



单位代码 10006

学 号 12191066

分 类 号 TN967.2

北京航空航天大学
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

毕业设计(论文)

基于 FM/WiFi 定位的信号处理技术研究

学 院 名 称	<u>电子信息工程学院</u>
专 业 名 称	<u>信息对抗</u>
学 生 姓 名	<u>王 海 东</u>
指 导 教 师	<u>丛 丽</u>

2016 年 6 月

北京航空航天大学

本科生毕业设计（论文）任务书

I、毕业设计（论文）题目：

基于 FM/WiFi 定位的信号处理技术研究

II、毕业设计（论文）使用的原始资料（数据）及设计技术要求：

北航新主楼 F 座一楼采集的 WiFi 信号各个 AP 的 BSSID 和 RSSI, FM 信号指定频道的 RSSI, 以及 F 座一楼测量所得的局部平面图。

III、毕业设计（论文）工作内容：

学习 Java 语言, 学习 Android 程序开发, 学习绘制 Android 程序界面, 学习调用 Android 的 WiFi 模块, 研究寻找调用 Android 的 FM 模块的方法, 开发采集 WiFi RSSI 数据的软件。了解并掌握指纹定位的原理和步骤, 掌握 KWNN 算法的使用。采集新主楼 F 座一楼的 WiFi 和 FM 数据, 编写 MATLAB 和 C 语言的指纹定位程序, 给定位程序添加 AP 约束和融合的功能, 测试分析定位效果, 总结结论。

IV、主要参考资料：

V. Moghtadaiee, A. G. Dempster, S. Lim. Indoor localization using FM radio signals: A fingerprinting approach[A]// Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2011 International Conference on[C]. IEEE, 2011: 1-7.

B. Shin, J. H. Lee, T. Lee, et al. Enhanced weighted K-nearest neighbor algorithm for indoor Wi-Fi positioning systems[A]// Computing Technology and Information Management (ICCM), 2012 8th International Conference on[C]. IEEE, 2012: 574-577.

电子信息工程 学院（系） 信息对抗 专业类 120227 班
学生 王海东

毕业设计（论文）时间： 2016 年 2 月 29 日至 2016 年 5 月 27 日

答辩时间： 2016 年 6 月 6 日

成 绩： _____

指导教师： 丛丽

兼职教师或答疑教师（并指出所负责部分）：

_____系（教研室） 主任（签字）： _____

注：任务书应该附在已完成的毕业设计（论文）的首页。

本人声明

我声明，本论文及其研究工作是由本人在导师指导下独立完成的，在完成论文时所利用的一切资料均已在参考文献中列出。

作者：王海东

签字：

时间：2016 年 6 月



基于 FM/WiFi 定位的信号处理技术研究

学 生：王海东

指导老师：丛 丽

摘要

当前室内基于位置服务蕴藏着巨大的商机，而室内精确定位技术则是该服务的基础。由于 GPS 系统在室内难以正常工作，当前室内定位技术主要通过利用 WiFi、FM、RFID 和蓝牙等已有信号体制和自主搭建信号设施等方法进行定位。考虑到采用已有信号体制无需搭建设备，本课题利用现有的 WiFi 和 FM 两种信号进行基于 RSSI 的指纹定位实验，以充分利用 WiFi 高定位精度和 FM 覆盖范围广的特点。首先分别用 WiFi 和 FM 信号进行独立定位，然后利用 WiFi AP 对两种方式进行约束并定位，再分别采用指纹融合和加权融合的方法定位，对以上方法的误差结果均采用均值和误差分布两种指标进行评估。WiFi 独立定位的平均误差为 1.44m，AP 约束后精度提升 1.4%，运算时间减少 39%；FM 独立定位平均误差为 3.06m，AP 约束后精度提升 44.8%，运算时间减少 22%，说明 AP 约束能显著提高 FM 定位的精度，并减小 WiFi 和 FM 定位的运算量。WiFi AP 数量较多时，指纹融合和加权融合相比 WiFi 独立定位的精度提升分别为 4.9% 和 2.8%；AP 数量很少时，两种融合方式相比 WiFi 独立定位的精度提升则分别为 15.0% 和 14.0%，说明 WiFi 和 FM 融合能改善定位精度，特别是在 AP 数量很少的环境中，精度提高尤为明显。

关键词： 指纹定位，KWNN 算法，WiFi 定位，FM 定位



Study of Signal Processing Techniques Based on FM/WiFi Positioning

Author: Wang Haidong

Tutor: Cong Li

Abstract

Great business opportunities hide in indoor location based services nowadays, whose basis is indoor accurate positioning technology. Currently indoor positioning technologies usually utilize available signals like WiFi, FM and RFID or build their own signal systems due to the poor performance of Global Positioning System in indoor environment. Considering the convenience of using available signals, in this subject fingerprint positioning experiments based on received signal strength indicator are conducted with the help of WiFi and FM signals, which can exploit the high precision of WiFi positioning and the vast spread of FM signal. First individual positioning experiments using WiFi and FM separately are carried out, then the two methods are both constrained by the use of WiFi AP. After these, the fingerprint fusion method and the weighted fusion method are implemented. All the results of methods above are evaluated with both mean error and distribution of errors. Results of the experiments indicate that mean error of individual WiFi positioning method is 1.44m, while AP constraint improves the precision by 1.4% and the calculation time by 39%. Mean error of individual FM positioning is 3.06m, while AP constraint improves the precision by 44.8% and reduce the time cost by 22%. It can be concluded that AP constraint can improve the precision of FM positioning greatly while reducing much calculation time for both WiFi and FM. When it's rich of WiFi APs, fingerprint fusion method and weighted fusion method reduce the mean error of WiFi positioning by 4.9% and 2.8%. However, the improvement on mean error of WiFi positioning is 15.0% and 14.0% when there is few APs. From this we know the fusion of WiFi and FM can improve positioning error, especially in environments with few APs, where the improvement is huge.

Key words: Fingerprint positioning, KWNN algorithm, WiFi positioning, FM positioning



目录

1	绪论	1
1.1	研究背景及目的	1
1.2	国内外研究现状	2
1.3	研究内容	4
1.3.1	指纹定位算法	4
1.3.2	KWNN 算法	4
1.3.3	算法测试	4
1.3.4	Android 开发	4
1.4	论文构成	5
2	背景知识概述	6
2.1	信号体制概述与选择	6
2.1.1	WiFi 信号体制概述	6
2.1.2	FM 广播信号体制概述	6
2.1.3	室内定位的信号体制选择	7
2.2	指纹定位算法	7
2.2.1	KWNN 算法	8
2.3	基本定位方案	9
2.4	AP 约束方法	10
2.5	融合方法	13
2.5.1	指纹融合	13
2.5.2	加权融合	13
2.6	性能评价指标	13
3	数据采集与数据库构建	15
3.1	采集区域选择	15
3.2	采集方案	16
3.3	WiFi 数据的采集	16



3.3.1 采集工具与方式	16
3.3.2 采集内容	18
3.4 FM 数据的采集	19
3.4.1 采集工具与方式	19
3.4.2 采集内容	20
3.5 数据库构建	21
3.5.1 数据库设计	21
3.5.2 坐标推算	23
3.5.3 数据库生成与信息统计	24
4 指纹定位与结果分析	28
4.1 WiFi 单独定位	28
4.1.1 均值评价指标	28
4.1.2 误差分布评价指标	29
4.2 FM 单独定位	31
4.2.1 均值评价指标	32
4.2.2 误差分布评价指标	32
4.3 AP 辅助 FM 定位	35
4.3.1 均值评价指标	36
4.3.2 误差分布评价指标	37
4.4 AP 辅助 WiFi 定位	40
4.4.1 均值评价指标	41
4.4.2 误差分布评价指标	41
4.5 指纹融合	45
4.5.1 均值评价指标	46
4.5.2 误差分布评价指标	46
4.6 加权融合	51
4.6.1 均值评价指标	51
4.6.2 误差分布评价指标	52
4.7 融合效果的研究	53



4.8 总结与分析	55
5 后续工作计划	57
结论	59
致谢	60
参考文献	61



1 绪论

1.1 研究背景及目的

室内基于位置服务有着巨大的社会与商业价值。在大型商场中顾客的实时精确定位可用于给顾客提供路线信息,将顾客引导到想去的商品区,防止顾客迷路,也可用于对顾客停留区域、时间的数据分析,向顾客推送其可能感兴趣的广告。在救火现场消防人员进入室内之后若能对消防人员进行精确定位,那么消防人员的位置信息可以和指挥部的火情信息有效结合,有利于指挥部正确决策,还能将行进路线和危险区域及时告知消防员,保障消防人员的安全。在大型仓库中货物的精确定位能有效提高货物查找运输效率,降低时间成本,提高效益。预计到 2020 年,室内基于位置服务的全球市场价值将达到 100 亿美元^[1],而这一切都依赖于室内精确定位技术。

当前室外精确定位技术中 GPS 系统 (Global Positioning System) 较为成熟同时又应用最广,然而 GPS 系统并不能很好地应用于室内定位的情景中。室内环境相比室外更加复杂,由于墙壁和各种障碍物的阻挡,使得无障碍的直线传播条件常常难以达到,室内人员移动的影响也比室外要显著,造成的信号衰减和多径效应对 GPS 信号影响严重,于是造成了 GPS 系统在室内环境中接收卫星数量少、信号强度低的情况,难以满足精确定位的要求。

因此出现了利用 WiFi^{[2][3][4]}、蓝牙^{[5][6]}、FM (Frequency Modulation) 广播^{[7][8]}、GSM (Global System for Mobile Communications)^{[9][10]}、RFID (Radio-frequency identification)^[11]等信号体制的室内定位技术与系统。基于电磁波的室内定位技术的定位效果与所使用的电磁波波长密切相关,电磁波的传播特性对系统定位效果和适用场景有直接影响,信号体制的选择需要兼顾多方面的考虑。在这些信号中,WiFi 信号波长短,定位精度高,在当前室内环境中普及程度高,智能手机中普遍内置了 WiFi 网络接入的功能,可以直接利用现有设备进行定位。但 WiFi 信号的覆盖范围有限,而且在 WiFi 接入点数量较少时精确定位难以进行。FM 信号波长较长,衰减小,覆盖范围大,在通常环境中均能正常接收,但其定位精度不如 WiFi 信号。考虑到两种信号体制各自的优缺点,将 WiFi 和 FM 信号结合起来进行定位能综合利用它们各自的优势,避免各自的不足,是一种较好的定位解决方案。

本课题旨在利用 WiFi 和 FM 信号进行室内定位,通过采集 WiFi 和 FM 信号的 RSSI



(Received Signal Strength Indicator, 接收信号强度指数), 采用基于 RSSI 的指纹定位算法实现室内精确定位。首先采用 MATLAB 软件和 C 语言等工具在 PC 端实现算法功能, 然后在多种条件下测试分析算法定位效果, 并将 WiFi 和 FM 信号进行融合定位, 测试定位效果。然后将算法移植到 Android 平台, 实现采集 RSSI 数据和基于采集的数据进行实时定位的功能。本课题也是对学生自主学习能力、编程能力和解决问题能力的锻炼, 对学生工程能力的培养也具有非常积极的作用。

1.2 国内外研究现状

2000 年, 微软公司的 Paramvir Bahl 等人提出了用 2.4GHz 电磁波信号进行用户定位与追踪的 RADAR 系统。他们在一块长 43.5m 宽 22.5m 的区域内布置了 3 个信号发射点, 较均匀地选取了 70 个点测量了信号强度和信噪比, 然后用 KNN (k-Nearest Neighbor) 算法进行搜索匹配, 结果显示在 50% 情况下误差在 2.94m 内^[12]。同年他们对 RADAR 系统做出了改进, 采用了一种近似的维特比算法来对用户进行连续追踪, 将用户位置精度提高了 33%^[13]。

2006 年, 台湾国立清华大学的 Chin-Liang Wang 和 Yih-Shyh Chiou 提出了一种基于电磁波传播模型和卡尔曼滤波的自适应定位方法。他们针对 WiFi 信号的信噪比建立了以距离为变量的基于二阶多项式的传播模型, 使用卡尔曼滤波来获取终端的位置, 并根据环境信噪比或信号强度的变化进行自适应调整。算法运行在一个移动终端上, 采用匀速模型对终端的运动进行建模, 然后在楼层的走廊中进行了定位试验。实验结果显示他们的方案能有效降低信号强度、SNR 的测量误差并提供高准确度的位置和速度估计, 95% 以上的测试点的误差都在 1.55m 内^[14]。

2011 年, 新南威尔士大学的 Vahideh Moghtadaiee 和 Andrew G. Dempster 提出了一种基于 FM 信号 RSSI 的指纹定位系统。他们对确定性算法和基于概率的算法做了比较, 确定性算法采用 KWNN 算法, 基于概率的算法采用直方图算法, 并对其融合做了测试, 结果显示两种算法结果取均值的效果最好, 平均距离误差为 2.48m。由于他们与另一篇基于 WiFi 的室内定位文章^[15] 使用了相同的测试场地, 便对 WiFi 与 FM 定位的效果做了比较, 结果显示 WiFi 定位的精度更高^[16]。

2012 年, 韩国世宗大学的 Beomju Shin 等人提出了用于指纹定位的 KWNN 算法的一种改进方法。考虑到 KWNN 算法中的 k 值固定不变, 若 k 值较大有可能将实际距离很远的参考点纳入坐标加权中, 导致较大的定位误差。因此他们提出在选出 k 个参考点之



