境的参数。

3.2.3 无线信号传播模型拟合方法

最小二乘法，又称最小平方法，是一种常用的数学优化技术。它通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配^[45]。其基本原理如下，假设 x 的任意 M 个特定函数的线性组合，例如 x 的函数为 $1, x, x^2, \dots, x^{M-1}$ ，这种情况下，他们的一般线性组合为

$$y(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_Mx^{M-1} \quad (3-6)$$

这种模型的一般形式是

$$y(x) = \sum_{k=1}^M a_k X_k(x_i) \quad (3-7)$$

其中 $X_1(x), \dots, X_M(x)$ 是 x 的任意函数，成为基函数。

对于这种线性模型，定义优值函数(3-8)：

$$L = \sum_{i=1}^M \left[\frac{y_i - \sum_{k=1}^M a_k X_k(x_i)}{\sigma^2} \right]^2 \quad (3-8)$$

将上式中的 L 对 M 个参数 a_k 求偏导，并令之等于 0，将求得 L 的最小值。将得到 M 个方程(3-9)：

$$0 = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma^2} [y_i - \sum_{j=1}^M a_j X_j(x_i)] X_k(x_i) \quad k = 1, \dots, M, \quad (3-9)$$

交换求和顺序，可将上式写成矩阵方程(3-10)：

$$\sum_{j=1}^M \alpha_{kj} a_j = \beta_k \quad (3-10)$$

其中， $\alpha_{kj} = \sum_{i=1}^N \frac{X_j(x_i) X_k(x_i)}{\sigma^2}$ ，或者等价 $[\alpha] = A^T \bullet A$ ， $[\alpha]$ 是一个 $M \times M$ 矩阵，

且 $\beta_k = \sum_{i=1}^N \frac{y_i X_k(x_i)}{\sigma^2}$ 或者等价 $[\beta] = A^T \bullet b$, $[\beta]$ 是一个长为 M 的向量。其中

$$A = \begin{bmatrix} \frac{X_1(x_1)}{\sigma} & \frac{X_2(x_1)}{\sigma} & \dots & \frac{X_M(x_1)}{\sigma} \\ \frac{X_1(x_2)}{\sigma} & \frac{X_2(x_2)}{\sigma} & \dots & \frac{X_M(x_2)}{\sigma} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{X_1(x_N)}{\sigma} & \frac{X_2(x_N)}{\sigma} & \dots & \frac{X_M(x_N)}{\sigma} \end{bmatrix}, \quad b = (y_1, y_2, \dots, y_N) \quad (3-11)$$

上式被称为最小二乘法的正规方程组。用矩阵形式表示可写为

$$[\alpha] \bullet a = [\beta] \text{ 或 } (A^T \bullet A) \bullet a = A^T \bullet b \quad (3-12)$$

逆矩阵 $C_{jk} = [\alpha]_{jk}^{-1}$, 它和被估计参数 a 的不确定度有密切联系, 为了估算不确定度, 考虑

$$a_j = \sum_{k=1}^M [\alpha]_{jk}^{-1} \beta_k = \sum_{k=1}^M C_{jk} \left[\sum_{i=1}^N \frac{y_i X_k(x_i)}{\sigma^2} \right] \quad (3-13)$$

根据公式中 a_j 方差, 可得

$$\sigma(a_j) = \sum_{i=1}^N \sigma^2 \left(\frac{\partial a_j}{\partial y_i} \right)^2 \quad (3-14)$$

因 α_{jk} 和 y_i 是相互独立的, 因此 $\frac{\partial a_j}{\partial y_i} = \sum_{k=1}^M C_{jk} X_k(x_i) / \sigma^2$, 计算得

$$\sigma^2(a_j) = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M C_{jk} C_{jl} \left[\sum_{i=1}^N \frac{X_k(x_i) X_l(x_i)}{\sigma^2} \right] \quad (3-15)$$

因 $[\alpha]$ 是矩阵 $[C]$ 的逆矩阵, 因此

$$\sigma^2(a_j) = C_{jj} \quad (3-16)$$

3.3 RSSI 数据信息处理策略

室内环境是非常复杂的, 无线信号会受到障碍物遮挡, 多径效应及电磁噪声等多种环境干扰因素的影响, 同一信标同一距离处的 RSSI 值往往会存在异常值出现较大波动。RSSI 值的随机性必然会导致计算出的距离误差很大, 从而影响定位精度。为此, 对实验数据 RSSI 值进行滤波处理尤显重要。其中常用的滤波方法有统计中值滤波、高斯均值滤波和卡尔曼滤波等^[46]。

3.3.1 中值滤波

典型的非线性滤波方法，其算法主要依据排序统计理论，将获取到的采样数据进行排序，并采用该序列中的中值作为采样数据的优化值，从而消除孤立噪声影响。算法简单、易实现，在滤除脉冲噪声的同时很好的保留了数据信号的细节信息。

3.3.2 高斯均值滤波

高斯滤波是为了消除 RSSI 测量值中随机干扰，滤除掉其中误差较大的干扰值。它的原则是将同一位置测量的 RSSI 值中渗杂的高斯随机干扰，利用高斯滤波曲线出现高概率范围中的 RSSI 值。高斯滤波模型如下(3-17)：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-17)$$

$$\text{其中：} \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{RSSI}_i, \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\text{RSSI}_i - \mu)^2。$$

通常选择概率大于 0.6 范围内的 RSSI 值，作为发生概率相对较高的取值范围，因此由 $0.6 < f(x) < 1$ ，得到 $\text{RSSI} \in [0.15\delta + \mu, \mu + 3.09\delta]$ 范围的 RSSI 值，放入新的数组 `GuassRSSI[]` 中，在对该数组中的 RSSI 值进行均值滤波处理。

均值滤波优化策略是将经过高斯滤波有效过滤了远离真实值的数据，但剩余数据中仍有一定的波动，导致定位精度不稳定，因此将高斯滤波后剩余的有效值进行均值滤波，取其算术平均值作为最终的 RSSI 值有效提高了 RSSI 测距的可靠性和合理性，为进一步估计实际距离奠定了基础。校正后的 RSSI 值如下：

$$\text{RSSI} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \text{GuassRSSI}[i] \quad (3-18)$$

3.3.3 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波是目前广泛使用的解决数据信号处理的优化策略。该算法以最小均方差为准则最佳线性估计问题，卡尔曼滤波模型不要求信号和噪声都是是否是平稳信号的假设条件。他不需要对全部过去的数据进行观察，只需根据每个时刻的前一个估计值和最近一个观察数据就可用来估计信号的当前值，这种滤波方法使用状态空间法描述系统，即由状态方程和量测方程组成。

以上阐述了几种常用的接收信号强度（RSSI）数据处理策略、原理，每种算

法都有千秋，没有哪一种是完美无瑕的，比如中值滤波，其算法简单，易实现，但是对实时数据处理效果不佳，而高斯均值滤波的数据处理能力提高很多，但是复杂度有所提高，增加了能耗与时间代价，同时占用了更多内存空间。实际应用中要根据具体情况具体分析，协调各方面需求，选择最适宜的数据处理策略，也可融合多种算法，以达到最佳的滤波效果。

3.4 基于无线信号定位

定位算法是室内定位技术的核心，其主要作用于蓝牙软件层中的应用层，而其余的 OSAL 操作系统、蓝牙软件、蓝牙协议等都是最终为定位算法服务的^[47]。目前，主流的室内定位算法包括：三边测量法、三角测量法、加权质心算法和极大似然估计法，下面分别进行详细讲解。

3.4.1 三边测量法

在基于测距的定位算法中，三边测量法是比较简单的算法，算法原理为：同一平面上有三个及三个以上（以三个为例）不共线的信标节点 A、B、C 和一个未知节点 D，并已计算得到三个节点到未知节点 D 的距离分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 ，则以这三个已知信标节点坐标为圆心，三信标节点到未知节点距离为半径可以画出三个相交的圆，如图 3-2 所示，未知节点坐标即为三圆相交点。

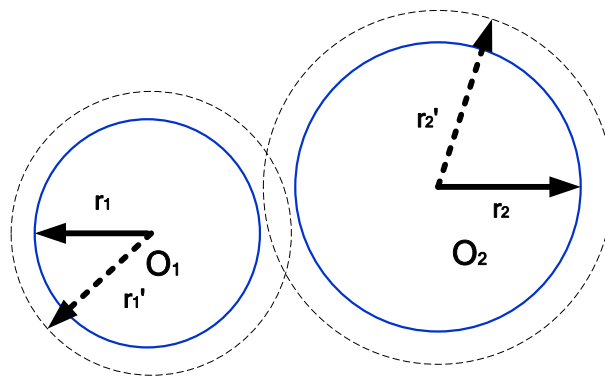


图 3-2 三边测量法几何关系

假设三个信标节点的坐标分别为 $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$ 、 $C(x_3, y_3)$ ，未知节点

坐标为 $D(x_4, y_4)$ ，则根据几何关系可得：

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2} = R_1 \\ \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2} = R_2 \\ \sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2} = R_3 \end{cases} \quad (3-19)$$

解该方程组可得：

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2(x_1-x_3) & 2(y_1-y_3) \\ 2(x_2-x_3) & 2(y_2-y_3) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_1^2-x_3^2+y_1^2-y_3^2+R_3^2-R_1^2 \\ x_2^2-x_3^2+y_2^2-y_3^2+R_3^2-R_2^2 \end{pmatrix} \quad (3-20)$$

该解即为未知节点 D 的坐标位置。然而，在实际测量中，往往由于测量的误差，信标节点的感知交集不是一个点，而是一个区域，未知节点就在该区域内，如图所示。在此种情况下，便需用其他算法进行求解，如极大似然估计法、三角形质心算法等。

3.4.2 三角测量法

三角测量法是基于非测距的算法，算法原理为：当同一平面上有三个及三个以上（以三个为例）不在同一直线上的信标节点 A 、 B 、 C 和一个未知节点 D ，已知未知节点相对于三个信标节点的角度，即已知 $\angle ADB$ ， $\angle ADC$ 和 $\angle BDC$ ，则根据角 $\angle ADB$ 和未知节点 D 可唯一确定一个圆 O_2 ，根据 $\angle ADC$ 和未知节点 D 可唯一确定一个圆 O_1 ，根据 $\angle BDC$ 可唯一确定一个圆 O_3 ，如图 3-3 所示。

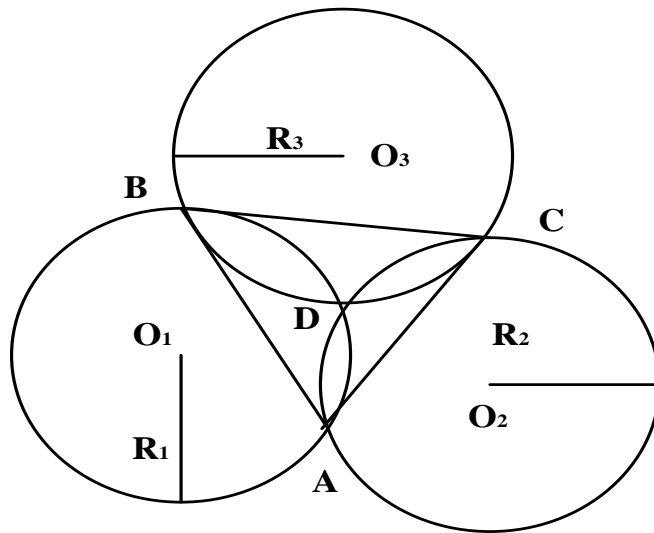


图 3-3 三角测量法几何关系

根据几何关系求解方程组，可得圆 O_1 的圆心坐标和半径，同理可解得圆 O_2 和

3.4.3 质心算法

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x_A + x_B + x_C}{3} \\ y = \frac{y_A + y_B + y_C}{3} \end{array} \right. \quad (3-21)$$