后再在其中采用一定方法进行一次筛选,滤除实际距离可能较远的参考点,再进行坐标加权。他们在一片 $48 \times 22m^2$ 的区域进行了定位试验,参考点间距 3 米,结果显示他们提出的算法定位误差为 2.1077m,好于 KWNN 的 2.8661m 和 KNN 的 4.0473m^[17]。

2012 年,约翰霍普金斯大学的 Yin Chen 和微软公司的 Jie Liu 与 Bodhi Priyantha 分别在商场、办公室和居民楼内进行房间级定位实验,他们采用基于信号 RSSI 的指纹定位方法,对 WiFi 和 FM 信号都进行了测试。在结合了 FM 的信噪比、多径效应和频偏等指标并归一化后,将目标正确定位到所在房间的概率,在欧式距离下能达到 90%,曼哈顿距离下能达到 93%。而单独用 WiFi 的 RSSI 进行指纹定位,正确率则依次为 76% 和 88%。此外,他们发现 FM 和 WiFi 定位产生的误差不相关,于是将 FM 与 WiFi 的特征量整合起来并归一化,此时准确率达到了 94% (欧氏距离) 和 98% (曼哈顿距离)^[18]。

2013 年,美国马里兰州的 Noah Pritt 提出了一种基于 WiFi 信号 RSSI 的室内定位系统,采用指纹定位法进行定位,分类算法采用极大似然法,并借助贝叶斯定理将建筑物的室内拓扑纳入考虑作为定位约束。在已知室内拓扑和采集点位置的情况下,可以确定每个点是否能直接到达其他各点,排除不可能的路径,并认为剩余的路径选择概率相同。该系统在一座两层家庭房屋和一座大型商场中进行了连续行走的定位导航实验,实验中参考点分别均匀选取了 18 个和 27 个,测试点则围绕着参考点各选取了 100 个,在房屋内的定位准确率达到了 97.5%,在商场中的定位准确率则达到了 100%^[19]。

2014 年,韩国成均馆大学的 Mohd Nizam Husen 和 Sukhan Lee 针对养老院内用户的定位和方向检测给出了基于 WiFi 信号 RSSI 的指纹定位方法的技术方案。他们在一块长 4.5m 宽 3.6m 的区域四角布设了四个 WiFi AP,采用区域定位的测试方法,在区域内进行定位实验。结果显示他们的方法能做到 1.8m 精度的位置区分与方向区分^[20]。

2015 年,微软公司的 Sungro Yoon 等人建立了基于 FM 指纹的室内定位系统 ACMI,该系统基于 FM 发射塔的有关信息对 FM 信号在室内的传播建立模型,从而生成 FM 信号在室内的 RSS 分布的指纹数据库,再用此数据库进行指纹定位。他们在室内等距选取了 375 个测试点测试了实际的 FM RSS 值,与模型在相同地点的计算值进行比较,比较结果显示模型虽然有误差,但能反映 FM 信号的变化趋势。该系统借助动作传感器在线进行参数调整和路径匹配以提高定位精度。然后他们在七个园区建筑内选取了 1109 个点进行定位试验,系统平均误差为 6 米。然后他们进行了在市区内选择了三所建筑进行定位实验,市区内因为建筑较多 FM 信号会经常被挡住,导致信号很弱,实际结果显示



市区的平均定位误差为 10 米^[21]。

1.3 研究内容

本课题主要研究如何利用 WiFi 和 FM 信号的信息采用定位算法实现室内定位。采用的方法是基于 RSSI 的指纹定位算法。

1.3.1 指纹定位算法

在室内复杂条件下, 墙壁等障碍物的阻隔使得直线无障碍传播难以实现, 衰减、多径和干扰的影响也比室外更强, 甚至天线的摆放方向、携带者的运动都会对定位结果产生显著影响^[22], 因此室外定位常用的三角定位法并不是很好的方法^[23]。

而另一种算法则是将空间中某点处相应电磁波信号的 RSSI 等信息作为该点的特征量, 基于不同的空间点特征量不同来区分各点并进行定位。由于将此特征量作为一个点的标识, 类似于人类的指纹作为身份的标识, 所以该特征量被称为该点的指纹, 该方法被称为指纹定位。

指纹定位既不需知道信号发射点的具体位置, 也不用测量距离或角度, 不要求直线无障碍传播, 非常适合在室内环境使用, 相比三角定位是更好的解决方案, 也是目前室内定位领域常用的定位算法。

1.3.2 KWNN 算法

KWNN (Weighted k-Nearest Neighbor) 算法是在 KNN 算法的基础上改进而来的。KNN 算法的主要思想是一个样本的属性可以由它在特征空间中的 K 个最邻近样本决定, 这些临近样本在目标样本属性值得确定中以相同权重贡献自己的属性值。如果将临近样本的贡献用其与目标样本的距离来进行加权予以区分, 就是 KWNN 算法。

1.3.3 算法测试

在新主楼内选取适当地点建立合适坐标系, 均匀选取一些参考点测量 WiFi 和 FM 信号 RSSI, 组建数据库。从数据库中随机选取一些点作为测试点, 其他点作为参考点, 进行定位仿真实验, 测试算法效果。将 WiFi AP 用于约束 WiFi 和 FM 定位, 测试效果, 并将两种信号进行融合, 测试定位效果。

1.3.4 Android 开发

Android 系统是当前移动平台市场份额最大的操作系统, 其开源的特点也使得开发者



易于研究其源码进行学习,给开发带来方便。同时全球市场份额第二的 iOS 系统的硬件目前并不支持 FM 广播。因此选择 Android 系统作为开发平台。

Android 应用程序主要使用 Java 语言进行开发。Java 是一种面向对象的编程语言,具有跨平台、泛型编程等特性,在企业应用开发和移动平台开发等领域有着广泛应用。

要开发出一个 Android 软件,需要学习 Activity、Service、BroadcastReceiver 和 ContentProvider 四大组件,学习使用各种图形界面的组件、各种资源的管理与使用、事件处理、输入/输出处理、网络通信等方面的知识。还要学习程序架构的设计,学习如何设计出模块化、拓展性强的软件。

1.4 论文构成

本文接下来按照如下方式组织:第二章介绍项目工作的整体方案架构,第三张详细介绍数据采集的方案和方法过程,第四章对 WiFi 和 FM 信号在各种条件组合下的定位效果采用两种评价指标进行测试与评估,并比较了融合方法在 AP 较多和 AP 很少的环境下的效果,然后对所有分析进行总结,再是总体的结论和后续工作计划,最后是致谢和参考文献。



2 背景知识概述

2.1 信号体制概述与选择

2.1.1 WiFi 信号体制概述

WiFi 是一种无线局域网连接技术, 基于 IEEE 802.11 标准, 频段为 2.4GHz 和 5GHz, 波长分别约为 12.5cm 和 6cm。

WiFi 网络由 WiFi AP (Access Point) 产生, AP 的一端连接外部以太网络, 另一端则通过无线网卡和天线发射信号组建无线的 WiFi 网络。采用 WiFi 技术发射的信号通常称之为 WiFi 信号。WiFi AP 会广播本网络的 SSID (Service Set Identifier), SSID 是一个长度 32 字节以内的字符串, 为该网络的标识。每个 AP 有一个 BSSID (Base Service Set Identifier), 为该 AP 在数据链路层的硬件地址。多个 AP 可以广播同一个 SSID 以提供漫游服务, 让用户从一个 AP 的覆盖范围移动到另一个 AP 的覆盖范围时不断开连接, 但每个 AP 的 BSSID 是唯一的, 因为每台设备的硬件地址全球唯一。

电子设备无需连接到某一个 WiFi 网络就可以获取周围信号达到一定强度的 WiFi 网络的一些信息, 这些信息包括 AP 的 BSSID, AP 所提供的网络的 SSID, AP 发射的信号频率等。由于 BSSID 对每个 AP 唯一, 所以可以用来对 AP 进行标识区分, 这一点将在本课题的数据库中用到。

WiFi 信号在传播过程会发生衰减, 因此在不同地点接收到的信号强度可能并不相同。常用 RSSI 来衡量 WiFi 信号在测量点的强度。AP 发射信号强度不变, 信号衰减越少, 则功率越大, 强度越高。在智能手机中, WiFi 信号的 RSSI 单位是 dBm, 即 dB 毫瓦。RSSI 的测量值通常为一负值, 该负值越大, 即绝对值越小, 表明信号越强。

2.1.2 FM 广播信号体制概述

FM 广播是用频率调制技术来传输声音信号的一种无线电广播技术。频率调制技术根据待传送信号的内容改变载波的频率, 从而将信息存储在载波的频率之中传播。FM 广播是当前主要的无线广播信号体制, 在汽车、手机上有广泛应用。

FM 广播信号由广播站通过发射塔发出。中国的 FM 广播频段为 87~108MHz, 电台频率间隔 0.2MHz, 最大频偏 ± 75 kHz. FM 信号可通过频率区分。



2.1.3 室内定位的信号体制选择

一方面, 由于衍射的特性, 电磁波在经过与其波长接近的障碍物时, 其传播会受到较大干扰, 而在经过相比其波长小很多的障碍物时, 则基本不受影响。FM 调频广播波长约 3 米, 受树木枝叶等的干扰较小, 对地形条件不太敏感。而 2.4 GHz 的 WiFi 信号波长约 12.5cm, 5 GHz 的 WiFi 信号波长约 6cm, 细微的环境变化如树叶的移动都会对其传播产生较大影响。同理, 室内物品的尺寸与 FM 信号波长接近的较少, 而能与 WiFi 信号波长等同的则很多, 导致 WiFi 信号的传播受到的干扰较大。不仅如此, 建筑材料对电磁波信号的吸收程度与频率正相关, 因此频率较高的 WiFi 信号在室内的衰减比 FM 信号强很多^[24]。

另一方面, 也正是由于波长越短衰减越大的特点, 在室内不同地点接收到的 WiFi 信号的强度差异会比 FM 信号大, 若将信号强度作为每个位置的特征用于室内定位中区分不同地点, 那么在同等条件下 WiFi 信号会比 FM 信号更容易区分, 也就会获得更高的精度。

当前智能手机普及程度高, 普遍内置了 WiFi 网络接入的功能, 室内 WiFi AP 的布置也较多, 因此使用 WiFi 信号定位能直接利用现有环境设备和智能手机, 基本不需要再花费时间精力安装新的设备。并且 WiFi 信号波长较短, 定位精度较高。但并不是室内所有的地方都有丰富的 WiFi 网络, 也并不是每个地方已经布置好的 WiFi AP 的布置都适合于高精度定位, 因此 WiFi 定位有其优势, 也有其局限性。

FM 信号波长较长, 由前面的分析可知其衰减较小, 覆盖范围大, 在许多特殊环境(如停电、火灾现场等)中都能正常接收, 在 WiFi AP 布置不足或衰减较大的地方一般也能保证接收, 适用范围通常比 WiFi 大很多。但 FM 波长大约是 WiFi 的 30 倍, 导致相同条件下其定位精度会低一些。

因此本课题考虑将 WiFi 与 FM 信号组合起来用于室内定位, 充分利用其各自的优势, 在 WiFi 环境较好的地方采用 WiFi 进行高精度定位, 在 WiFi 环境较差的地方将二者融合以提高定位的精度。

2.2 指纹定位算法

指纹定位中的信号采集点分为两种。一种是在训练阶段采集的作为数据库的点, 称为参考点, 简称 RP (Reference Point). 一种是在定位阶段采集的需要得到坐标的点, 称为测试点, 简称 TP (Test Point).

指纹定位的过程分为训练阶段与定位阶段^[25]。

在训练阶段,首先需要指定一个室内区域,在该区域内建立坐标系。然后按照一定间距选取 RP,在各个 RP 处采集所使用电磁波信号的 RSSI 作为该点的“指纹”。将所有 RP 的坐标和指纹信息整合起来建立指纹数据库。

在定位阶段,选取区域内一点作为 TP 进行测试,在 TP 处测量信号各个频道的 RSSI 作为该点的指纹,采用分类算法与数据库中所有 RP 的指纹进行比对识别,找出空间距离与 TP 最近的少量 RP,基于这些 RP 计算 TP 的坐标。

2.2.1 KWNN 算法

指纹定位算法中的分类方法采用 KWNN 算法。该算法的流程如图 2.1 所示。

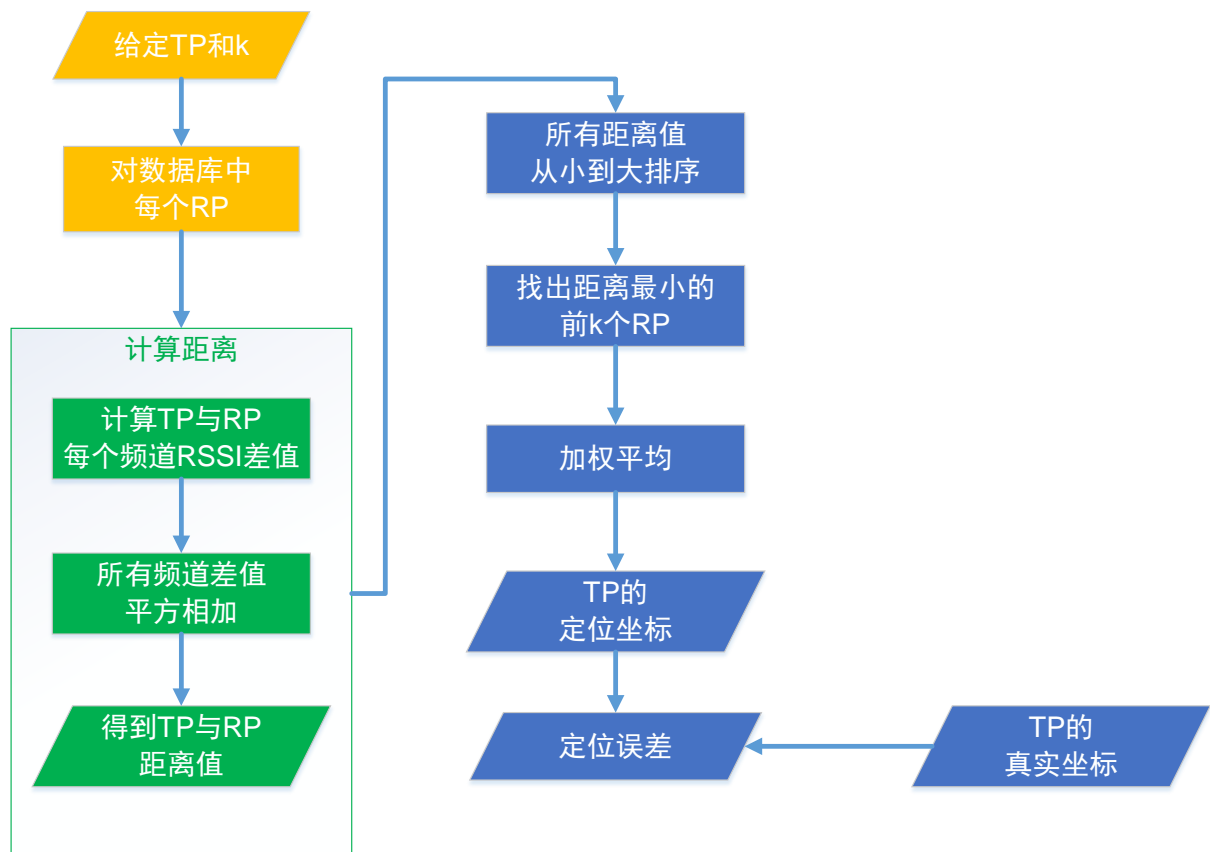


图 2.1 KWNN 算法流程图

两个点的距离定义为: 每个频道 RSSI 值的差的平方再相加。由于 FM 信号在室内衰减较小, 每个点均能检测到全部 21 个频道, 并测量得到对应的 RSSI 值。但 WiFi 信号在室内衰减较大, AP 的信号覆盖范围有限, 超出覆盖范围后信号强度太弱, 加上设备的可检测范围有限, 因此有些 AP 在一些点是检测不到的。这就导致在两个不同采集点检测到的 AP 列表可能不完全一致, 互相都有在另一个点检测不到的 AP。基于这种情

况, 采用的解决办法是将在某个点未能检测到的 AP 在该点处的 RSSI 值假设为一个很小的值 $minRssi$, 该值小于设备的最小可检测信号强度。本实验中设定:

$$minRssi = -105 \text{ dBm} \quad (2.1)$$

这样任意两点检测到的频道列表就完全相同, 再对每个频道的 RSSI 差值取平方并相加, 即可得到两点的距离。

计算出 TP 与数据库中所有 RP 的距离值之后, 对距离进行排序, 选择距离最小的 k 个 RP 作为近邻, 用这 k 个近邻的坐标加权平均运算后即可得到 TP 的坐标。设 RP 与当前 TP 的距离为 d_i ($i=1,2,3,\dots,k$), 则每个 RP 的权重 w_i 定义为

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^k d_i} + \delta, \quad i=1,2,\dots,k \quad (2.2)$$

其中 δ 为一小量, 为了避免距离 d_i 值为 0 而设置, 综合多次计算得到的实际 d_i 值后, 选择 $\delta = 0.00000001$ 。

这样对每个 TP 的坐标均能得到一个计算结果, 而其真实坐标已知, 所以可以计算出定位的误差值。本项目中采用欧氏距离计算坐标的误差。

由于 k 值对定位误差的影响未知, 所以实验中选取了一系列 k 值, 对每个 TP 都用各个 k 值计算了坐标和误差, 用于比较。

2.3 基本定位方案

本课题的实施方案可分为数据采集和定位分析两个阶段。

首先是数据采集阶段。选择一片室内区域, 按照一定密度在该区域内均匀选取信号采集点, 在每个采集点用开发的 Android 软件采集所有 WiFi AP 的 RSSI, 用频谱仪采集选定的 FM 频道的 RSSI。然后进行区域尺寸测量, 以一定测量精度建立该区域的坐标系, 测出每个采集点的三维坐标。再将这些信息整理成指纹数据库。

在定位分析阶段对 WiFi 和 FM 在多种条件下进行定位实验, 每种条件均进行 500 次独立重复实验, 即蒙特卡罗实验, 以反映算法整体效果。为保证 TP 与 RP 指纹的一致性与定位结果的普遍性, 每次定位都随机选取数据库中 20% 的采集点作为 TP, 剩下的 80% 采集点作为 RP。对每个 TP 均计算出一个定位坐标, 结合每个 TP 的真实坐标, 可以计算出定位误差。根据以上计算结果, 分析算法性能, 研究提高定位精度、降低计算

复杂度的方法。

整体方案如图 2.2 所示。

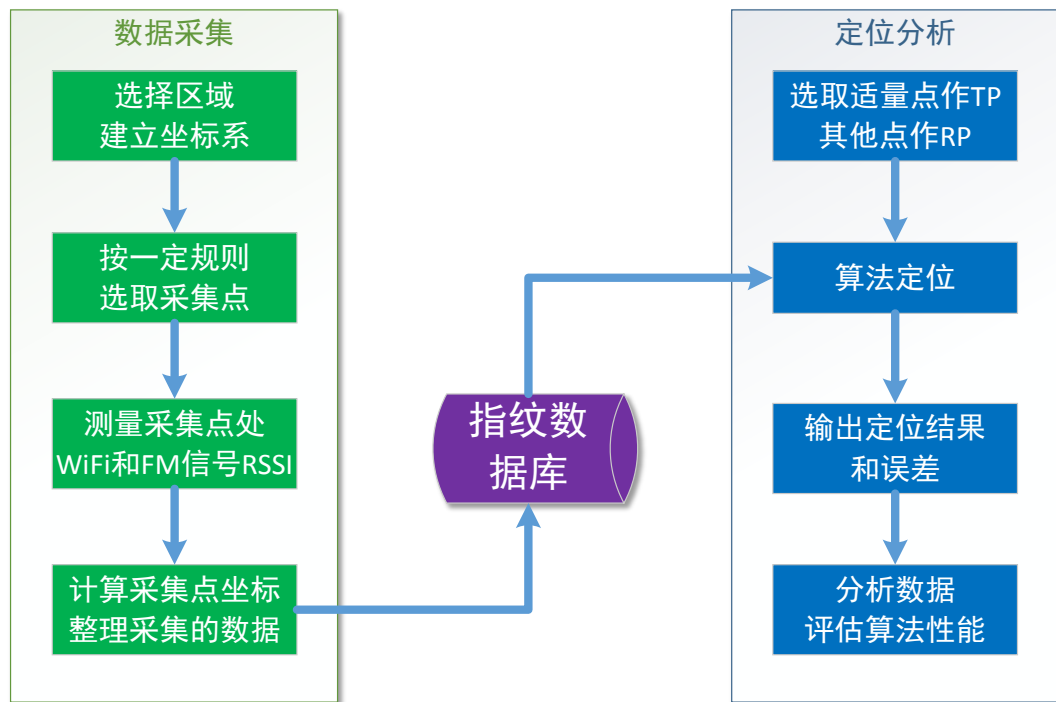


图 2.2 整体方案流程图

定位方法上，首先使用 KWNN 算法分别用 WiFi 和 FM 信号进行独立定位实验，测试两种信号的算法定位效果。然后利用 WiFi AP 对两种信号进行约束，测试约束下的定位效果。再将两种信号分别采用指纹融合和先独立定位再融合两种融合方法进行定位，测试比较融合效果。

本课题中采用 C 语言编程进行主要运算，输出运算结果，然后用 MATLAB 软件画图呈现结果。

2.4 AP 约束方法

本项目中采用 WiFi AP 对 WiFi 和 FM 定位进行约束来提高定位精度。AP 约束的原理如图 2.3 所示。首先对当前 TP 的 WiFi 信号 RSSI 按从大到小的顺序排序，RSSI 值越大的 AP 认为空间上离当前 TP 点越近，因此选择 RSSI 最大的几个 AP，就是选择了离当前 TP 最近的几个 AP，将这个集合记为 S。每个 AP 的覆盖范围有限，不同 AP 的覆盖范围会有交集，能将集合 S 中的 AP 全部检测到的点就在 S 中所有 AP 的覆盖范围的交集区域内。S 中 AP 数量越多，这些 AP 覆盖区域的公共交集就越小，而当前的 TP 始终保持在这个公共交集区域中，因此如果能找出其他也在这个公共交集区域中的 RP，



那么就可以认为这个 RP 在空间上非常接近当前 TP。将这些 AP 用来作为 KWNN 定位的 RP 库，那么最大定位误差也不会超出该区域的范围，理论上对定位结果会有很大提升。因此，遍历整个 RP 库，对每个 RP 都检查其 WiFi AP 列表，如果集合 S 中的每个 AP 在该 RP 也能检测到，那么该 RP 就在公共交集区域中，找出所有满足条件的 RP，再将它们作为 KWNN 定位的 RP 库，计算每个 RP 与当前 TP 的距离，进行排序，选出距离最小的 k 个 RP，将这 k 个 RP 的坐标进行加权平均，即可得到 AP 约束下的定位结

果。

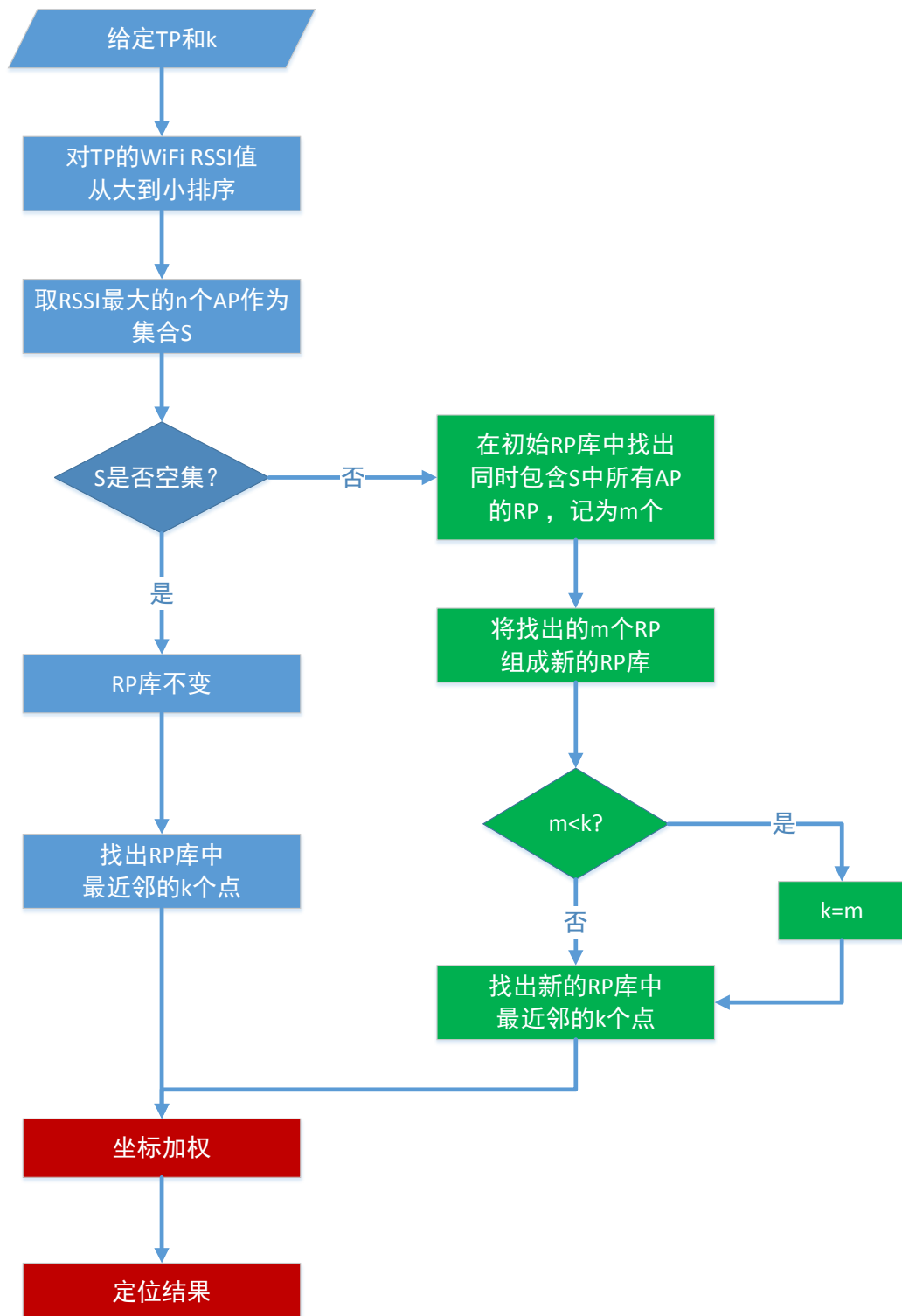


图 2.3 AP 约束辅助 FM 定位的原理

在找出所有符合条件的 m 个 RP 后，有可能遇到 $m < k$ 的情况，就无法再按照基本 KWNN 那样选出 k 个近邻了。这里做出了一个取舍，首先假设 AP 约束筛选出的 RP 比