3.4.4 极大似然估计法

$$\left\{ \begin{array}{l} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = d_1^2 \\ \dots\dots\dots \\ (x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 = d_n^2 \end{array} \right. \quad (3-22)$$

29

$$X=[x,y]^T$$

然后再通过最小二乘法可得方程组解为 $X = (A^T A)^{-1} A^T B$ 即为未知节点坐

该方法设备、算法简单,影响定位精度的因素主要是计算已知节点到未知节点的距离的准确度的高低^[48],而计算距离的方法可以是到达时间法,RSSI 值法等,因此该方法灵活性较大,可以根据具体环境选用最合适的算法。

第4章 基于聚类分析优化的距离修正室内定位算法设计

为了提高定位的精度，关键在于 RSSI 筛选优化策略是否快速有效。在定位测距阶段，RSSI 观测值是计算时主要考虑的数据。由于 RSSI 观测值在收集时随着时间轴杂乱的分布在整个坐标系，无法事先预估其规律，无法定义进行分类，所以如何筛选出最符合当时环境的 RSSI 数据，成为主要目标，也是本章重点。

本文优化算法框架为：4.1 系统架构总览；4.2 分段拟合无线信号衰减模型，得出 RSSI 值和距离转换关系，该关系式是之后测距运算的基础；4.3 利用高斯混合模型（GMM）分析 K 取不同值时（分簇的个数不同），接收到的 RSSI 原始数据，再用 EM 算法确定各个分簇情况的参数，以及每个分簇情况的概率密度函数，为接下来的 AIC 评估提供计算数据；4.4 通过赤池信息量准则（AIC）选择更符合实验场景现状的分群方式（既确定 K 的取值），选取最优数据进行测距，为接下来的定位运算做准备；4.5 运用四边定位算法进行定位计算。

4.1 系统架构

室内定位系统分为前期拟合距离公式，同时收集原始数据包含 UUID、POWER 和 RSSI 值。中期通过高斯混合模型（GMM）对 RSSI 观测值进行建模，并利用 EM 算法分别计算 $K=1/2/3$ 三种不同分布的各项参数，传入赤池信息量准则（AIC）模块，选择更符合实验场景现状的分群方式（既确定 K 值），完成对 RSSI 观测值的优化筛选，选取最优数据进行测距。后期运用优化权值距离修正的四边定位算法进行空间几何计算，最终获得定位坐标。其流程图 4-1 如下：

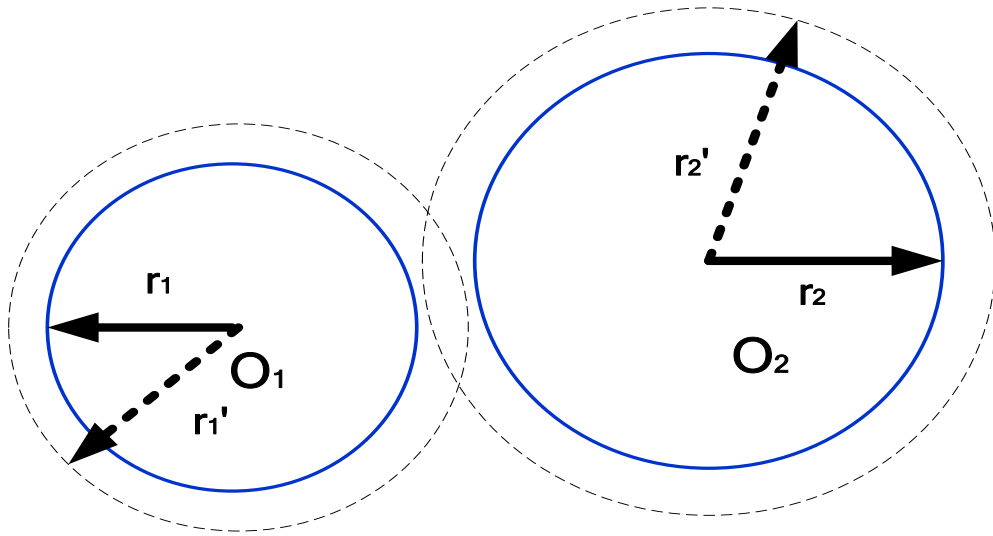


图 4-1 定位系统流程图

4.2 分段拟合无线信号衰减模型

由于无线通信信号在定位节点与参考节点之间存在障碍物时会受到反射、衍射、多径效应等诸多因素的影响，特别是在室内这种空间狭小、布局复杂的环境下，通信距离增加之后上述因素会加剧 RSSI 值测量的不准确性^[49]。通过大量数据分析发现，当通信距离超过一定范围时，定位误差开始明显增加，但通信距离在之内时定位误差呈现对称波动的趋势。因此，寻找出针对节点有效区域的阈值，并对通信距离进行优化是非常关键的一步，基于此结论提出基于预先学习训练数据研究对无线信号传播最大合理位置设置阈值。而对于长距离试验覆盖范围使用该阈值作为临界距离将作为分段处理无线信号衰减模型拟合的转折点。

实现步骤如下：

(1) 根据蓝牙信标节点的部署位置，划定采样点，进行数据采集，并对数据进行聚类分析高斯混合滤波处理。

(2) 根据数据中信标节点的 UUID 不同进行隔离训练，并画出其初步的传播模型曲线。

(3) 根据每个信标节点的传播模型参数，设置合理的分段阈值，即设置临界点的值。在本实验中，我们将蓝牙信标节点传输范围设定为 8 米左右，我们将每个蓝牙信标的传播模型曲线中 4 米对应的作为分段阈值。

(4) 按照每个信标节点的分段阈值，对滤波后小于等于阈值的采样点和大于阈值的采样点分别再次进行训练，使得每个信标节点得到以阈值为分界点的两个传播模型。

4.3 聚类分析高斯混合模型优化策略

传统的聚类分析算法有很多种，如划分方法(partitioning methods)、层次方法(hierarchical methods)、基于密度的方法(density-based methods)、基于模型的方法(model-based methods)、基于网格的方法(grid-based methods)等^[50]。其中比较常用的像 K-MEANS 算法，接受输入量 K ，然后将 n 个数据对象划分为 K 个类以满足以下条件：同一类中的物件相似度较高；而不同类中的物件相似度较小。类内相似度是该类中所有对象与质心距离的均值。

4.3.1 高斯混合模型

利用接收信号强度 RSSI 测距时，由于室内环境中干扰的存在以及多径效应、非视距等影响，同一信标同一距离处的 RSSI 值往往会存在异常值出现较大波动，如图 4-2 所示，这些异常值会干扰定位精度，本文中设计了基于聚类算法分析的高斯混合滤波的 RSSI 信号处理优化策略，滤除因多径效应、非视距等产生的噪声，排除信号散射、多路径等因素给实验结果带来的误差，提高了测距精度，增强了定位信息的准确性。

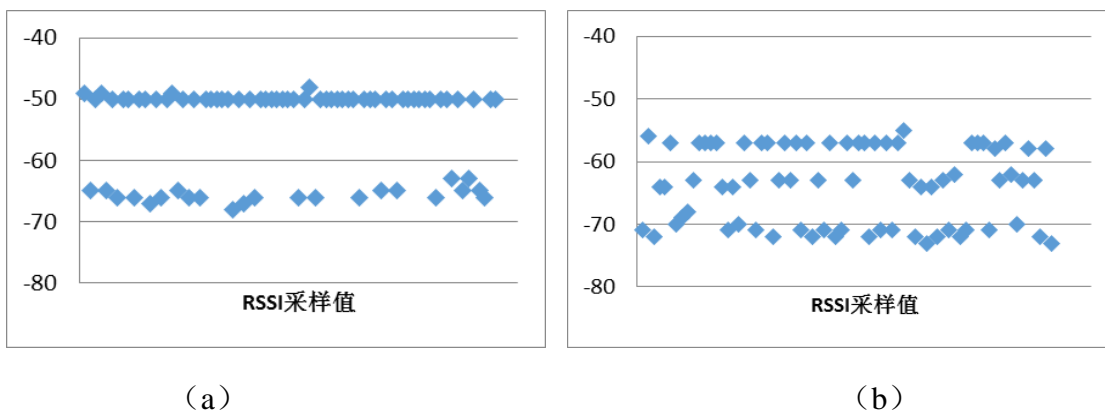


图 4-2 RSSI 采样值分布情况

根据实验观测到的 RSSI 观测值的分布状态,可以发现获取到的信号强度 RSSI 值是分区域分布的,这是由于多径效应的存在,使得真实的 RSSI 数据中掺杂了经过反射、衍射、折射等 RSSI 值的噪声。基于以上分析,本课题选择高斯混合模型(Gaussian Mixture Model)。高斯混合模型就是用多个高斯概率密度函数(正态分布曲线)精确地拟合观测数据,将观测数据分解为若干高斯概率密度函数(正态分布曲线)的模型。不论是任何种类分布,只 K 取得足够大,这个 Mixture Model 就会变得足够复杂,就可以用来逼近任意连续的概率密度分布。使用若干个高斯分布组合来分析采样数据而成,是由于高斯函数具有良好的计算性能,可以很方便的确定参数,所以高斯混合模型被广泛地应用。

高斯混合模型的分布函数如下:

$$\Pr(x) = \sum_{k=1}^K \pi_k N(x_k; \mu_k, \sigma_k^2) \quad (4-1)$$

$$\text{其中 } \pi_k = \frac{N_k}{N}$$

如公式(4-1), K 需要事先确定好,就像 K-means 中的 K 一样。 π_k 是权值因子。其中的任意一个高斯分布 $N(x_k; \mu_k, \sigma_k^2)$ 叫作这个模型的一个分簇类,即在只有 RSSI 样本点,不知道样本分类(含有隐含变量)的情况下,估计模型参数 $(\pi_k, \mu_k, \sigma_k^2)$, 该问题可以用 EM 算法来求解。下图 4-3 为高斯滤波分布于高斯混合滤波分布模型的对比。

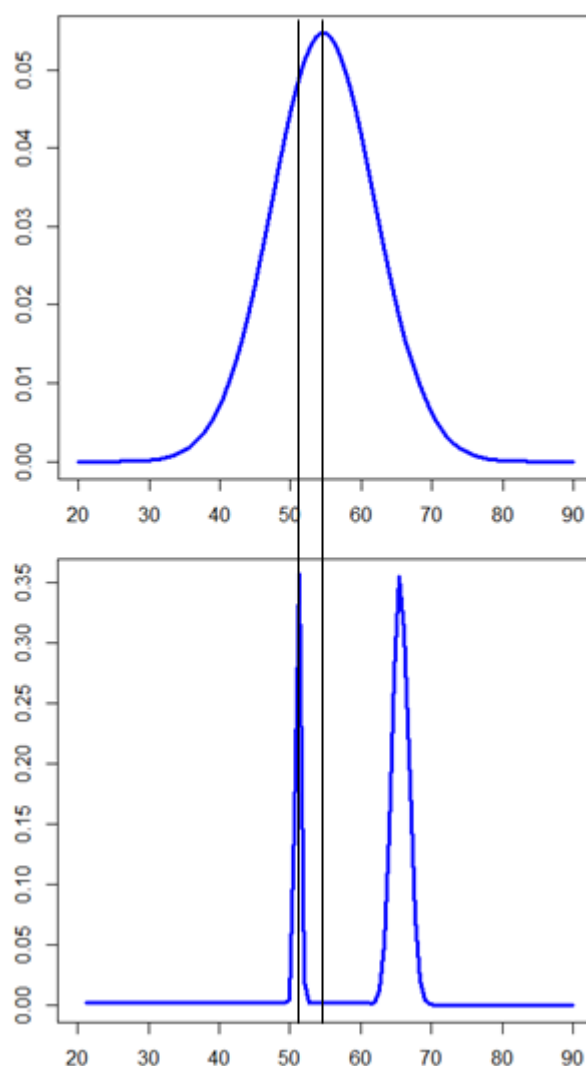


图 4-3 单高斯分布与高斯混合模型的效果对比

4.3.2 最大期望算法的应用

EM 算法为最大期望算法 (Expectation Maximization Algorithm, 又译期望最大化算法), 是一种迭代算法, 用于含有隐变数 (hidden variable) 的概率参数模型的最大似然估计或极大后验概率估计。最大期望经常用在机器学习和计算机视觉的数据聚类 (Data Clustering) 领域。