其他 RP 定位精度高, 基于这样的假设, 在 $m < k$ 时令 $k = m$, 即不再找 k 个近邻, 而是找 m 个近邻, 也就是将筛选出的 m 个 RP 全部用于坐标加权。

有一种极端情况是 S 为空集, 即公共交集区域只有 TP 一个点, 那么此时就放弃使用 AP 约束, 还是对整个 RP 库中的所有 RP 来计算距离。

本项目中对每个 TP 使用的约束 AP 数量为该 TP 所能检测到的 AP 数量, 即能检测到的 AP 全部用上, 以充分提高定位精度。

2.5 融合方法

2.5.1 指纹融合

WiFi 和 FM 单独定位都是只采用一部分指纹信息, 如果将两类信息同时使用, 将 WiFi AP 和 FM 频率同等地看作频道, 就是指纹融合。指纹融合是融合方法的一种, 这种方法直接拓展了指纹信息的维度, 加入了其他维度的信息, 理论上会带来更好的定位效果。

2.5.2 加权融合

加权融合是将 WiFi 和 FM 独立定位得到的坐标结果进行加权平均。

要进行这种融合操作, 首先要用 WiFi 和 FM 信号分别进行独立定位。给定一个 TP, 独立定位的结果要求是一个坐标值, 因此这时需要基于 WiFi 和 FM 信号独立定位实验的结果选出对 WiFi 和 FM 各自定位效果最好的 k 值用于定位。

WiFi 与 FM 定位的性能并不相同, 加权平均的权重直接影响最终定位效果。由于实验之前并不清楚二者权重比为多少合适, 因此将 WiFi 的权重按照 1% 的步长从 0 到 100% 全部进行尝试, 相应地, FM 的权重就是从 100% 以 -1% 的步长递减到 0。

实验中对每个 TP 均用 WiFi 和 FM 信号分别进行独立定位, 为了找出 WiFi 和 FM 的最佳权重比, 将得到的两个三维坐标用多种权重比分别进行加权, 再将所得加权结果与真实坐标比较计算误差。

2.6 性能评价指标

蒙特卡罗方法会得到相同条件下的多组误差结果, 这些结果可用来评估算法效果。不同评价指标能反映算法不同方面的特点。本项目中采用了均值和误差分布两种评价指标。

均值评价指标是将相同条件下, 如相同 TP 数量且相同 k 值, 所得到的所有误差值取



算术平均, 作为该条件下该算法的效果。均值评价指标的优点是包含了样本的所有信息, 能反映样本的整体效果, 缺点是对极端值敏感。

误差分布评价指标是比较相同条件下所得的所有误差值的概率分布, 并取其中 50% 和 90% 概率下的误差值作为算法效果的反映。误差分布评价指标能反映某一条件下误差的整体分布情况, 对极端值没有算术平均数那么敏感。

3 数据采集与数据库构建

3.1 采集区域选择

选择的采集区域位于北航新主楼 F 座一楼,是从大门到电梯之间的一段约 $48m \times 27m$ 大小的“T”形区域,如图 3.1 所示,以网格所标识的区域即为采集区域。

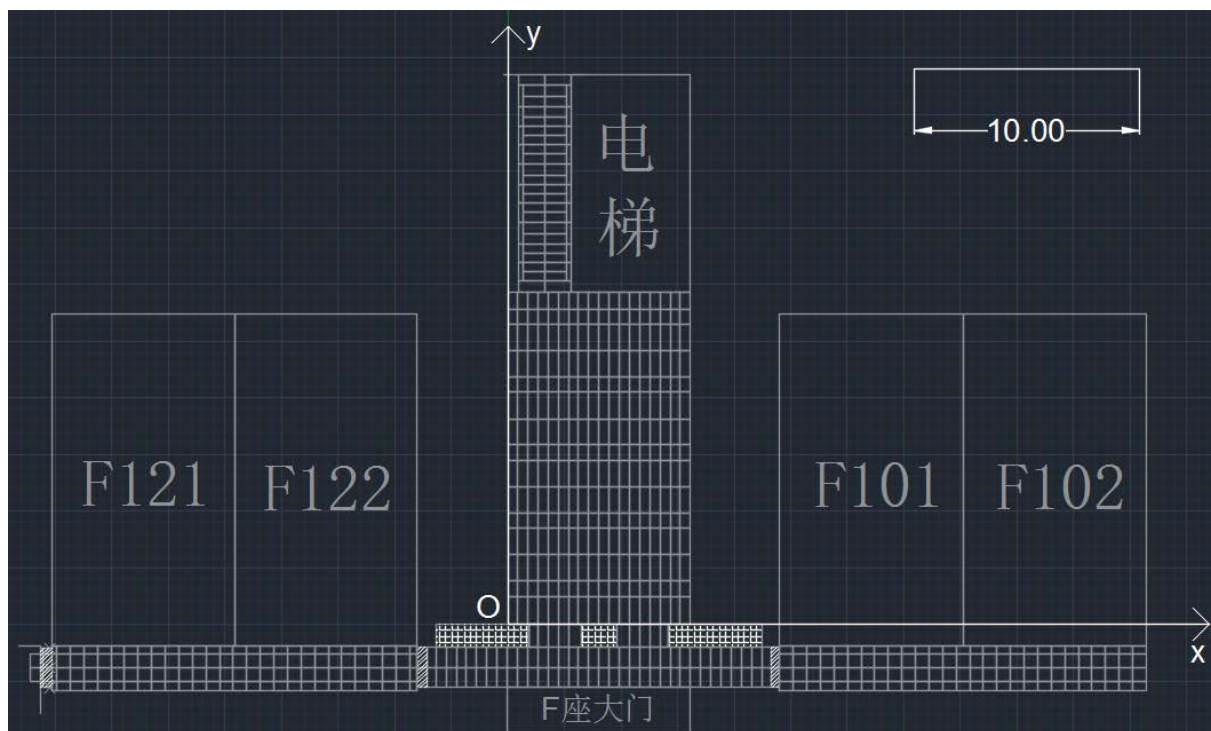


图 3.1 采集区域示意图

在采集区域建立坐标系如图 3.1 所示,坐标原点位于 F 座一楼大厅一角, x 轴正方向沿正南方向, y 轴正方向沿正东方向, z 轴方向垂直于地面向上。图 3.1 的精度为 $0.01m$, 采集区域的每个网格与实际地面的地板尺寸在该图的精度范围内一致,画出网格是为了方便选取标识采集点。图 3.1 完全由实地测量得到。

在该区域中一共选取了 325 个采集点,采集点的分布如图 3.2 所示,每个 \times 表示一个采集点。为了减少测量工作量,采集点多选在地板的交界点处。也因此相邻采集点沿 x 方向或 y 方向距离不完全固定,其范围为 $0.8m \sim 1.0m$,基本覆盖整个采集区域。

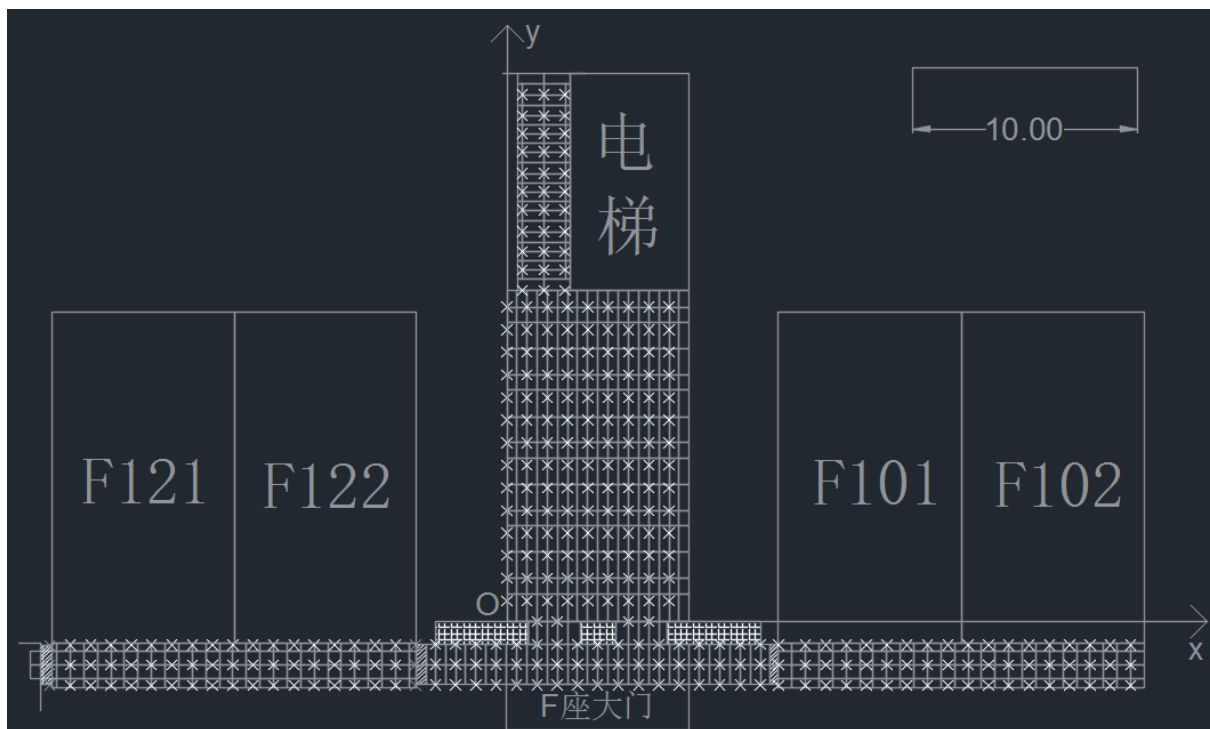


图 3.2 采集点分布示意图

3.2 采集方案

WiFi 采集程序的设计为每秒采集 20 次，均匀时间间隔。FM 采集程序的设计为每秒采集 60 次，均匀时间间隔。因此采集数据时在每个点运行 WiFi 和 FM 的采集程序各 5 秒，这样就将每个点的 WiFi 信号采集了约 100 组，FM 信号采集了约 300 组。每组数据为一次扫描，包含所有能检测到的 FM 频道或 WiFi AP 的信息。

3.3 WiFi 数据的采集

3.3.1 采集工具与方式

WiFi 数据的采集所用智能手机型号为华为荣耀 7 全网通高配版 (PLK-AL10)，使用的程序是自己开发的数据采集 Android 程序。采集用手机如图 3.3 所示，数据采集程序界面如图 3.4 所示。



图 3.3 华为荣耀 7 示意图

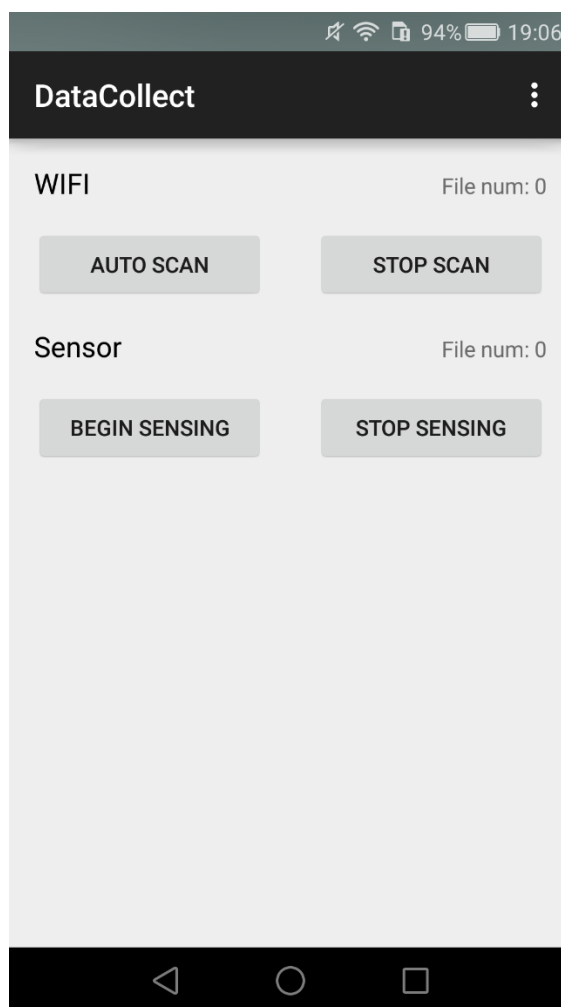


图 3.4 数据采集程序界面

图 3.4 中“**AUTO SCAN**”和“**STOPSCAN**”按钮用于采集 WiFi 数据，采集时先按

下“**AUTO SCAN**”按钮，即开始以每秒 20 组的速度自动扫描并存储周围 WiFi 网络的信息，5 秒后再按下“**STOP SCAN**”按钮，则停止自动扫描。采集程序的工作原理如图 3.5 所示。

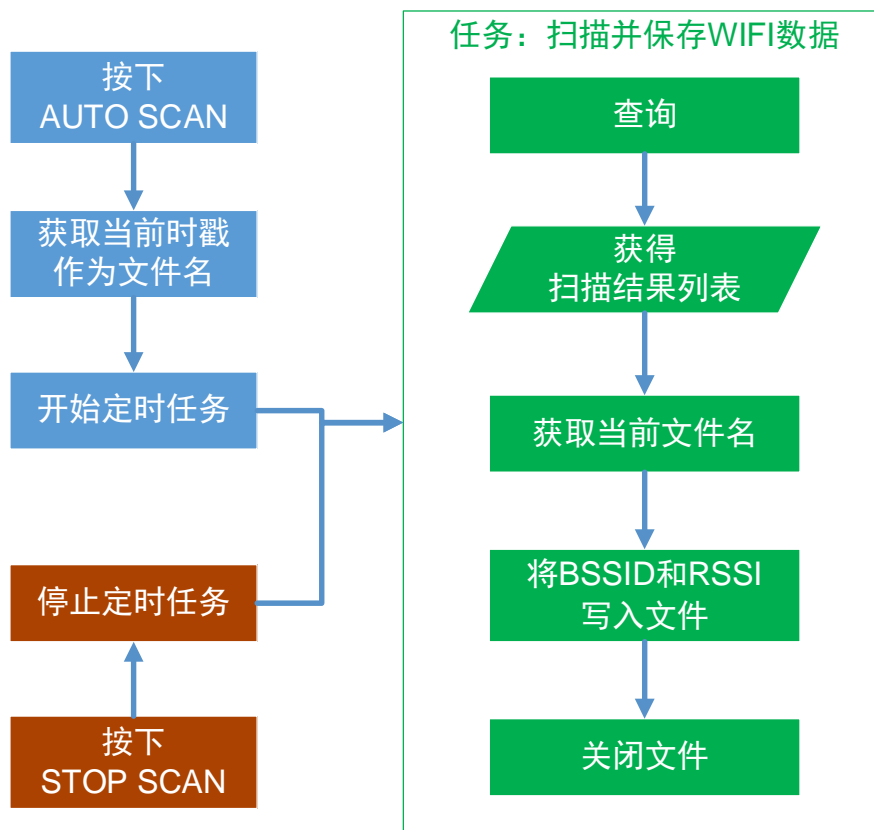
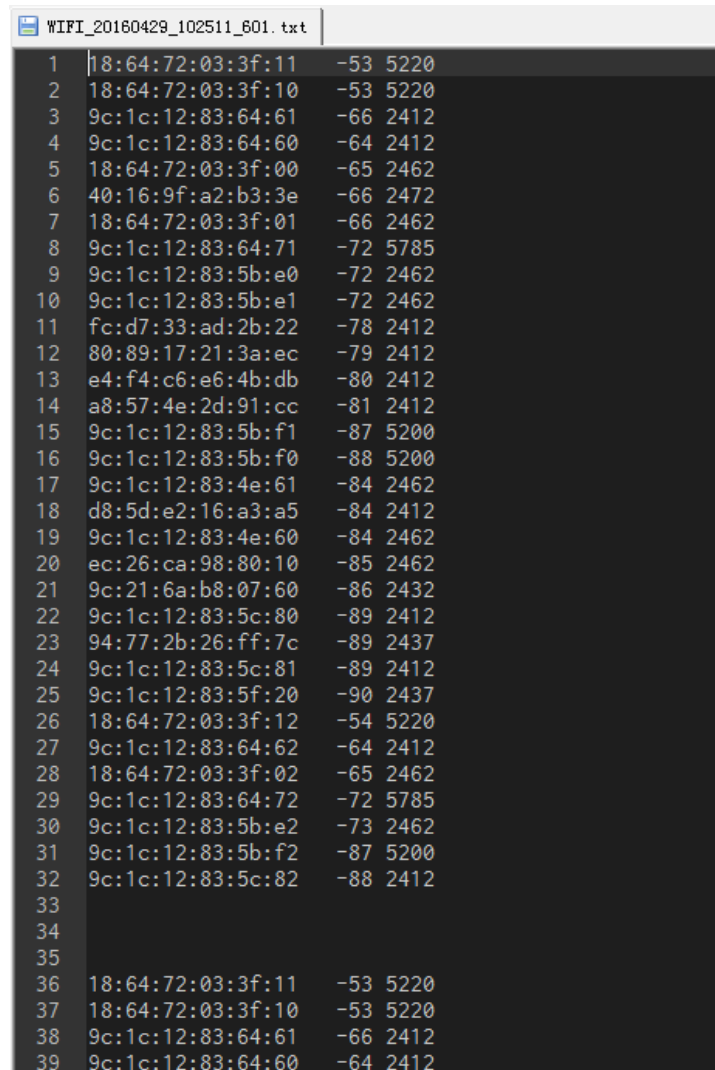


图 3.5 WiFi 采集程序工作原理

Android 的 WiFi 扫描数据采用查询的形式获得，因此要获得多次扫描的结果，就需要主动进行多次扫描。每次扫描返回的是一个列表，列表中每一项包含一个 AP 的相关信息，包括该 AP 的 BSSID 和测量点处的 RSSI。

3.3.2 采集内容

原始 WiFi 数据文件为文本文件，格式采用键值对形式，每个键为 AP 的 BSSID，对应的值为该 BSSID 的 RSSI。文件内容如图 3.6 所示。



1	18:64:72:03:3f:11	-53	5220
2	18:64:72:03:3f:10	-53	5220
3	9c:1c:12:83:64:61	-66	2412
4	9c:1c:12:83:64:60	-64	2412
5	18:64:72:03:3f:00	-65	2462
6	40:16:9f:a2:b3:3e	-66	2472
7	18:64:72:03:3f:01	-66	2462
8	9c:1c:12:83:64:71	-72	5785
9	9c:1c:12:83:5b:e0	-72	2462
10	9c:1c:12:83:5b:e1	-72	2462
11	fc:d7:33:ad:2b:22	-78	2412
12	80:89:17:21:3a:ec	-79	2412
13	e4:f4:c6:e6:4b:db	-80	2412
14	a8:57:4e:2d:91:cc	-81	2412
15	9c:1c:12:83:5b:f1	-87	5200
16	9c:1c:12:83:5b:f0	-88	5200
17	9c:1c:12:83:4e:61	-84	2462
18	d8:5d:e2:16:a3:a5	-84	2412
19	9c:1c:12:83:4e:60	-84	2462
20	ec:26:ca:98:80:10	-85	2462
21	9c:21:6a:b8:07:60	-86	2432
22	9c:1c:12:83:5c:80	-89	2412
23	94:77:2b:26:ff:7c	-89	2437
24	9c:1c:12:83:5c:81	-89	2412
25	9c:1c:12:83:5f:20	-90	2437
26	18:64:72:03:3f:12	-54	5220
27	9c:1c:12:83:64:62	-64	2412
28	18:64:72:03:3f:02	-65	2462
29	9c:1c:12:83:64:72	-72	5785
30	9c:1c:12:83:5b:e2	-73	2462
31	9c:1c:12:83:5b:f2	-87	5200
32	9c:1c:12:83:5c:82	-88	2412
33			
34			
35			
36	18:64:72:03:3f:11	-53	5220
37	18:64:72:03:3f:10	-53	5220
38	9c:1c:12:83:64:61	-66	2412
39	9c:1c:12:83:64:60	-64	2412

图 3.6 原始 WiFi 数据文件内容示意图

第一列为 BSSID，形式为字符串，第二列为 RSSI 的值，单位是 dBm，第三列是该网络所使用的频率，单位是 MHz。之后的定位工作只需要每个 AP 的 BSSID 和 RSSI，这里存储了频率信息是为了以后可能的拓展需要。不同次扫描之间用三个空行分隔，是为了在数据采集结束后对所采集的数据分布进行评估、验证需要，便于及时发现有问题的数据或是失败的采集点，防止对后续工作产生不必要的影响。

3.4 FM 数据的采集

3.4.1 采集工具与方式

由于还未找到控制手机中 FM 模块的方法，FM 数据的采集使用的是实验室的泰克 RSA306 频谱分析仪，如图 3.7 所示。



图 3.7 泰克 RSA306 频谱分析仪

采集时，采用 PC 上 Windows 系统的控制台通过 USB3.0 接口控制频谱仪，输入相应指令后即可按照设定的频率采集指定组数的数据。

FM 信号的采集工作由实验室的屈阳师兄完成，这也是本项目中唯一不是我本人完成的部分，其他的工作都是由我在导师的指导下完成。

3.4.2 采集内容

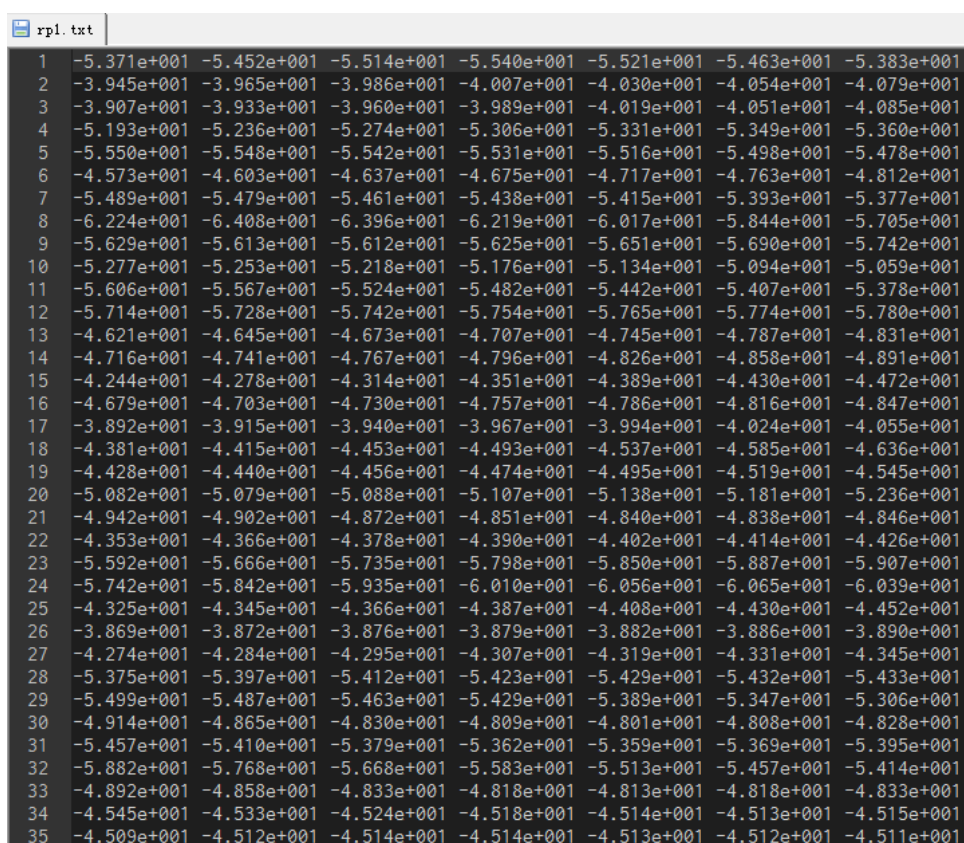
不同频道 FM 信号采用信号所在频率点作为唯一标识。

由于频谱仪的特性，采集时是将 FM 信号所在的 21MHz 的频段内按照等频率间隔的方式全部采集下来，频率间隔根据需要设置。本项目中结合实际电台信号强度信息选择了 21 个频点，相应地设置频率间隔让着 21 个目标频点刚好全部都被采集下来。则 21 个频点如表 1 所示。

表 1 所选 FM 信号频率列表

频率/MHz						
87.6	88.1	88.7	89.5	90.5	91.5	92.7
94.5	96.6	97.4	99.3	100.3	100.6	101.8
102.5	103.1	103.9	105.5	106.1	106.6	107.3

采集所得原始数据文件如图 3.8 所示。每行为一次扫描，每列为各个频率点上的 RSSI 值，单位为 dBm.