在了解高斯混合模型 (Gaussian Mixture Model) 之后, 要对蓝牙接收端接收到的数据建模。根据实际的实验经验, 大致可以把收到的 RSSI 观测值分为三种, 分别是包含一个分簇类、两个分簇类和三个分簇类, 也就是 K 值分别取 1、2、3

这三种情况。在实际实验中分布为三个分簇类以上的情况 ($K>3$) 也有发生, 但属于极小概率事件, 而且用分布为三个分簇类的模型去处理效果不错, 所以本章节不给予专门的优化方案。

$K=1$ 的情况我们采用的单高斯滤波, 这里本章节主要介绍 $K=2$ 和 $K=3$ 的两种情况:

$K=2$ 时 (既 RSSI 分布有两个分簇类的情况):

假设采样的 50 个随机变量 $RSSI_i \in \{RSSI_1, RSSI_2, \dots, RSSI_{50}\}$ 随机分布于两个分簇类中, 首先初始化分布参数, 其中随机变量 $RSSI_i$ 属于第一分簇类的概率为 π_1 , 其中随机变量 $RSSI_i$ 属于分簇类的概率为 $(1 - \pi_1)$ 。然后要进行 EM 算法中的 Expectation Step, 下面简称 E-Step, 作用是计算隐变量的后验概率。

E-Step 主要是分别求出每个 $RSSI_i$ 属于分簇类的概率:

$$\gamma_1(RSSI_i) = \frac{\pi_1 f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2)}{\pi_1 f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) + (1 - \pi_1) f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2)} \quad (4-2)$$

和属于第二分簇类的概率:

$$\gamma_2(RSSI_i) = \frac{(1 - \pi_1) f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2)}{\pi_1 f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) + (1 - \pi_1) f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2)} \quad (4-3)$$

如果 $\gamma_1(RSSI_i) > \gamma_2(RSSI_i)$, 则 $RSSI_i$ 下次重置分布参数时将会被分配在第一分簇类中的概率会变高; 反之如果, 则 $RSSI_i$ 下次重置分布参数时将会被分配在第一分簇类中的概率会变低。

然后进行 EM 算法中的 Maximization Step, 下面简称 M-Step, 作用是重新估计分布参数, 以使得数据的似然性最大。

M-Step 主要是分别求出属于第一分簇类的随机变数的均值 μ_1 和方差 σ_1^2 和属于第二分簇类的随机变量 $RSSI_i$ 的均值 μ_2 和方差 σ_2^2 , 并分别对应求出其概率密度函数 $f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2)$ 和 $f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2)$ 。

此时, $\pi_k = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_k(RSSI_i)}{N}$ 代入到下次的分布参数。

按照未知变量的期望估计重置分布参数后, 再重复 E-Step 和 M-Step, 如此迭代直至参数 (μ_1, σ_1^2) 、 (μ_2, σ_2^2) 以及 π_1 收敛。

$K=3$ (既 RSSI 分布有三个分簇类的情况):

假设采样的 50 个随机变量 $RSSI_i \in \{RSSI_1, RSSI_2, \dots, RSSI_{50}\}$, 随机分布于三个分簇类中, 初始化分布参数, 其中随机变量 $RSSI_i$ 属于第一分簇类的概率为 π_1 , 随机变数 $RSSI_i$ 属于第二分簇类的概率为 π_2 , 随机变数 $RSSI_i$ 属于第三分簇类的概率为 $(1 - \pi_1 - \pi_2)$ 。

进行 E-Step, 分别求出每个 $RSSI_i$ 属于第一分簇类的概率:

$$\gamma_1(RSSI_i) = \frac{\pi_1 f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2)}{\pi_1 f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) + \pi_2 f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2) + (1 - \pi_1 - \pi_2) f(RSSI_i; \mu_3, \sigma_3^2)} \quad (4-4)$$

$$\gamma_2(RSSI_i) = \frac{\pi_2 f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2)}{\pi_1 f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) + \pi_2 f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2) + (1 - \pi_1 - \pi_2) f(RSSI_i; \mu_3, \sigma_3^2)} \quad (4-5)$$

属于第三分簇类的概率:

$$\gamma_3(RSSI_i) = \frac{(1 - \pi_1 - \pi_2) f(RSSI_i; \mu_3, \sigma_3^2)}{\pi_1 f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) + \pi_2 f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2) + (1 - \pi_1 - \pi_2) f(RSSI_i; \mu_3, \sigma_3^2)} \quad (4-6)$$

$RSSI_i$ 属于哪个分簇类的概率最高, 下次重置分布参数时将会被分配在这个分簇类中的概率就会相应变高。

进行 M-Step, 分别求出属于第一个分簇类的随机变数 $RSSI_i$ 的均值 μ_1 和方差 σ_1^2 , 属于第二个分簇类的随机变数 $RSSI_i$ 的均值 μ_2 和方差 σ_2^2 以及属于第三个分簇类的随机变数 $RSSI_i$ 的均值 μ_3 和方差 σ_3^2 , 并分别对应求出其概率密度函数 $f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2)$ 、 $f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2)$ 以及 $f(RSSI_i; \mu_3, \sigma_3^2)$ 。

此时, $\pi_k = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_k(RSSI_i)}{N}$ 代入到下次的分布参数, 重置分布参数后, 再重复 E-Step 和 M-Step, 如此迭代直至参数 (μ_1, σ_1^2) 、 (μ_2, σ_2^2) 、 (μ_3, σ_3^2) 以及 π_1 、 π_2 收敛。

所谓构造高斯混合模型对 RSSI 观测值进行聚类分析, 就是利用 EM 算法对同一 iBeacon 节点在同一距离处采样 RSSI 观测值, 并对其进行分群。即对采样 RSSI 观测值聚类分群后采用一个以上高斯概率密度函数 ($K > 1$) 分别进行 RSSI 值拟合。在 EM 算法中, 包括使用的 E-Step, 对每个 RSSI 观测值计算后验概率, 使用 M-Step 对每个 RSSI 观测值计算对应的概率密度函数, 并根据后验概率和对应的概率密度函数对获取到的 RSSI 值进行重新估计分布参数, 重复迭代两个步骤, 直至每个分簇类中的 $RSSI_i$ 不在变化, 各个参数收敛。

4.3.3 赤池信息量准则

对接收到的 RSSI 观测值的分布进行猜测, 分别猜测其为单高斯分布、双分簇类和三分簇类的高斯混合分布之后, 要选一个最符合当下情况的 RSSI 观测值分布。这时候要用到 AIC 最小信息准则。AIC 信息准则即 Akaike information criterion, 是衡量统计模型拟合优良性的一种标准, 由于它为日本统计学家赤池

弘次创立和发展的，因此又称赤池信息量准则^[51]。它建立在熵的概念基础上，可以权衡所估计模型的复杂度和此模型拟合数据的优良性。是信号处理中对多种模型作选择的判别方法。

在一般的情况下，AIC 可以表示为：

$$AIC = 2c - 2\ln(L) \quad (4-7)$$

其中：c 是参数的数量，L 是似然函数。假设条件是模型的误差服从独立正态分布。增加自由参数的数目提高了拟合的优良性，AIC 鼓励数据拟合的优良性但是尽量避免出现过度拟合(Over fitting)的情况。所以优先考虑的模型应是 AIC 值最小的那一个。赤池信息准则的方法是寻找可以最好地解释数据但包含最少自由参数的模型^[52]。

单高斯分布中有 (μ_1, σ_1^2) 两个参数，则 $c=2$ ，

$$L_1 = \prod_{i=1}^n f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) \quad (4-8)$$

$$\ln(L_1) = \sum_{i=1}^n \ln f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) \quad (4-9)$$

$$AIC_1 = 4 - 2 \sum_{i=1}^n \ln f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) \quad (4-10)$$

双分簇类的高斯混合分布中有 (μ_1, σ_1^2) 、 (μ_2, σ_2^2) 以及 π_1 这 5 个参数，则 $c=5$ ，

$$L_2 = \prod_{i=1}^n [\pi_1 f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) + (1 - \pi_1) f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2)] \quad (4-11)$$

$$\ln(L_2) = \sum_{i=1}^n \ln[\pi_1 f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) + (1 - \pi_1) f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2)] \quad (4-12)$$

$$AIC_2 = 10 - 2 \sum_{i=1}^n \ln[\pi_1 f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) + (1 - \pi_1) f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2)] \quad (4-13)$$

三分簇类的高斯混合分布中有 (μ_1, σ_1^2) 、 (μ_2, σ_2^2) 、 (μ_3, σ_3^2) 以及 π_1 、 π_2 这 8 个参数，则 $c=8$ ，

$$L_3 = \prod_{i=1}^n [\pi_1 f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) + \pi_2 f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2) + (1 - \pi_1 - \pi_2) f(RSSI_i; \mu_3, \sigma_3^2)] \quad (4-14)$$

$$\ln(L_3) = \sum_{i=1}^n \ln[\pi_1 f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) + \pi_2 f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2) + (1 - \pi_1 - \pi_2) f(RSSI_i; \mu_3, \sigma_3^2)] \quad (4-15)$$

$$AIC_3 = 16 - 2 \sum_{i=1}^n \ln[\pi_1 f(RSSI_i; \mu_1, \sigma_1^2) + \pi_2 f(RSSI_i; \mu_2, \sigma_2^2) + (1 - \pi_1 - \pi_2) f(RSSI_i; \mu_3, \sigma_3^2)] \quad (4-16)$$

分别计算三种分布的 AIC 值，取 AIC 值最小的那个分布，作为本组 50 个

RSSI 观测值筛选优化策略的滤波分布。然后选取符合当下环境的分簇类的均值带入定位算法进行计算，根据本文的理论分析和实验的经验值，既视距状态下的 RSSI 值会更强，非视距状态下的 RSSI 值会有不同程度的损耗，选取最接近 0 的那组数据的均值进行计算，定位最为准确。

4.4 修正距离优化的四边定位算法

4.4.1 优化权值的加权质心算法

传统加权质心算法引入了 RSSI 数据，通过 RSSI 值来计算每个信标节点对未知节点贡献的权值。具体算法是：由于 RSSI 值易受环境干扰以及电磁场信号无规律衰减等因素的影响，转化成距离时必然存在误差，因此信标节点的感知交集不是一个点，而是一个区域，未知节点就在该区域内。如图 4-4 所示，已知三个信标节点分别为： $O_1(x_1, y_1)$ 、 $O_2(x_2, y_2)$ 、 $O_3(x_3, y_3)$ ，D 点为未知节点，D 点到三个信标节点的测距距离为 r_1 、 r_2 、 r_3 。根据未知节点到信标节点的距离与坐标的数学模型：