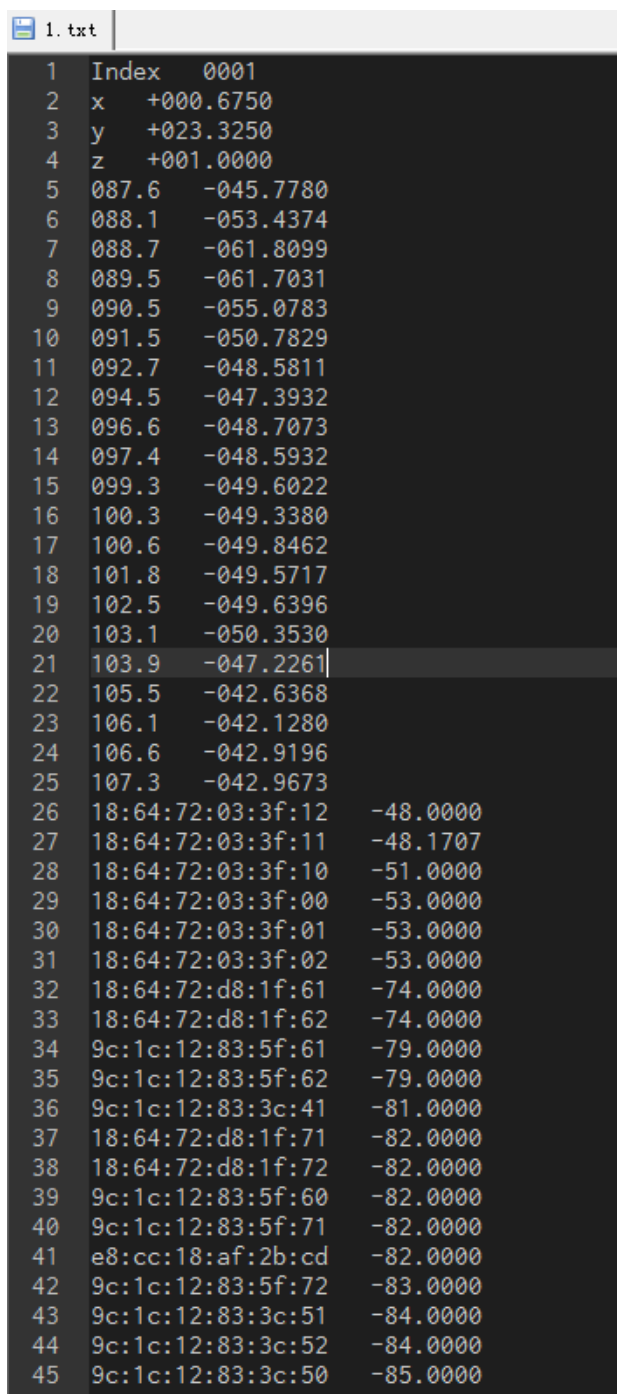
1	-5.371e+001	-5.452e+001	-5.514e+001	-5.540e+001	-5.521e+001	-5.463e+001	-5.383e+001
2	-3.945e+001	-3.965e+001	-3.986e+001	-4.007e+001	-4.030e+001	-4.054e+001	-4.079e+001
3	-3.907e+001	-3.933e+001	-3.960e+001	-3.989e+001	-4.019e+001	-4.051e+001	-4.085e+001
4	-5.193e+001	-5.236e+001	-5.274e+001	-5.306e+001	-5.331e+001	-5.349e+001	-5.360e+001
5	-5.550e+001	-5.548e+001	-5.542e+001	-5.531e+001	-5.516e+001	-5.498e+001	-5.478e+001
6	-4.573e+001	-4.603e+001	-4.637e+001	-4.675e+001	-4.717e+001	-4.763e+001	-4.812e+001
7	-5.489e+001	-5.479e+001	-5.461e+001	-5.438e+001	-5.415e+001	-5.393e+001	-5.377e+001
8	-6.224e+001	-6.408e+001	-6.396e+001	-6.219e+001	-6.017e+001	-5.844e+001	-5.705e+001
9	-5.629e+001	-5.613e+001	-5.612e+001	-5.625e+001	-5.651e+001	-5.690e+001	-5.742e+001
10	-5.277e+001	-5.253e+001	-5.218e+001	-5.176e+001	-5.134e+001	-5.094e+001	-5.059e+001
11	-5.606e+001	-5.567e+001	-5.524e+001	-5.482e+001	-5.442e+001	-5.407e+001	-5.378e+001
12	-5.714e+001	-5.728e+001	-5.742e+001	-5.754e+001	-5.765e+001	-5.774e+001	-5.780e+001
13	-4.621e+001	-4.645e+001	-4.673e+001	-4.707e+001	-4.745e+001	-4.787e+001	-4.831e+001
14	-4.716e+001	-4.741e+001	-4.767e+001	-4.796e+001	-4.826e+001	-4.858e+001	-4.891e+001
15	-4.244e+001	-4.278e+001	-4.314e+001	-4.351e+001	-4.389e+001	-4.430e+001	-4.472e+001
16	-4.679e+001	-4.703e+001	-4.730e+001	-4.757e+001	-4.786e+001	-4.816e+001	-4.847e+001
17	-3.892e+001	-3.915e+001	-3.940e+001	-3.967e+001	-3.994e+001	-4.024e+001	-4.055e+001
18	-4.381e+001	-4.415e+001	-4.453e+001	-4.493e+001	-4.537e+001	-4.585e+001	-4.636e+001
19	-4.428e+001	-4.440e+001	-4.456e+001	-4.474e+001	-4.495e+001	-4.519e+001	-4.545e+001
20	-5.082e+001	-5.079e+001	-5.088e+001	-5.107e+001	-5.138e+001	-5.181e+001	-5.236e+001
21	-4.942e+001	-4.902e+001	-4.872e+001	-4.851e+001	-4.840e+001	-4.838e+001	-4.846e+001
22	-4.353e+001	-4.366e+001	-4.378e+001	-4.390e+001	-4.402e+001	-4.414e+001	-4.426e+001
23	-5.592e+001	-5.666e+001	-5.735e+001	-5.798e+001	-5.850e+001	-5.887e+001	-5.907e+001
24	-5.742e+001	-5.842e+001	-5.935e+001	-6.010e+001	-6.056e+001	-6.065e+001	-6.039e+001
25	-4.325e+001	-4.345e+001	-4.366e+001	-4.387e+001	-4.408e+001	-4.430e+001	-4.452e+001
26	-3.869e+001	-3.872e+001	-3.876e+001	-3.879e+001	-3.882e+001	-3.886e+001	-3.890e+001
27	-4.274e+001	-4.284e+001	-4.295e+001	-4.307e+001	-4.319e+001	-4.331e+001	-4.345e+001
28	-5.375e+001	-5.397e+001	-5.412e+001	-5.423e+001	-5.429e+001	-5.432e+001	-5.433e+001
29	-5.499e+001	-5.487e+001	-5.463e+001	-5.429e+001	-5.389e+001	-5.347e+001	-5.306e+001
30	-4.914e+001	-4.865e+001	-4.830e+001	-4.809e+001	-4.801e+001	-4.808e+001	-4.828e+001
31	-5.457e+001	-5.410e+001	-5.379e+001	-5.362e+001	-5.359e+001	-5.369e+001	-5.395e+001
32	-5.882e+001	-5.768e+001	-5.668e+001	-5.583e+001	-5.513e+001	-5.457e+001	-5.414e+001
33	-4.892e+001	-4.858e+001	-4.833e+001	-4.818e+001	-4.813e+001	-4.818e+001	-4.833e+001
34	-4.545e+001	-4.533e+001	-4.524e+001	-4.518e+001	-4.514e+001	-4.513e+001	-4.515e+001
35	-4.509e+001	-4.512e+001	-4.514e+001	-4.514e+001	-4.513e+001	-4.512e+001	-4.511e+001

图 3.8 FM 原始数据文件示意图

3.5 数据库构建

3.5.1 数据库设计

数据库采用文本文件形式,每个测量点对应一个文件。文件格式保持统一,每行采用键值对形式,如图 3.9 所示。



1	Index	0001
2	x	+000.6750
3	y	+023.3250
4	z	+001.0000
5	087.6	-045.7780
6	088.1	-053.4374
7	088.7	-061.8099
8	089.5	-061.7031
9	090.5	-055.0783
10	091.5	-050.7829
11	092.7	-048.5811
12	094.5	-047.3932
13	096.6	-048.7073
14	097.4	-048.5932
15	099.3	-049.6022
16	100.3	-049.3380
17	100.6	-049.8462
18	101.8	-049.5717
19	102.5	-049.6396
20	103.1	-050.3530
21	103.9	-047.2261
22	105.5	-042.6368
23	106.1	-042.1280
24	106.6	-042.9196
25	107.3	-042.9673
26	18:64:72:03:3f:12	-48.0000
27	18:64:72:03:3f:11	-48.1707
28	18:64:72:03:3f:10	-51.0000
29	18:64:72:03:3f:00	-53.0000
30	18:64:72:03:3f:01	-53.0000
31	18:64:72:03:3f:02	-53.0000
32	18:64:72:d8:1f:61	-74.0000
33	18:64:72:d8:1f:62	-74.0000
34	9c:1c:12:83:5f:61	-79.0000
35	9c:1c:12:83:5f:62	-79.0000
36	9c:1c:12:83:3c:41	-81.0000
37	18:64:72:d8:1f:71	-82.0000
38	18:64:72:d8:1f:72	-82.0000
39	9c:1c:12:83:5f:60	-82.0000
40	9c:1c:12:83:5f:71	-82.0000
41	e8:cc:18:af:2b:cd	-82.0000
42	9c:1c:12:83:5f:72	-83.0000
43	9c:1c:12:83:3c:51	-84.0000
44	9c:1c:12:83:3c:52	-84.0000
45	9c:1c:12:83:3c:50	-85.0000

图 3.9 数据库文件示意图

首行的键为“Index”，值为该点的序号，宽度为 4 个字符，中间用 ASCII 字符“\t”分隔。在采集数据时为了提升工作效率和便于坐标推算，预先将每个采集点进行了编号，然后按照序号顺序采集，考虑到坐标推算和今后拓展的需要，将序号信息保留了下来。

第 2、3、4 行分别为 x、y、z 三个坐标轴的名称和坐标值，坐标轴名称的宽度为 1 个字符，坐标值的宽度为 9 个字符，含正负号，4 位小数精度，中间用 ASCII 字符“\t”分



隔。坐标值的单位是米，实际精度为 0.01m。

接下来的 21 行是 21 个 FM 频道的频率和 RSSI 值，按照频率从小到大顺序排列。频率的单位是 MHz，宽度是 5 个字符，RSSI 值的单位为 dBm，宽度是 9 个字符，含正负号，含 4 位小数，中间用 ASCII 字符 “\t” 分隔。宽度设为 9 个字符是考虑了所使用的泰克频谱仪能采集的信号强度范围之后的结果。

接下来的所有行是所有能接收到的 WiFi AP 的 BSSID 和 RSSI 值。BSSID 为宽度 17 个字符的字符串，RSSI 单位为 dBm，宽度为 8 个字符，含正负号，含 4 位小数，中间用 ASCII 字符 “\t” 分隔。实际上单次扫描采集的 WiFi 信号的 RSSI 值精确到个位，而在数据库生成过程中要对所有的扫描取平均，因此保留了 4 位小数。能扫描到的 WiFi AP 数量是不固定的，因此这部分的行数也是不固定的。

3.5.2 坐标推算

数据库的生成主要需要坐标、FM 数据和 WiFi 数据这三类信息。

由于采集点数量较多，逐个测量坐标不是很好的方案。因此实际采用的方法是，根据整个采集区域的特点将其划分为多个矩形小区域，对每个矩形区域，在其某一条边附近沿着该边等距选取采集点，使选出的点分布在一条直线上，然后在垂直于这条直线的方向上，从之前选出的每个点开始每隔固定的距离选作测量点，直到要超出矩形区域，于是在矩形区域内得到采集点组成的点阵。

由此，只需要测量出该点阵一角的点的坐标，结合两个递推方向上相邻点的距离，就可以推算出点阵中所有点的坐标。过程如图 3.10 所示。图中每个×符号表示一个测量点，周围的浅色实线框为上文所说的矩形区域。

另外，这种方法用来推算平面坐标。由于本项目选择的数据采集区域均位于同一楼层，采集数据时设备高度也基本一致，因此 z 轴坐标均用楼层号 1 表示。

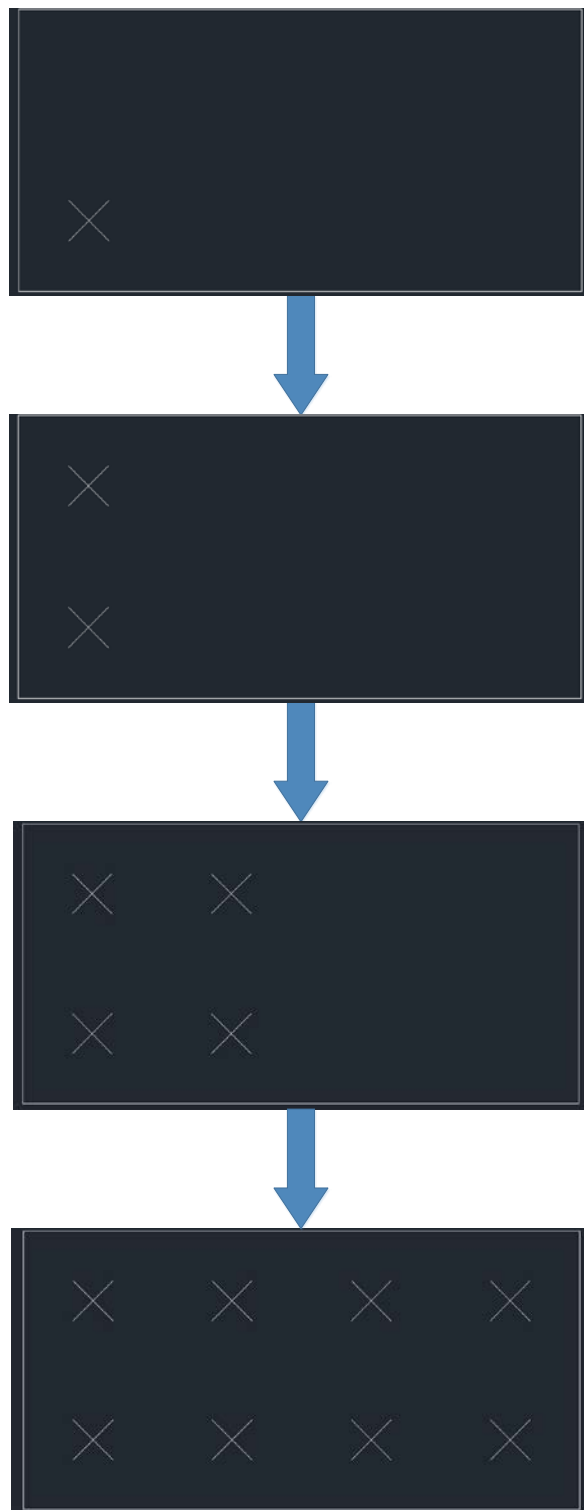


图 3.10 坐标递推过程示意图

3.5.3 数据库生成与信息统计

数据库的构建主要需要坐标、FM 数据和 WiFi 数据三类信息。坐标信息由以上方法推算。

每个点的 FM 原始数据文件中均存储了 5 秒内 300 次扫描的信息。为减小异常值的影响,对选定的每个频率的 300 个 RSSI 值取平均,所得平均值作为该频率的 RSSI 值,并写入数据库。WiFi 信号也是类似的方法,对每个 AP 将多次扫描的数据取平均作为测得值。

数据库构建完成后,对其进行统计分析,可得每个点可检测 AP 数量的分布如图 3.11 所示。由图 3.11 可见,大部分采集点能检测到的 AP 数量在 23~40 个之间,任意一个点至少能检测到 20 个 AP,最多能检测到 52 个 AP,检测到 33 个 AP 的点最多,有 32 个。

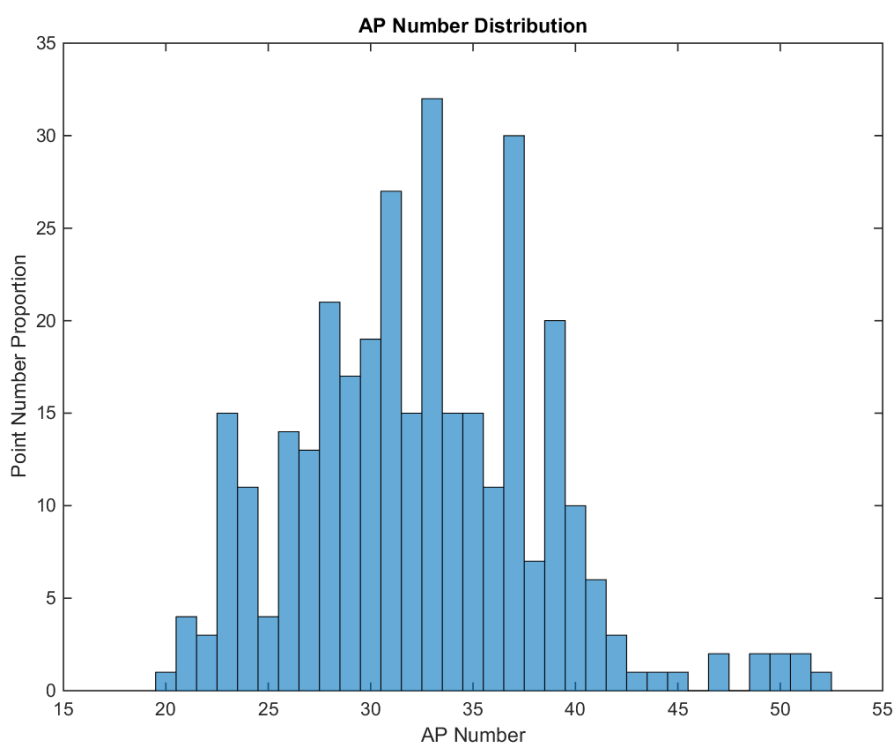


图 3.11 所有采集点可检测 AP 数量分布

数据库中所有出现过的 FM 信号 RSSI 值的分布如图 3.12 所示。由图 3.12 可见,所有采集点处检测到的 RSSI 值最大为-30dBm, 最小为-70dBm, 大部分 RSSI 值分布在 $[-43\text{ dBm}, -63\text{ dBm}]$ 区间, 出现次数最多的是-48dBm.

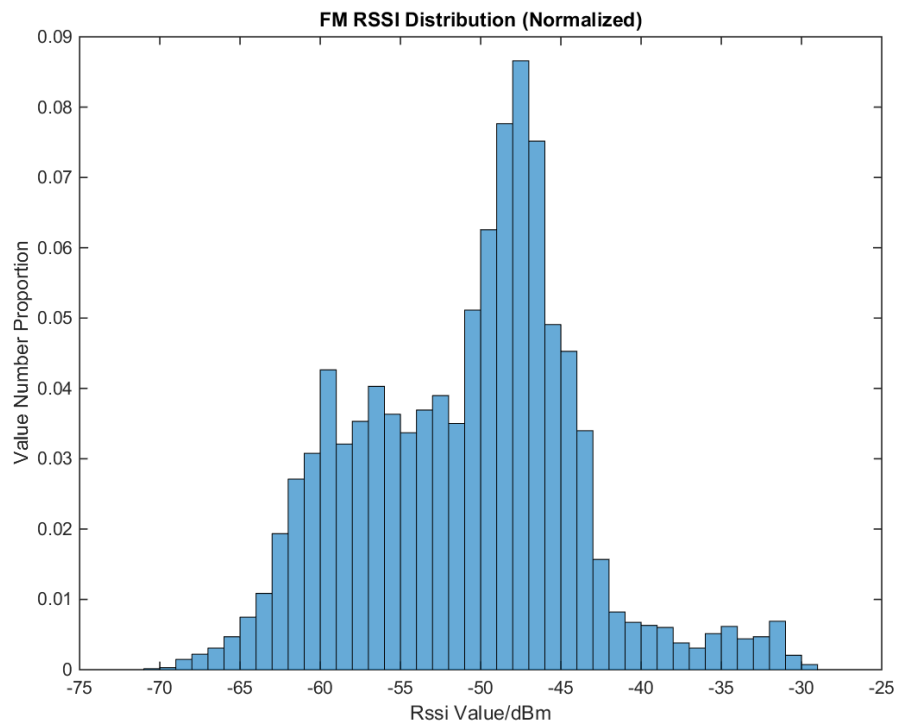


图 3.12 数据库中 FM 信号 RSSI 分布

数据库中所有出现过的 WiFi 信号 RSSI 值分布如图 3.13 所示。由图 3.13 可见，所有采集点出检测到的 RSSI 值最大为-30dBm，最小为-91dBm，大部分 RSSI 值分布在 $[-90\text{ dBm}, -45\text{ dBm}]$ 区间，出现次数最多的值是-83dBm.

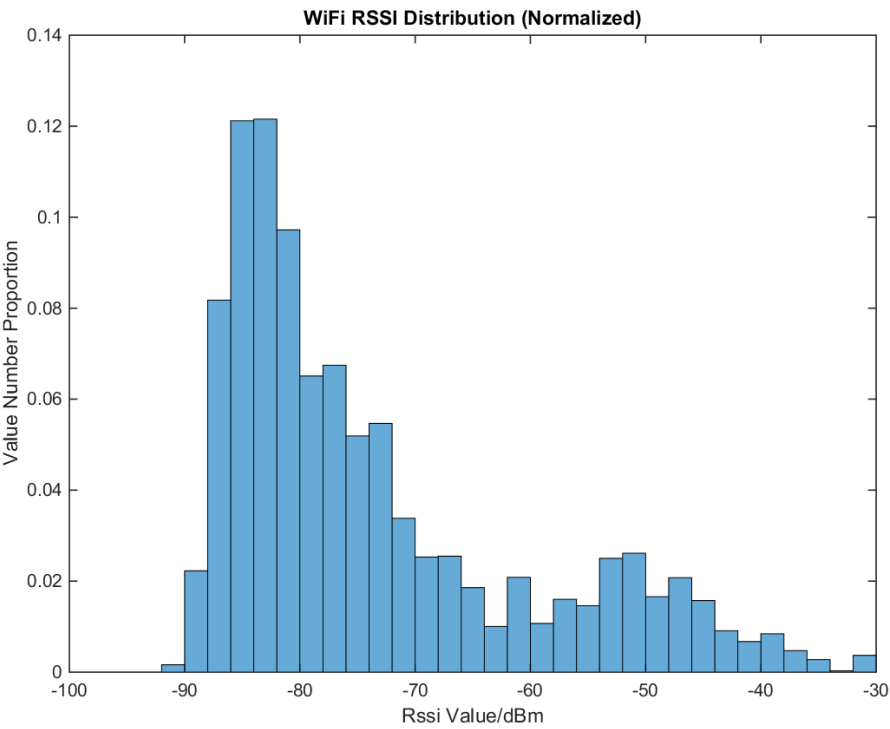


图 3.13 数据库中 WiFi 信号 RSSI 分布

4 指纹定位与结果分析

4.1 WiFi 单独定位

首先单独采用 WiFi 信号的 RSSI 进行定位。

具体过程是,进行 500 次蒙特卡罗实验,每次实验选出一组 TP,数量为 $325 \times 20\% = 65$ 个,数据库中其他点全部作为 RP。对每个 TP,依次取 k 的值为 1~20,计算该 TP 在每个 k 值下的定位误差。这样每次蒙特卡罗的结果可以表示为一个 65×20 的误差矩阵,每行表示一个 TP,每列表示一个 k 值,一共能得到 500 个这样的矩阵。

4.1.1 均值评价指标

将这 500 个矩阵对应位置的值取平均,再对矩阵的每一列取平均,得到一个 1×20 的行向量,即为每个 k 值下 65 个点 500 次蒙特卡罗所得误差值的算术平均数。以该向量作图如图 4.1 所示。

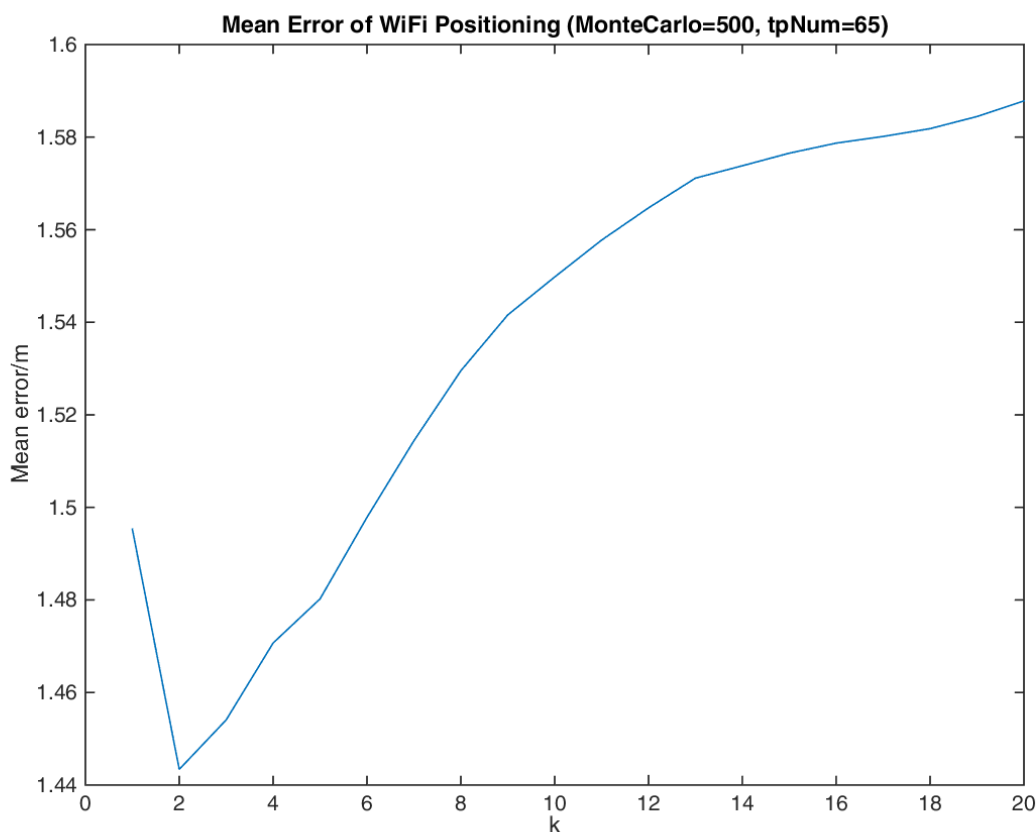


图 4.1 WiFi 单独定位的平均误差随 k 的变化

图 4.1 横轴表示 k 的取值,纵轴表示平均误差值,单位是米。由图 4.1 可以看出 WiFi

单独定位的平均误差随 k 的增大呈现先减小后增大的趋势, $k=2$ 时平均误差最小, 最小平均误差为 1.44m (精确到两位小数)。

4.1.2 误差分布评价指标

将每次蒙特卡罗所得的 65×20 的误差矩阵的特定列提取出来, 组成向量, 则该向量表示某个 k 值下所有 TP 点在 500 次蒙特卡罗后的误差值。对每个 k 下的所有误差值从小到大排序, 找出前 50% 和前 90% 误差的点, 作为评价指标, 作图如图 4.2 所示。