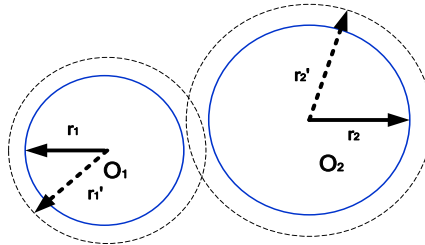


图 4-4 三边定位算法

$$\begin{cases} x = r_1 \times \cos \theta + x_1 \\ y = r_1 \times \sin \theta + y_1 \end{cases} \quad \begin{cases} x = r_2 \times \cos \theta + x_2 \\ y = r_2 \times \sin \theta + y_2 \end{cases} \quad \begin{cases} x = r_3 \times \cos \theta + x_3 \\ y = r_3 \times \sin \theta + y_3 \end{cases} \quad (4-17)$$

两两圆求交点，得到交点 $A(x_A, y_A)$ 、 $B(x_B, y_B)$ 、 $C(x_C, y_C)$ 未知节点就在三角形 ABC 区域内，加权质心算法在每次定位估计中引入一个权值 ω 来防止信息淹没现象（即信标节点的相关信息对质心坐标估算的影响因素），该权值与距离相关，利用距离因子来体现信标节点对未知节点未知的影响程度（即信标节点与未知节点越远，位置估计时所占比重越小），而每个顶点由两个距离确定故权值选择为 $\frac{1}{r_2 + r_3}$ （以圆 O_1 为例， r_2 、 r_3 为圆 O_2 、 O_3 半径），由此得到未知节点坐标

为:

$$\begin{cases} x = \frac{(\frac{x_A}{r_2+r_3} + \frac{x_B}{r_1+r_3} + \frac{x_C}{r_1+r_2})}{(\frac{1}{r_2+r_3} + \frac{1}{r_1+r_3} + \frac{1}{r_1+r_2})} \\ y = \frac{(\frac{y_A}{r_2+r_3} + \frac{y_B}{r_1+r_3} + \frac{y_C}{r_1+r_2})}{(\frac{1}{r_2+r_3} + \frac{1}{r_1+r_3} + \frac{1}{r_1+r_2})} \end{cases} \quad (4-18)$$

加权质心算法利用 RSSI 相关数据信息, 提高了定位算法的精度, 但该权值的选择存在很大的不合理性, 假设 $r_a > r_b$, 即 r_b 距离未知节点距离较近, 对其未知节点的作用效果大, 但若采用 $\frac{1}{r_a+r_b}$ 为权值, 使 r_a 起了主导作用, r_b 对未知节点的作用效果减弱, 这与加权质心定位算法的意图相违背。

文献[53]中指出 RSSI 测距与误差 $\phi(x)$ 存在如下关系:

$$\phi(x) = \varepsilon x + \delta \quad (4-19)$$

其中 ε : 一次误差系数, δ : 常误差系数。

由此可见误差与距离存在一定的线性关系, 经过转化得到:

$$\phi(x) - \delta = \varepsilon x \quad (4-20)$$

$$\frac{1}{x} = \frac{\varepsilon}{\phi(x) - \delta} \quad (4-21)$$

本文对权值因子进行如下(4-22)优化:

$$\frac{1}{d_a + d_b} \rightarrow \frac{1}{d_a} + \frac{1}{d_b} \quad (4-22)$$

其中, d_a 、 d_b 分别为未知节点到信标节点的距离。

如此优化后, d_a 、 d_b 就可根据自身距离大小对未知节点进行相应权值的贡献, 符合加权质心定位原理的理论。优化后加权质心算法的未知节点坐标为(4-23)。

$$\begin{cases} x = \frac{(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3})x_A + (\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_3})x_B + (\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2})x_C}{2(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3})} \\ y = \frac{(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3})y_A + (\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_3})y_B + (\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2})y_C}{2(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3})} \end{cases} \quad (4-23)$$

使用质心算法、传统加权质心算法以及三种定位算法, 于 $5*6m^2$ 的会议室中, 使用三个蓝牙信标节点围成等腰三角形区域, 节点坐标分别为 $(0,2.5)$, $(5,5)$, $(5,0)$, 将移动终端放置在该区域内十个不同位置进行定位实验, 得到三种定位

算法对应的定位平均误差图如下图 4-5 所示：

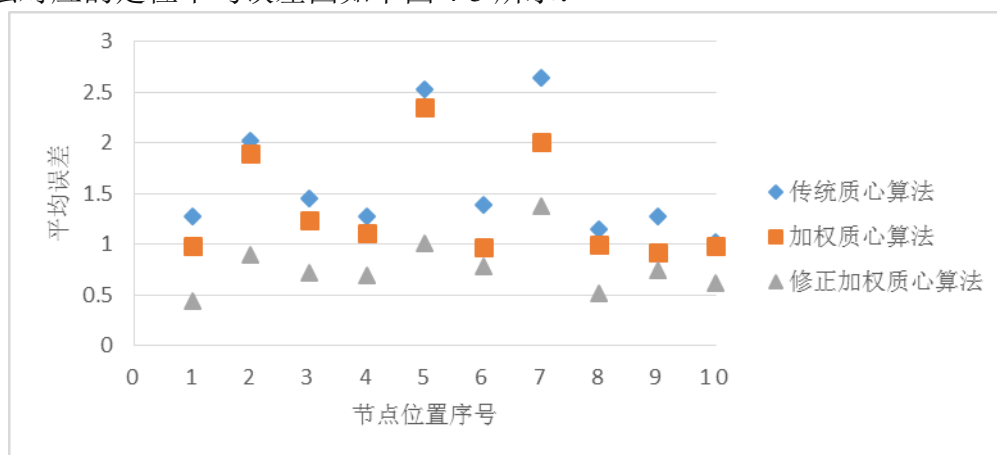


图 4-5 定位算法平均误差图

加权质心算法同传统质心算法相比并没有明显的定位精度的提升，平均误差仅仅提高了 0.256m，而采用优化权值的质心算法的定位精度提高了 0.825m，远高于其他算法，较大提高了定位系统的精度。

4.4.2 基于距离修正的室内定位算法

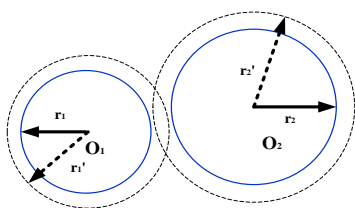
由于多径衰减、障碍物等噪声的干扰，信号强度值往往会出现较大的波动，使得 RSSI 值转换出的距离值误差较大，导致基于 RSSI 测距方法得到的未知节点到信标节点的距离远远偏差于实际距离，以致 3 个圆无法满足两两相交，加权质心定位算法失效。本文针对这一问题提出了一种基于距离修正的加权质心定位算法，在圆与圆之间不相交的情况下能够准确进行节点定位，提高在室内环境中定位算法的容错能力、适应性及精确度。

圆与圆之间存在两种位置关系会导致定位算法失效：两圆相离以及两圆内含。

（1）两圆相离：

当圆与圆之间存在两圆相离的情况时，即两圆无交点，如图 4-6 所示。本文使用的 RSSI 距离修正原理是：以距离因子作为权值分别增加两圆的半径一定距离，使圆与圆两两相交，形成一个重叠的区域，且使用该方法可保证增加后的半径比与之前半径比保持不变，即距离因子对未知节点所占权重不变。在使用加权质心三边定位算法求得未知节点坐标。

半径增加方案如公式(4-24)所示：



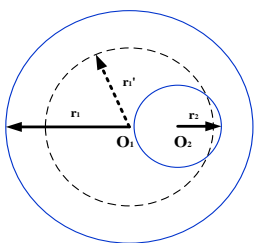
$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = \frac{r_1(d - r_1 - r_2)}{r_1 + r_2} + r_1 \\ r_2 = \frac{r_2(d - r_1 - r_2)}{r_1 + r_2} + r_2 \end{array} \right. \quad (4-24)$$

图 4-6 两圆相离的情况

其中 r_1 、 r_2 为两圆 O_1 、 O_2 半径; d 为两圆圆心距离。

(2) 两圆内含:

当两圆之间呈现内含的情况时，如图 4-7 所示。本文使用减小半径较大的圆的半径使之与半径较小的圆相切或相交来纠正 RSSI 距离，使圆与圆获得公共交点。具体修正方案如公式(4-25)所示：



$$\begin{cases} r_1 = d + r_2 \\ r_2 \text{ 不变} \end{cases} \quad (4-25)$$

图 4-7 两圆内含的情况

其中, r_1 、 r_2 分别为圆 O_1 、 O_2 的半径, 且 $r_1 > r_2$, d 为两圆圆心距离。使用该方法可以在尽量减小两圆偏移量的基础上保证两圆半径比变化尽可能小。

如图 4-8 所示, 两圆交点坐标可通过信标节点 O_1 、 O_2 的坐标 (x_1, y_1) (x_2, y_2) 以及信标节点间的距离 O_1O_2 计算得出, 具体方法如下:

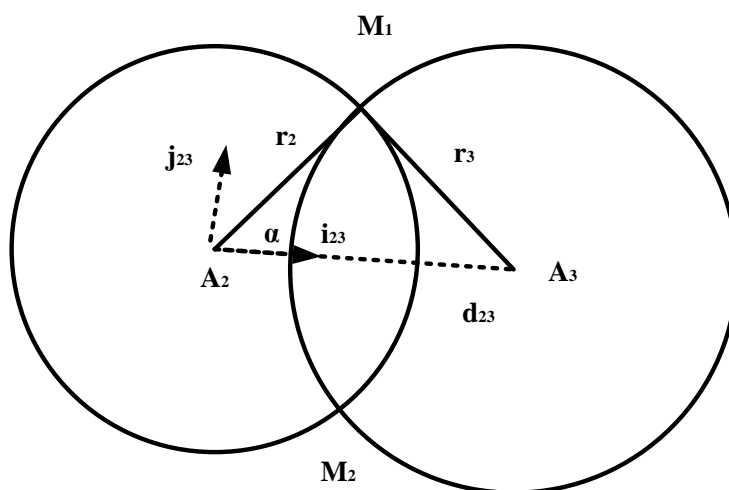


图 4-8 求解几何示意图

首先求得 O_1 、 O_2 之间的距离 O_1O_2 ：

$$O_1O_2 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4-26)$$

线段 O_1O_2 与线段 O_1M_1 的夹角 α 为:

$$\alpha = \arccos \frac{r_1^2 + O_1O_2^2 - r_2^2}{2 \times O_1O_2 \times r_1} \quad (4-27)$$

单位向量 \vec{i}_{12} :

$$\vec{i}_{12} = \frac{\vec{O_2} - \vec{O_1}}{O_1O_2} \quad (4-28)$$

通过公式求出正交单位向量 \vec{j}_{12} :

$$\vec{i}_{12} \bullet \vec{j}_{12} = 0 \quad (4-29)$$

最后, 求 M_1 、 M_2 坐标:

$$\vec{M_1} = \vec{O_1} + \vec{i}_{12}(r_1 \cos \alpha) + \vec{j}_{12}(r_1 \sin \alpha) \quad (4-30)$$

$$\vec{M_2} = \vec{O_1} + \vec{i}_{12}(r_1 \cos \alpha) - \vec{j}_{12}(r_1 \sin \alpha) \quad (4-31)$$

4.4.3 四边定位算法

传统的加权质心三边定位算法是使用三个信标节点进行定位, 得到的定位结果有较大误差, 为了进一步提高未知节点的定位精度, 通过理论与实际应用分析, 本文提出四边测距定位算法, 即在三边定位算法基础上增加一个信标节点进行定位。

设增加未知节点为 $O_4(x_4, y_4)$, 根据圆的参数方程几何关系, 三三自由组合, 求得交点坐标, 可分别得出, 通过 $O_1O_2O_3$ 三圆得到估计位置 $A(x_A, y_A)$, $O_1O_2O_4$ 三圆得到估计位置 $B(x_B, y_B)$, $O_1O_3O_4$ 三圆得到估计位置 $C(x_C, y_C)$, $O_2O_3O_4$ 三圆得到估计位置 $D(x_D, y_D)$, 对 ABCD 四组估计位置求质心得更加精确的未知节点坐标 $O(x, y)$, 即如式(4-32)所示:

$$\begin{cases} x = \frac{x_A + x_B + x_C + x_D}{4} \\ y = \frac{y_A + y_B + y_C + y_D}{4} \end{cases} \quad (4-32)$$

具体定位过程如下:

(1) 实现蓝牙局域网覆盖: 将基于 BLE 低功耗 iBeacon 信标节点布置在需要进行定位的试验区域, iBeacon 向周围空间中广播带有自身 UUID、信号强度值和发射功率 POWER 值等有用信息, 有树莓派进行信息的获取。

(2) 聚类分析优化采样数据, 采用高斯混合滤波模型对采样信号强度进行聚类分析, 依据赤池信息量准则来进行数据的优化, 得到更加贴近真实值的信号

强度信息。

(3) 分段拟合无线信号衰减模型，预先统计数据信息设置分段阈值，在通过最小二乘法拟合函数模型。

(4) 用冒泡法对计算出的各个信标节点到未知节点的距离进行升序排序，选择距离未知节点最近的四个信标节点进行定位。

(5) 四边定位过程中先判断圆与圆之间是否存在公共点，即是否相交，若无交点，则使用距离修正方案，来对两圆半径进行修正优化，使之存在有效交感区域，求得交点坐标进行定位。

(6) 采用优化权值的加权质心算法，依靠步骤(5)中计算得到的交点坐标，测算出未知节点的位置信息。

4.5 基于聚类分析优化的距离修正室内定位算法伪代码

根据以上提出的优化距离修正策略的四边加权质心定位算法伪代码如下：

```
Algorithm Indoor Position ()
{
/*获取当前侦测到周围的四个蓝牙信标节点发送的 UUID、RSSI、POWER
信息*/
    info[infoIndex].UUID, Power, Rssi;
    If (同一 UUID 获取到的 RSSI 值数目大于 100)
    {
/*对 100 个 RSSI 值进行聚类分析的高斯混合滤波算法进行筛选，得到优化的
RSSI 值*/
        对 100 个 RSSI 值分别使用包含一个 component、两个 component 和三个
component 的高斯混合滤波模型中，使用聚类算法进行分簇处理，并求出相应
收敛参数。使用 AIC 准则对三种滤波模型进行评估，选择最优滤波模型，
求滤波后 RSSI 均值。

/*利用分段对数路径损耗模型将 RSSI 值转换成距离 d*/
        d=distanceRSSI (Power, Rssi);}
    if (获取到的 UUID 数目大于 4)
    {
```

使用冒泡排序算法对计算得到的每个 iBeacon 的距离 d 值进行升序排序, 选择距离最小的四个进行四边定位算法定位.

```
Bubble( );  
}  
Else { /*继续获取蓝牙信标节点信息*/  
    /*依次求两个蓝牙信标节点为圆心的圆的交点*/  
    If (两圆无交点)  
    { /*使用距离修正方案来进行半径距离的修改*/  
        revise (circles[].center.x, circles[].center.y, circles[].r); }  
    Else(两圆存在交点)  
    { /*根据圆的几何关系, 求两圆交点*/  
        insect(circles[0].center.x, circles[0].center.y, circles[0].r, circles[1].center.x,  
            circles[1].center.y, circles[1].r)  
    }  
  
    /*利用求得的交点, 进行四边加权质心定位算法运算*/  
    computer(info[infoIndex].UUID, Power, RSSI, d);  
} //END
```


第 5 章 室内定位系统的实现与实验分析

5.1 系统开发平台

本系统有一定数量的 iBeacon 基站和树莓派蓝牙终端组成。其中 iBeacon 基站核心控制器为 TI 公司的 CC2540 蓝牙芯片。该芯片使用了最新的 BLE4.0 技术，具有功耗小、时延低、传输距离远的特点，最大限度的满足了高精度室内定位技术的要求。树莓派^[54]是一款基于 ARM 的微型计算机主板，其支持 Linux 系统。使用 putty 通过 WiFi 远程登录树莓派，使得树莓派与 PC 端的讯息可交互，在系统中使用 vim 编辑器来进行程序设计编写，调试以及功能的实现等工作，主要使用 C 语言进行程序设计，程序的编写过程中利用 Linux 下的类库辅助完成。树莓派通过蓝牙模块接收到 iBeacon 基站发送的与位置相关的 UUID、RSSI 值和 POWER 值（距离终端 1m 处的 RSSI 值），通过定位算法及时定位未知节点坐标。



图 5-1 Raspberry Pi II

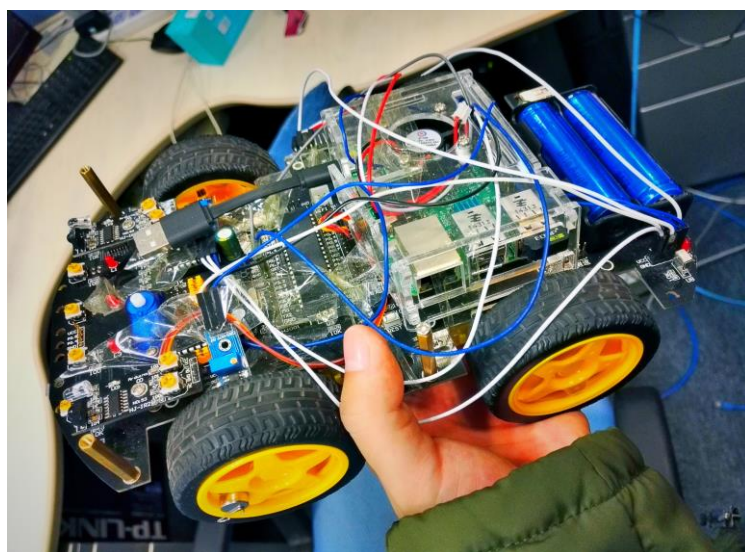


图 5-2 iBeacon 节点

基于蓝牙信标节点和树莓派的定位实验原理图 5-3 如下：

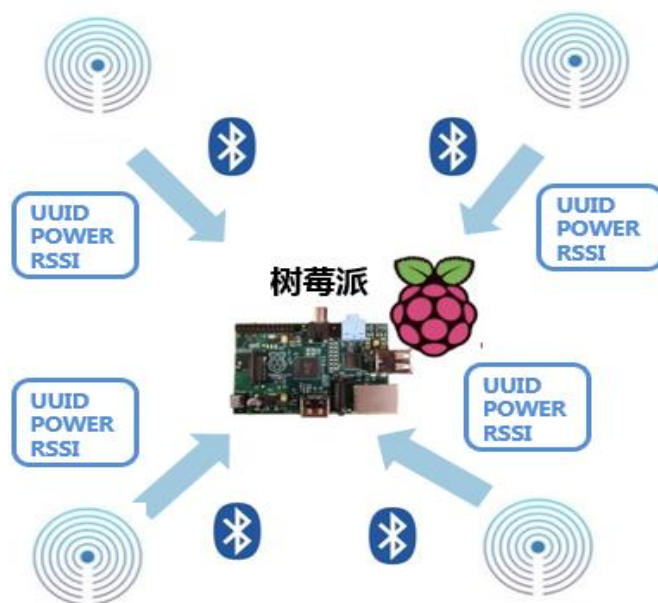


图 5-3 基于蓝牙信标节点和树莓派的定位实验原理图

5.2 树莓派连接 iBeacon

树莓派是树莓派基金会开发的开放式嵌入式系统，外形只有信用卡大小，却具有电脑的基本功能。它是以 ARM11 处理器为核心的单板计算机，拥有 256MB 或 512MB 内存，具有 USB 接口、快速以太网接口、SD 插槽、HDMI 输出接口。树莓派小巧玲珑，能提供 1080p 全高清影像输出。在搭载基于 Debian 打造的 Raspian 操作系统后，更拥有丰富的开源软件，也便于实行开发扩展。

BlueZ 是公布在 Internet 上的免费蓝牙协议栈^[55]，由于它结构简单，应用方便，具有活、高效和模块化的特点且具有较强的兼容性，因此 BlueZ 已经成为 Linux 操作系统下的官方的蓝牙协议栈。因此使用树莓派在 Debian 操作系统下需配置 Bluz 协议栈，再通过蓝牙适配器接收 iBeacon 广播信息。具体命令如下：

- （1）`#apt-get install bluetooth bluez-utils bluez-compat blueman` ——安装 Bluz 协议栈及其主要使用的三个程序包；
- （2）插上 USB 蓝牙适配器之后，`#lsusb` ——识别 Bluetooth Dongle 设备；
- （3）运行`#/etc/init.d/bluetooth status` 或者`# service bluetooth status` ——查看 Bluetooth 服务是否正常运行；
- （4）`# Hciconfig hci0 up` ——激活蓝牙接口；

(5) #Hcitol lscan ——用这个命令查看周围可见设备的地址和名称;

(6) #sudo hcidump -raw ——查看 iBeacon 广播的原始数据;

(7) 对 iBeacon 原始数据进行解析, 解析后所得 iBeacon 广播数据如下图 5-4 所示。

```

UUID: 49435457-534E-455A-183C-ACCF4D724340 MAJOR: 170 MINOR: 170 POWER: -59
UUID: 49435457-534E-455A-183C-88CF7C607CAB MAJOR: 170 MINOR: 170 POWER: -59
UUID: 49435457-534E-455A-183C-BF55B0170469 MAJOR: 170 MINOR: 170 POWER: -59
UUID: 49435457-534E-455A-183C-ACCF4D724340 MAJOR: 170 MINOR: 170 POWER: -59
UUID: 49435457-534E-455A-183C-88CF7C607CAB MAJOR: 170 MINOR: 170 POWER: -59
UUID: 49435457-534E-455A-183C-BF55B0170469 MAJOR: 170 MINOR: 170 POWER: -59
UUID: 49435457-534E-455A-183C-ACCF4D724340 MAJOR: 170 MINOR: 170 POWER: -59

```

图 5-4 iBeacon 广播数据

5.3 分段拟合无线信号衰减模型

本实验选择了一个 $6*8m^2$ 的会议室作为实验场地, 该会议室为真实工作环境, 其中内置桌椅, 该环境中的内置物皆会对无线信号发生多径效应等影响。。首先进行测距实验: 固定树莓派在房间中, 然后分别在距离该树莓派 0.5m、1m、...、8m 处设置蓝牙信标节点, 共有 16 个测试点。在每个测试点上, 通过树莓派进行 RSSI 值采样, 蓝牙信标节点广播频率为 0.1s, 采用中每个测试点采样 20s, 及获取 200 个 RSSI 样本点。然后对采集到的数据进行高斯滤波和均值滤波处理, 剔除 RSSI 波动较大的值, 最终获得较为准确的 RSSI 值。对 16 个测试点进行测量后, 得到的该实验环境的采集到的全局数据进行函数拟合, 得到的整体无线信号衰减模型如图 5-5 所示:

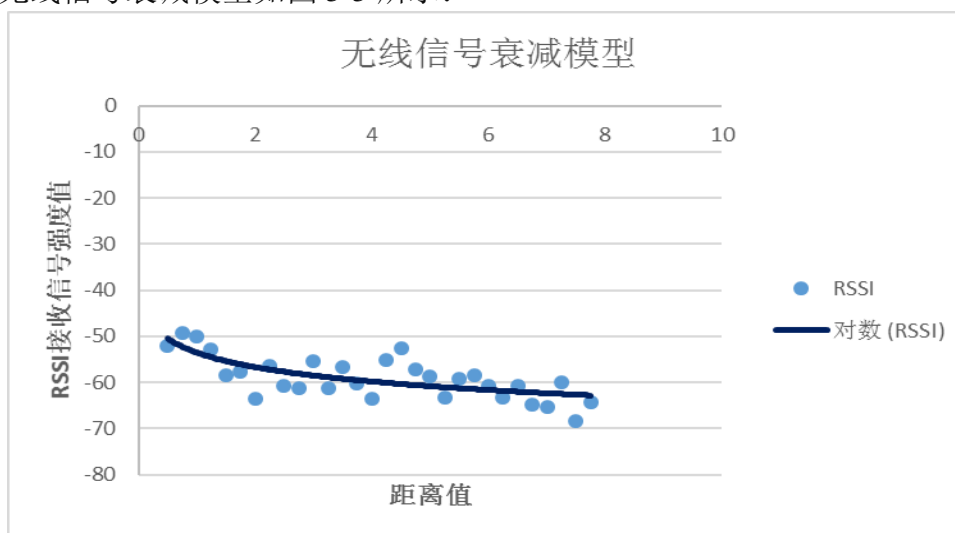


图 5-5 整体无线信号衰减模型

对该测试曲线使用 $RSSI = RSSI_0 + 10n\lg(\frac{d}{d_0}) + \varepsilon$ 对数模型使用最小二乘法进

行拟合，最终得到该曲线拟合函数为：

$$RSSI = -6.594 \ln(d) + POWER + 4.865 \quad (5-1)$$

在室内环境中因为空间狭小、布局复杂等因素，随着无线信号传播距离增加会加剧信号强度 RSSI 值测量的不稳定性。当传播距离超过 4m 时，信号强度 RSSI 值与整体拟合的衰减模型之间的匹配度明显降低，这对测距精确度有不可弥补的影响。针对以上情况，通过大量实验对 iBeacon 数据的采集观察，对衰减曲线采用分段处理得拟合方法，设置分段阈值 4m，即以距离 4m 为界对整体区域进行划分，下图 5-6 为分段无线信号拟合图。

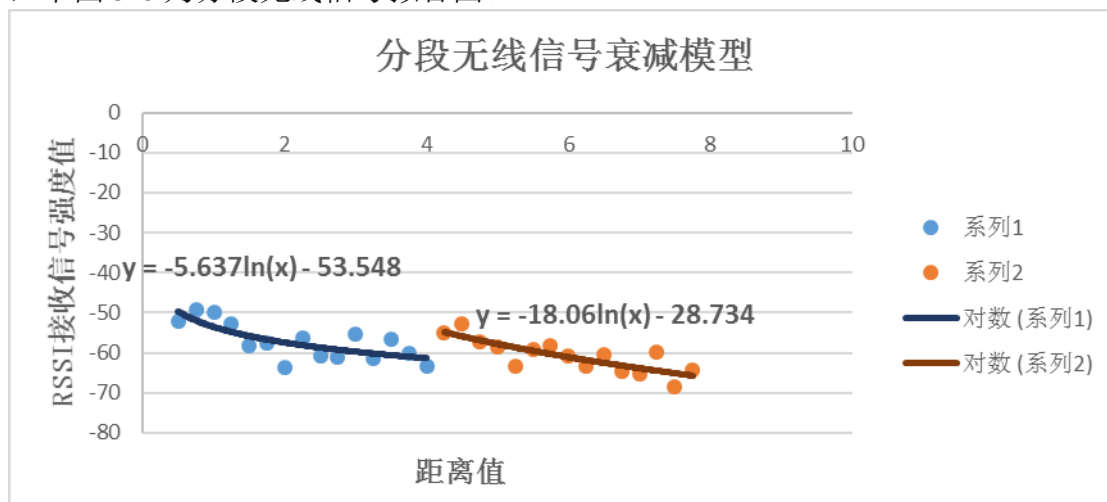


图 5-6 分段无线信号衰减模型

本实验环境中的分段无线信号衰减模型为公式(5-2)

$$\begin{cases} RSSI = -5.637 \ln(d) - 53.548 & 0 \leq d \leq 4 \\ RSSI = -18.06 \ln(d) - 28.734 & d > 4 \end{cases} \quad (5-2)$$

5.4 RSSI 基于聚类分析优化策略的测距实验

本文的测试程序是基于 Linux 下的 Bluz 协议栈，使用树莓派、iBeacon 节点以及一套 C 开发的上位机程序作为开发平台，选择了一个 3*7m² 的空旷过道作为实验场地。将四个 iBeacon 节点分别置于过道的 A (0,0)，B (7,0)，C (7,3)，D (0,3) 的坐标位置，其中 AB 一侧有金属墙，CD 一侧为空旷视野。使用树莓派进行对 RSSI 观测值采样、基于聚类算法分析的 RSSI 筛选优化策略处理，采用适应该环境的对数距离损耗模型，之后计算出 iBeacon 节点与树莓派未知节点的距离。

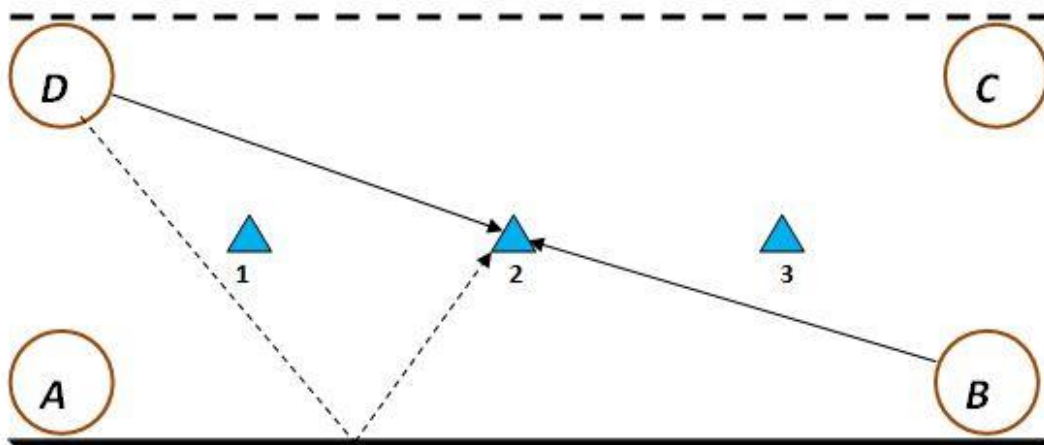


图 5-7 实验现场布局

实验现场如图 5-7 所示,未知节点树莓派依次经过 3 个指定位置进行测距测试, RSSI 筛选优化部分分别使用传统高斯滤波及本文提出的基于聚类算法分析的 RSSI 筛选优化策略两种方式,分别处理 iBeacon 节点 A、B、C、D 到位置 1、2、3 的 RSSI 值,然后代入(5-2)拟合的衰减模型公式中计算距离。其中每一个 iBeacon 到每一个位置,我们都收集 10 组,每组 50 个 RSSI 采样值进行计算。真实距离使用皮尺测量。误差(5-3)所示:

$$\Delta d = |d - d_t| \quad (5-3)$$

Δd 为误差, d 为由 RSSI 转换的距离, d_t 为真实距离。误差 Δd 的测量结果如表 1、表 2 所示,

表 1 点 A、D 分别到位置 1、2、3 的测距平均误差分析

	传统高斯滤波		聚类算法分析	
	A 点	D 点	A 点	D 点
位置 1	0.14m	0.35m	0.14m	0.12m
位置 2	0.10m	0.27m	0.10m	0.11m
位置 3	0.17m	0.31m	0.17m	0.19m

表 2 点 B、C 分别到位置 1、2、3 的测距平均误差分析

	传统高斯滤波		聚类算法分析	
	B 点	C 点	B 点	C 点
位置 1	0.15m	0.37m	0.15m	0.17m
位置 2	0.12m	0.24m	0.12m	0.12m
位置 3	0.16m	0.33m	0.16m	0.15m

从上面数据可以看出，基于聚类算法分析的 RSSI 筛选优化策略在测距方面明显优于传统高斯滤波。如图 5-7 可以看出，由于 CD 一侧为空旷地带，由 iBeacon 信标 A、B 广播到位置 1、2、3 的信号比较纯净，无杂波。AB 一侧有金属隔板，所以由 iBeacon 信标 C、D 广播到位置 1、2、3 的信号带有多径衰落，比较复杂。用本文算法，有效的过滤了 C、D 两点的非视距误差，从而提高测距精度。

5.5 RSSI 优化方案的定位实验

定位实验分为两组进行，第一组实验的场景布置基本与本章 5.3 节测距实验一致，称之为非对称环境。第二组实验是在原有场景基础上，CD 一侧也换一面金属隔板，称之为对称环境。使用树莓派进行对 RSSI 观测值采样、基于聚类算法分析的 RSSI 筛选优化策略处理，采用适应该环境的对数距离损耗模型，之后通过四边定位算法及时得出树莓派的坐标位置。

5.5.1 非对称环境下定位实验

本对称实验环境基本与本章 5.3 节所描述的测距实验环境相同。在每个测试点记录 20 次定位点的坐标，然后计算定位误差，定位误差公式为：

$$E_R = \sqrt{(x - x_e)^2 + (y - y_e)^2} \quad (5-4)$$

其中，(x, y) 为树莓派定位得到的未知节点位置，(x_e, y_e) 为真实位置。两种 RSSI 值提纯方案结合四边定位算法实验结果的误差最大值、最小值和平均值如表 3：

表 3 非对称环境下位置 1、2、3 的定位误差分析

	传统高斯滤波			聚类算法分析		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
位置 1	1.294m	0.592m	0.772m	0.758m	0.297m	0.526m
位置 2	1.006m	0.508m	0.574m	0.496m	0.061m	0.285m
位置 3	1.349m	0.614m	0.903m	0.849m	0.361m	0.638m

由此得到传统高斯滤波和基于聚类算法分析的 RSSI 筛选优化策略的平均误差如上表，由表可以得出，在相同测试环境下，改进方法的平均定位误差明显小

于原本定位方法产生的误差，测试中，使用传统高斯滤波的总的平均定位误差约为 0.750m，而采用本文提出的基于聚类算法分析的 RSSI 筛选优化策略的总平均定位误差仅为 0.483m，性能提高约 35.6%。

5.5.2 对称环境下定位实验

本对称实验环境基本与本章 5.4.1 小节所描述的非对称实验环境相同，只是 CD 一侧换成金属隔板。依旧在每个测试点记录 20 次定位点的坐标，然后计算定位误差。

其中， (x, y) 为树莓派定位得到的未知节点位置， (x_e, y_e) 为真实位置。两种 RSSI 值提纯方案结合四边定位算法实验结果的误差最大值、最小值和平均值如表 4：

表 4 对称环境下位置 1、2、3 的定位误差分析

	传统高斯滤波			聚类算法分析		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
位置 1	0.925m	0.489m	0.605m	0.737m	0.195m	0.563m
位置 2	0.820m	0.367m	0.411m	0.518m	0.107m	0.304m
位置 3	1.032m	0.598m	0.722m	0.814m	0.317m	0.624m

由此得到传统高斯滤波和基于聚类算法分析的 RSSI 筛选优化策略的平均误差如上表，由表可以得出，在相同测试环境下，改进方法的平均定位误差明显小于原本定位方法产生的误差，测试中，使用传统高斯滤波的总的平均定位误差约为 0.579m，而采用本文提出的基于聚类算法分析的 RSSI 筛选优化策略的总平均定位误差仅为 0.497m，性能提高约 14.2%。

5.5.3 移动终端定位实验

关于定位的实验测试，选择了一个 $6*8m^2$ 的空旷房间作为实验场地。将四个蓝牙信标节点分别置于房间的 $(0,0)$ ， $(0,6)$ ， $(6,0)$ ， $(6,6)$ 的坐标位置，使用移动终端树莓派进行对 RSSI 采样、聚类分析滤波处理，分段拟合出适应该环境的对数距离损耗模型，之后通过基于优化权值的距离修正策略的四边测距定位算法得出移动终端树莓派的坐标位置。

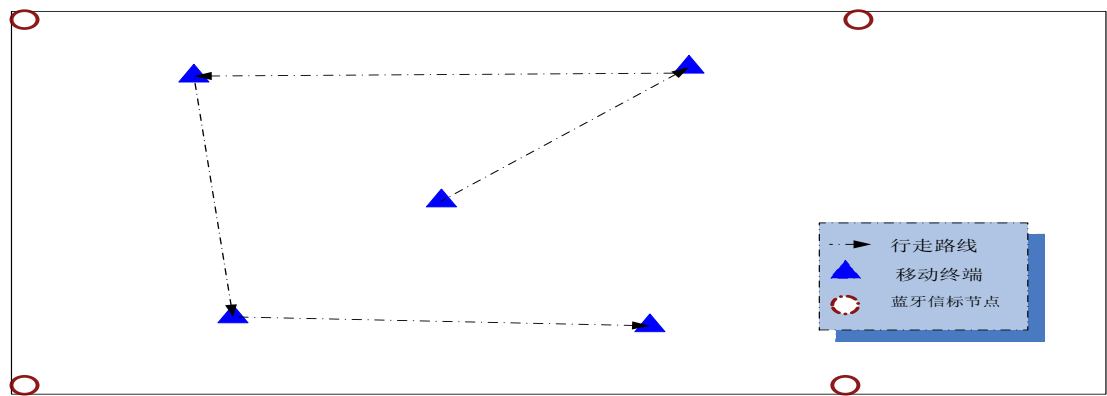


图 5-8 实验现场布局

实验现场如图 5-8 所示，移动终端树莓派依次经过 5 个指定位置进行定位测试，分别使用加权质心算法及本文提出的基于距离修正的加权质心定位算法两种方式，在每个测试点记录 10 次定位点的坐标，然后计算定位误差

两种定位算法实验结果的误差最大值、最小值和平均值如表 5 所示：

表 5 定位算法实验结果

定位序号	加权质心算法			距离修正的加权质心算法		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	0.828	0.241	0.434	0.496	0.061	0.285
2	1.349	0.792	0.899	0.758	0.397	0.563
3	0.973	0.453	0.712	0.675	0.107	0.406
4	0.924	0.431	0.697	0.737	0.195	0.482
5	1.392	0.841	1.006	0.894	0.631	0.679

由此得到加权质心算法和修正距离的加权质心算法的平均误差图 5-9 如下，由图可以得出，在相同测试环境下，优化方法的平均定位误差明显小于原始定位方法产生的误差，测试中，使用加权质心算法的平均定位误差约为 0.750m，而采用本文提出的距离修正的加权质心定位算法的平均定位误差仅为 0.483m，性能提高约 35.6%。

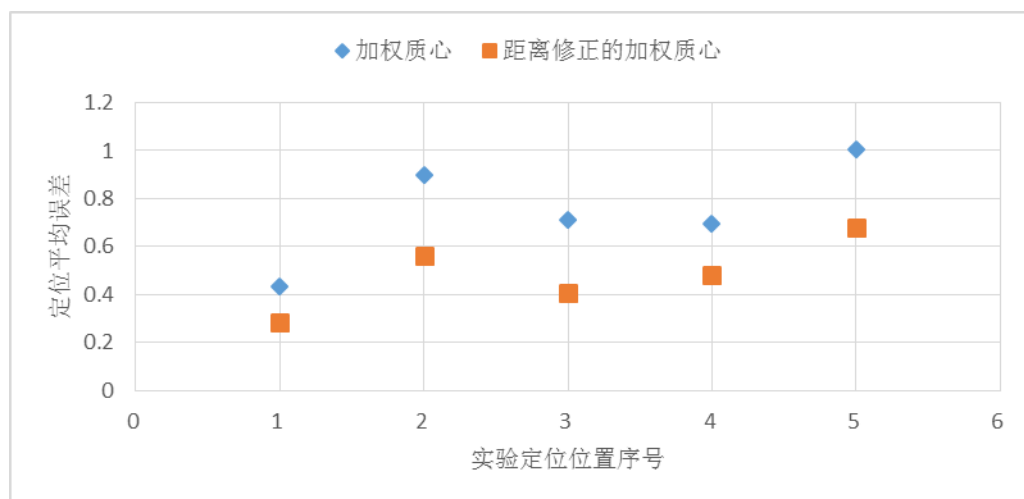


图 5-9 平均误差对比图

5.6 实验结果分析与小结

从上述实验结果可以看出将基于聚类算法分析的优化权值距离修正的室内定位算法，可以明显提高室内定位的精准度、适应性和容错能力。首先，基于聚类算法分析的 **RSSI** 筛选优化策略的测距性能明显优于传统高斯均值混合滤波；其次，使用分段拟合无线信号衰减模型，可以训练出更加适应室内环境的信号强度与距离间关系的函数曲线；再次，针对优化权值距离修正的四边质心定位算法，有效提高了定位精度以及定位算法容错能力。

在定位试验中，无论是实验环境对称与否，本文算法对于室内定位的精度都有所提升。经观察，对称环境下定位实验的提升效果较小，是因为实验环境中的 **iBeacon** 节点的布置对称，在对 **iBeacon** 节点分别测距所产生的误差可以抵消一部分，而在非对称环境下定位实验中，测距误差不能有效抵消。在实验中，让载有树莓派的小车行进轨道为过道中间线视为最佳环境，其目的是为了增大接收到的 **RSSI** 视距值和非视距值的间距，使得高斯混合滤波的聚类分析模型分群更明显，效果更突出。综上所述，本文算法对于非对称环境下定位实验的定位效果提升更显著，在对称环境下定位实验的定位效果稳定，证明本文提出的基于聚类算法分析的 **RSSI** 筛选优化策略不仅可以提高定位精度，而且适用定位环境也更为多样，适应力强。

第6章 总结和展望

6.1 工作总结

本课题的主要目的是研究基于蓝牙 4.0 低能耗的室内定位算法。通过对国内外室内定位的发展现状以及经典的定位方案进行总结分析对比,介绍了室内定位的常用算法,并且对蓝牙模块、蓝牙协议栈和 iBeacon 技术进行了简要的介绍。针对室内定位方案的种种缺陷和不足,本文提出了一种基于聚类分析的数据优化策略以及优化权值的距离修正加权质心室内定位算法的定位方案,其中的创新点有以下几个方面:

(1) 采用分段拟合无线信号衰减模型。针对从信号衰减模型和分析室内定位环境入手,通过实验设置避免定位误差急剧增加的临界通信距离,对整体环境进行分段无线信号衰减模型拟合,提高了 RSSI 测距精度,使其最大程度的符合客观环境的实际情况。

(2) 聚类分析优化策略。针对电磁波的多径干涉引起的长时间干扰,导致 RSSI 测距有可观误差的情况,引入聚类分析的高斯混合模型及赤池信息量准则,对收集到 RSSI 采样值进行预估判断,可以有效分离和提取更为符合当前实验场景的 RSSI 值,极大程度的规避了室内复杂多变的环境导致无线信号经多径效应等因素产生的噪声对测算距离精确度的影响,为接下来的定位运算奠定基础。

(3) 距离修正的四边定位算法。在传统定位算法基础上存在的不足之处进行了分析,优化了加权质心算法的权值,并且考虑因 RSSI 测距误差导致三边定位算法失效的情况,利用距离修正方案,提高定位精度以及算法的适用性和鲁棒性。通过实验验证了该改进方案的可行性和有效性。

综上所述,本文提出的基于聚类分析的数据优化策略以及优化权值的距离修正加权质心室内定位算法,从以上三个创新点出发,对已有的定位方案进行了改进和完善,使之很大程度的提高了基于无线信号定位算法的精确度、适应性和鲁棒性,可以更好的应用于室内定位推广。

6.2 工作展望

由于受到时间限制,本课题的研究在诸多方面仍有不足,还有较大改善空间。

针对本文提出的基于蓝牙 4.0 低功耗室内定位算法，下一步的工作重点可以从以下几个方面深入研究：

（1）蓝牙节点的布置方式。为达到尽可能的视距传播，减小非视距对无线信号的干扰，本课题中是采用将信标节点按 $6\text{m} \times 4\text{m}$ 的矩形的四角布置到天花板上。但该布点方案未考虑模块天线方向对定位的影响以及未研究使用何种布点几何图形才能使蓝牙结点以最少的数量覆盖整个实验空间。后续工作可以针对这两个方面进行深入研究。

（2）无线信号与惯性导航融合定位。使用本文提出的基于无线信号的室内定位算法虽然定位精度很客观，但是以时间开销为代价，无法满足移动终端实时定位的用户需求。鉴于惯性导航定位技术是一个自主、连续、实时的定位方法，因此考虑融合两种定位方案，使用无线信号定位算法来纠正惯性导航误差累积缺陷，同时使用惯性导航定位算法来弥补无线信号定位非实时的不足。

（3）室内定位算法的优化。本文设计的定位算法主要使用了聚类分析高斯混合滤波和赤池信息量准则等原理，在后续研究中可以尝试在此基础上引入其他定位算法来进行优化，探寻进一步提高定位算法精度的可能性

参考文献

- [1]党小超,李小艳. 无线传感器网络节点定位加权校正模型[J]. 计算机应用,2012,32(2):355-358.
- [2]Hu Yuan,Hu Changping,Hu Jin. Factors influencing user adoption of location based service:From the expanded TAM perspective[J]. Chinese Journal of Library and Information Science,2014,02:15-30.
- [3]Li XF, Chen LF, Wang JP, et al. Fuzzy system and Improved APIT(FIAPIT) combined range-free localization method for WSN[J]. KSII TRANSACTIONS ON INTERNET AND INFORMATION SYSTEMS,2015,9(7):2414-2434.
- [4]Oliveira L, Li HB, Almeida L, et al. RSSI-based relative localisation for mobile robots[J].AD HOC NETWORKS,2013,13:321-335.
- [5]Liu Hsin-Chin, Hsuan Cheng-Wei. AOA estimation for coexisting UWB signals with multipath channels[C]//2014 International Conference on Telecommunications and Multimedia,2014:173-178.
- [6]Olesen O V, Paulsen R R, Hojgaard L, et al. Motion Tracking for Medical Imaging: A Novisible Structured Light Tracking Approach[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2012,31(1):79-87.
- [7]JiJoong Kim and Hatem Hmam, 3D Self-Localisation from Angle of Arrival Measurements[C]. Edinburgh South Australia,2009.
- [8]Y. Jin, M Motani, W Soh, et al. SparseTrack: Enhancing Indoor Pedestrian Tracking with Sparse Infrastructure Support[C]. Proc of IEEE INFOCOM 2010, San Diego, USA, pages 1–9, March 2010.
- [9]C. di Flora, M. Ficco, S. Russo, et al. Indoor and outdoor location based services for portable wireless devices[C], Proc. 25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2005.
- [10] Zhang B, Teng J, Zhu J, et al. EV-Loc: Integrating Electronic and Visual Signals for Accurate Localization[C]. MobiHoc 2012 Proceedings of the Thirteenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, 2012:25-34.
- [11]Wang H, Sen S, Elgohary A, et al. No Need to War-drive: Unsupervised Indoor Localization[C]. MobiSys 2012: Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Systems Applications and Services, 2012:197-210.

- [12]Sridhar A, Nahrstedt K, Vu L. Sangam—efficient cellular-WiFi group framework for file sharing service[C]. MILCOM 2012: Military Communications Conference, 2012:1-6.
- [13] Priwgharm R, Srivilas K, Cherntanomwong P. Indoor localization system using RSSI measurement in wireless sensor networks based on ZigBee standard[C]//The 3rd National Conference on Information Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010:225-228.
- [14]Hua Long, Joan Lu, Qiang Xu. A New RSSI-based Centroid Localization Algorithm by Use of Virtual Reference Tags. INFOCOMP 2013.
- [15]Shiu Kumar, Seong-Ro Lee. Localization with RSSI values for Wireless Sensor Networks: An Artificial Neural Network Approach[C]. International Electronic Conference on Sensors and Applications.2014,7:1-6.
- [16]Eric Foxlin, Sheng Wan, Thales. Improved Pedestrian Navigation Based on Drift-Reduced MEMS IMU Chip. ION 2010 International Technical Meeting, January 25-27, 2010, San Diego, CA.
- [17]Silva R, Carvalho P, Sousa P, et al. Enabling heterogeneous mobility in Android devices[J]. Mobile Networks and Applications, 2011, 16(4):518-528.
- [18]WANG Y P, YANG X, ZHAO Y T, et al. Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods[C]//2013 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, 11-14 Jan, 2013:837-842.
- [19]LI Juanjuan, ZHANG Jinyi, ZHANG Binyu, et al. Fuzzy fingerprint location for bluetooth specification version4[J]. Journal of Shanghai University: Natural Science, 2013, 19(2):126-131.
- [20] PRATAMA A R, WIAN W, HIDAYAT R. Smartphone based pedestrian dead reckoning as an indoor positioning system[C]//IEEE International Conference on System Engineering and Technology, Bandung, 11-12 Sept, 2012:1-6.
- [21]Kurose J.F, Ross, K.W. Computer Networking: A Top-Down Approach (5thed.).Boston, MA: Pearson Education. ISBN 978-0-013-136548-3.
- [22]YAN L, WANG J J. A robust pedestrian navigation algorithm with low cost IMU[C]//2012 IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation(IPIN), Sydney NSW, 13-15 Nov 2012:1-7.
- [23]VANINI S, CIORDANO S. Adaptive context-agnostic floor transition detection on smart mobile devices[C]//2013 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), San Diego, CA, 18-22 March 2013:2-7.

- [24]CORRER A, MORELL A, BARCELO M, et al. Navigation system for elderly care applications based on wireless sensor networks[C]//2012 IEEE 20th European Signal Processing Conference, Bucharest, 2012:210-214.
- [25]SABATELLI S, ALGANI M, FANUCCI L, et al. A double-stage Kalman filter for orientation tracking with an integrated processor in 9-D IMU[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2012, 62(3):590-598.
- [26]C Cliff, H Muller. Personal Position Measurement Using Dead Reckoning In Proc of the 7th Int'l Symposium on Wearable Computers, New York, U.S., pages 166–173, Oct. 2003.
- [27]S. Beauregard, H Haas. Pedestrian Dead Reckoning: A Basis for Personal Positioning[C]. In Proc of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC06), Hannover, Germany, pages 27–35, Mar. 2006.
- [28]Y Jin, M Motani, W Soh, J Zhang. Sparse Track: Enhancing Indoor Pedestrian Tracking with Sparse Infrastructure Support[C]. Proc of IEEE INFOCOM 2010, San Diego, USA, pages 1–9, March 2010.
- [29]M Vossiek, L Wiebking, P. Gulden, et al. “Wireless Local Positioning”[C]. IEEE Microwave Mag, vol.4, Issue 4, December 2003, pp:77-86.
- [30]C. di Flora, M. Ficco, S. Russo, et al. Indoor and outdoor location based service for portable wireless devices[C]. Proc. 25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2005.
- [31]K. Muthukrishnan, M. E. Lijding, P. J. M.. Towards Smart Surroundings: Enabling Techniques and Technologies for Localization[C], Proc. International Workshop on Location-and Context-Awareness, Berlin, Germany, 2005.
- [32]Jeff Thurston. "GALILEO, GLONASS And NAVSTAR A Report on GPS for GIS People". GIS Cafe.com, 2002.
- [33]Bill R, Cap C, Kofahl M, et al. Indoor and Outdoor Positioning in Mobile Environments[J]. Geographical Information Sciences, 2004:91-98.
- [34]Brida P, Machaj J, Benikovsky J, et al. A New Complex Angle of Arrival Location Method for Ad Hoc Networks [C] //2010 7th Workshop on Positioning Navigation and Communication (WPNC). Dresden: IEEE Press, 2010:284-290.
- [35]Kamol Kaemarungsi and Prashant Krishnamurthy. "Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting". 2004.
- [36]Lee B G, Chung W Y. Multitarget three-dimensional indoor navigation on a PDA in a wireless sensor network[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(3):799-807..
- [37]J D Parsons. The Mobile Radio Propagation Channel, 2nd ed. England: John Wiley & Sons Ltd, 2000.

- [38]Nazan Shirehjini A A, Yassine A, Shirmohammadi S. An RFID-Based Position and Orientation Measurement System for Mobile Objects in Intelligent Environments[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(6):1664-1675.
- [39]Nerius Tradišauskas and Dalia Tiesyte. A Study of Map Matching for GPS Positioned Mobile Objects[C]. In 7th WIM Meeting, Uppsala, 2004.
- [40]刘克中,王殊,胡富平,等. 无线传感器网络中一种改进 DV-HOP 节点定位方法[J]. 信息与控制, 2007,35(6):787-792.
- [41]Sparkfun 9 dof razor imu: <http://www.sparkfun.com>.
- [42]胡伟娅. 基于惯性测量和 RSSI 的个人室内定位系统[D].上海交通大学,2013.
- [43]Open Sound Control: <http://opensoundcontrol.org/introduction-osc>.
- [44] 王赛伟. 基于位置指纹的 WLAN 室内定位方法研究[D]. 哈尔滨工业大学,2009.
- [45]Pawel K, Javier A, Esteban E, et al. Angle- of- Arrival Localization Based on Antenna Arrays for Wireless Sensor Networks[J]. Computers and Electrical Engineering, 2010, 36(6):1181-1186.
- [46]Kumar S, Lobiyal DK. An Advanced DV-Hop Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. WIRELESS PERSONAL COMMUNICATIONS, 2013, 71(2):1365-1385.
- [47]Li XF, Chen LF, Wang JP, et al. Fuzzy system and Improved APIT (FIAPIT) combined range-free localization method for WSN[J]. KSII TRANSACTIONS ON INTERNET AND INFORMATION SYSTEMS, 2015, 9(7):2414-2434.
- [48]Oliveira L, Li HB, Almeida L, Abrudan TE. RSSI-based relative localisation for mobile robots[J]. AD HOC NETWORKS, 2013, 13:321-335.
- [49]Liu Hsin-Chin, Hsuan Cheng-Wei. AOA estimation for coexisting UWB signals with multipath channels[C]//2014 International Conference on Telecommunications and Multimedia, Jul:28-30, 2014:173-178.
- [50]Le T N, Kim J, Shin Y. TDOA Localization Based on Particle Swarm Optimization in UWB Systems[J]. IEICE Transactions on Communications, 2011, E94.B(7):2013-2021.
- [51]王千,金光,钮俊. 一种基于 RSSI 的混合定位算法[J].传感技术学报,2015,12(12):1823-1829.
- [52]施伟,高军. 无线传感器网络中基于 RSSI 的改进加权质心定位算法[J].计算机应用与软件, 2015,12(12):68-70.
- [53]丁恩杰,乔欣,常飞,等. 基于 RSSI 的 WSNs 加权质心定位算法的改进[J].传感器与微系统,2013(12):98-103.

[54]冯志辉. 使用树莓派实现网络监控系统[J]. 电子技术与软件工程, 2015(5):85-85.

[55]http://blog.sina.com.cn/s/blog_4ef0226e01012yi1.html.

发表论文和参加科研情况说明

参与的科研项目：

本人参与了国家“八六三”高技术研究发展计划项目(2014AA015202)。

发表论文：

[1] 杜佳星,陈亚伟,张静. 基于聚类分析优化的距离修正室内定位算法[J]. 计算机工程与科学. (已录用)

致 谢

时光荏苒，在天津大学学习和生活已经两年多的时间，蓦然回首，眼前如同播放电影胶片一般演绎着青春的点点滴滴，两年的岁月让我脱去了年少的轻狂和稚嫩，成长很多、收获颇多，同样感慨良多，我也将带着我的无限回忆和成长走向下一个人生港口。值此论文即将完成之际，谨向一直以来关心、支持和鼓励我的老师、同学和家人表达我衷心的感谢。

首先，衷心感谢我的导师张静副教授，张老师在工作上勤恳敬业，在科研上要求严格、严谨认真，时刻秉承着实事求是的校训，这在潜移默化中深深影响着我，使我受益终身。在科研过程中，张老师更是给予我无私的帮助和悉心的指导，使我的科研能够如此有条不紊地进行，在此向张老师表达我最崇高的敬意。

感谢苏育挺老师一路指引我在科研道路上进行探索，是您带领我在科研道路上一一步一步地前行，见证了我的每一分成长。感谢您在两年半的时间内不仅仅让我学会了如何去科研，更让我感受到了积极向上、乐观豁达的生活态度。在此向苏育挺老师表达我最衷心的感谢！

此外还要感谢中国科学院计算技术研究所赵泽老师、孔祥兵老师、靳国庆老师等人在实习期间对我的谆谆教诲，他们渊博的知识和开阔的视野都在无形中影响着我。

感谢已经毕业了师兄师姐们，是你们在我刚进入实验室时给予我最热心的帮助，给我的研究生学习和生活节奏提出了很多有建设性的意见和建议。

在实验室工作及撰写论文期间，实验室的同学们和师弟师妹们对我论文中的研究工作给予了热情帮助，可爱的室友们同样给予了我无数精神上的支持和鼓励，在此向他们表达我的真挚的感谢。

感谢我的父母和朋友们，他们的理解和支持使我能够顺利度过各种困难和挫折，也是他们作为我坚强的后盾，让我能够在学校专心完成我的学业。

最后，感谢各位评审老师百忙中抽出时间评阅我的硕士论文并给予指导，再次向所有帮助关心我的人致以最衷心的感谢！

天津大学
全日制工程硕士学位论文

TIANJIN UNIVERSITY
DISSERTATION OF FULL-TIME MASTERS OF ENGINEERING



2014204157