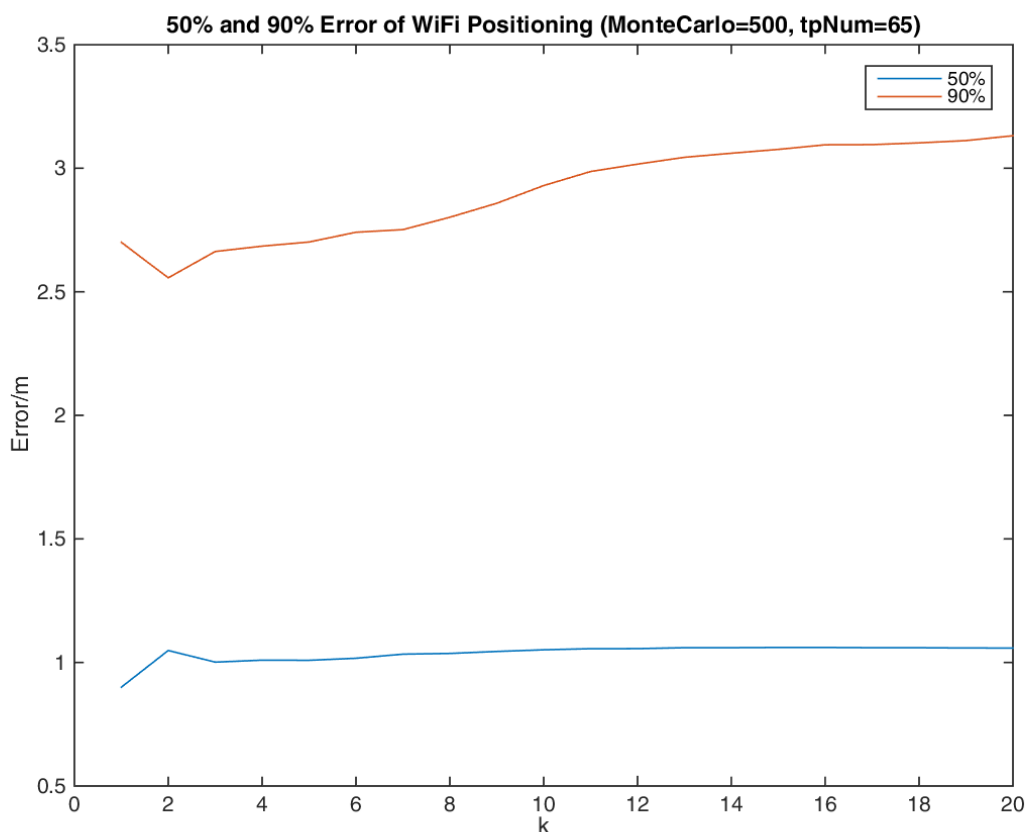


图 4.2 WiFi 单独定位的 50% 与 90% 误差值随 k 的变化

图 4.2 中横轴为 k 值, 纵轴为误差值。从图中可见, 前 50% 的误差值, 即最小的 50% 误差值在 $k=1$ 时最小, 为 0.9m, 之后随着 k 的增大略有波动, 最终基本稳定在 1m~1.1m 范围。前 90% 的误差值随着 k 的增大先减小后增大, 在 $k=2$ 时取得最小误差值, 为 2.56m, 曲线走向与算术平均数基本一致。

由图 4.1 和图 4.2 可以认为, $k=2$ 时 WiFi 信号的 KWNN 单独定位效果最好。因此作 $k=2$ 时的所有误差的频率分布图如图 4.3 和图 4.4 所示。

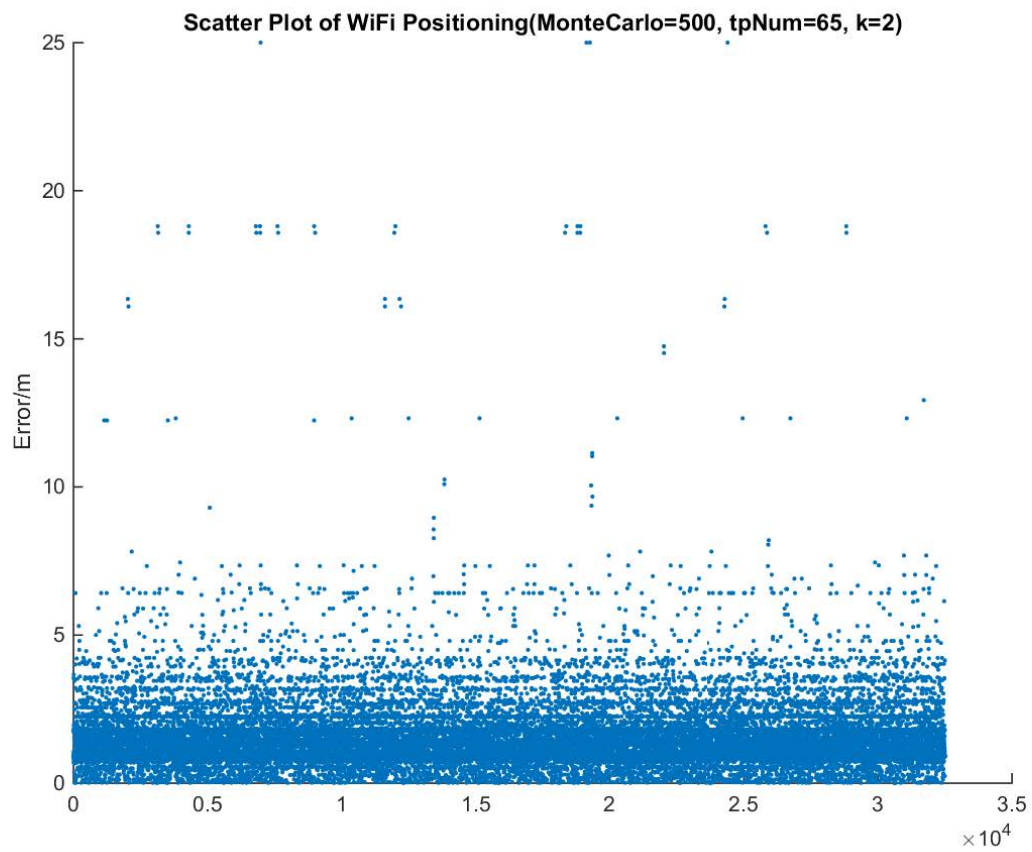
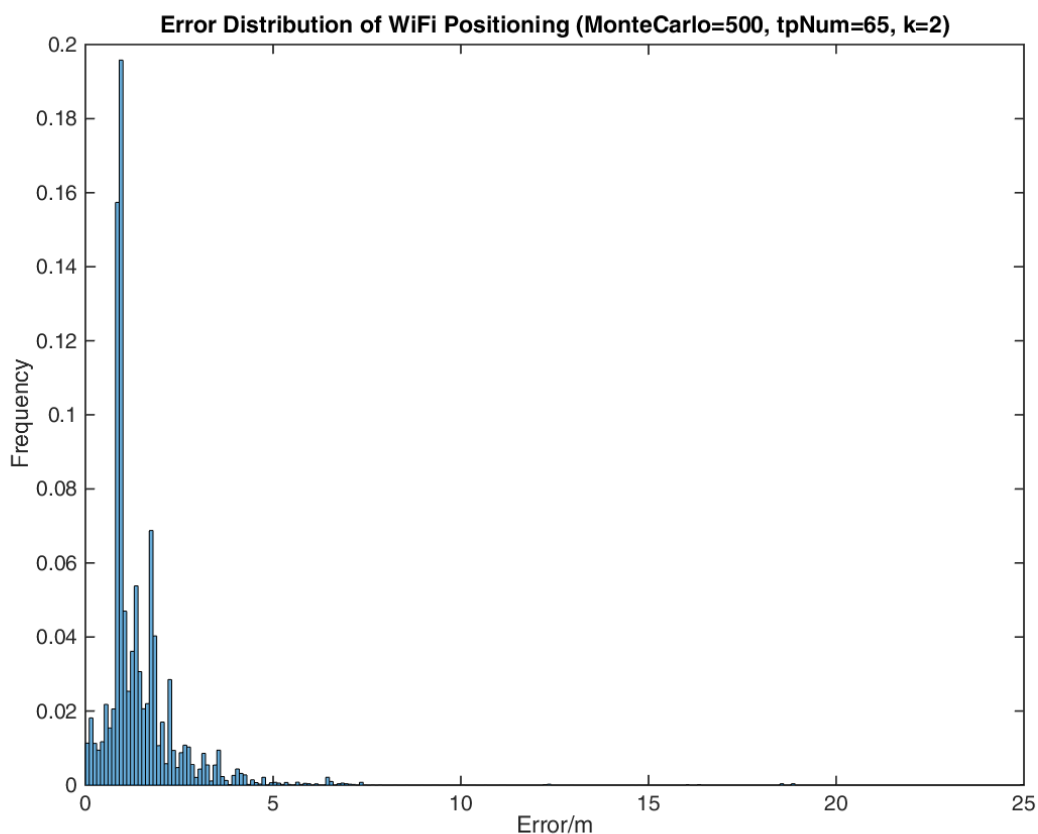


图 4.3 k=2 时的 WiFi 单独定位的误差散点图

图 4.4 $k=2$ 时的 WiFi 单独定位的误差频率分布

图中横轴为误差值，纵轴为出现的频率值。由图 4.3 和图 4.4 可见，绝大多数误差值均分布在 5m 以内，结合图 4.2 可知 50% 的误差值在 0.9m 以内，90% 的误差值在 2.56m 以内。但仍有少数点的误差值达到了十米以上甚至 25m。这说明有少数点的定位结果存在特别大的偏差，可以认为这样的点属于“坏点”，可能是指纹模糊造成的。这种“坏点”对定位精度的提高存在较大阻碍，考虑在以后的工作中想办法予以剔除。

综上，WiFi 单独定位的效果可用表 2 总结。

表 2 WiFi 单独定位效果总结

平均误差/m	50% 误差/m	90% 误差/m
1.44	0.90	2.56

4.2 FM 单独定位

单独采用 FM 信号数据进行定位实验，以测试 FM 信号定位效果。具体实验过程与 WiFi 独立定位相同。

4.2.1 均值评价指标

对同一个 k 值下的所有 TP 的所有次蒙特卡罗的误差值取平均, 可得每个 k 值下的平均误差值, 作图如图 4.5 所示。

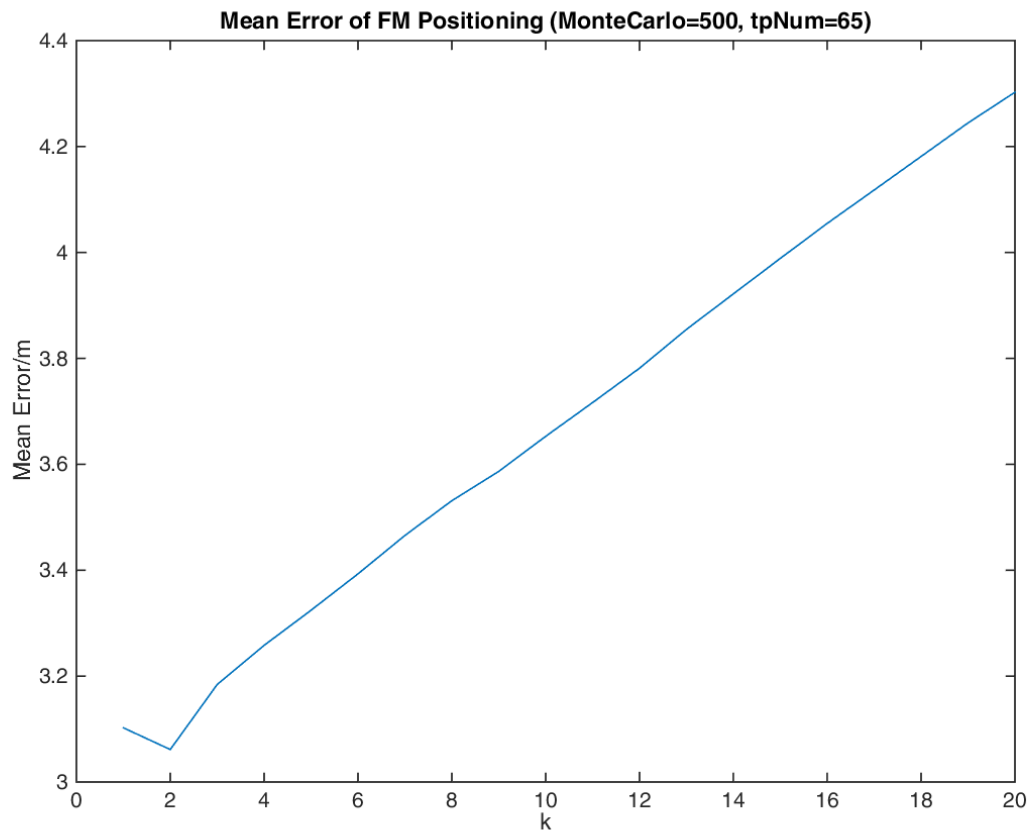


图 4.5 FM 单独定位的平均误差随 k 的变化

图 4.5 横轴表示 k 的取值, 纵轴表示平均误差, 单位为米。由图 4.5 可以看出 FM 单独定位的平均误差随 k 的增大也是呈现先减小后增大的趋势, $k=2$ 时平均误差最小, 最小平均误差为 3.06m (精确到两位小数)。比较图 4.1 和图 4.5 可知 FM 的最小均值误差 3.06m 远大于 WiFi 的最小均值误差 1.44m。

4.2.2 误差分布评价指标

将同一个 k 值下的所有误差结果进行排列, 找出前 50% 和 90% 的误差值, 作图如图 4.6 所示。

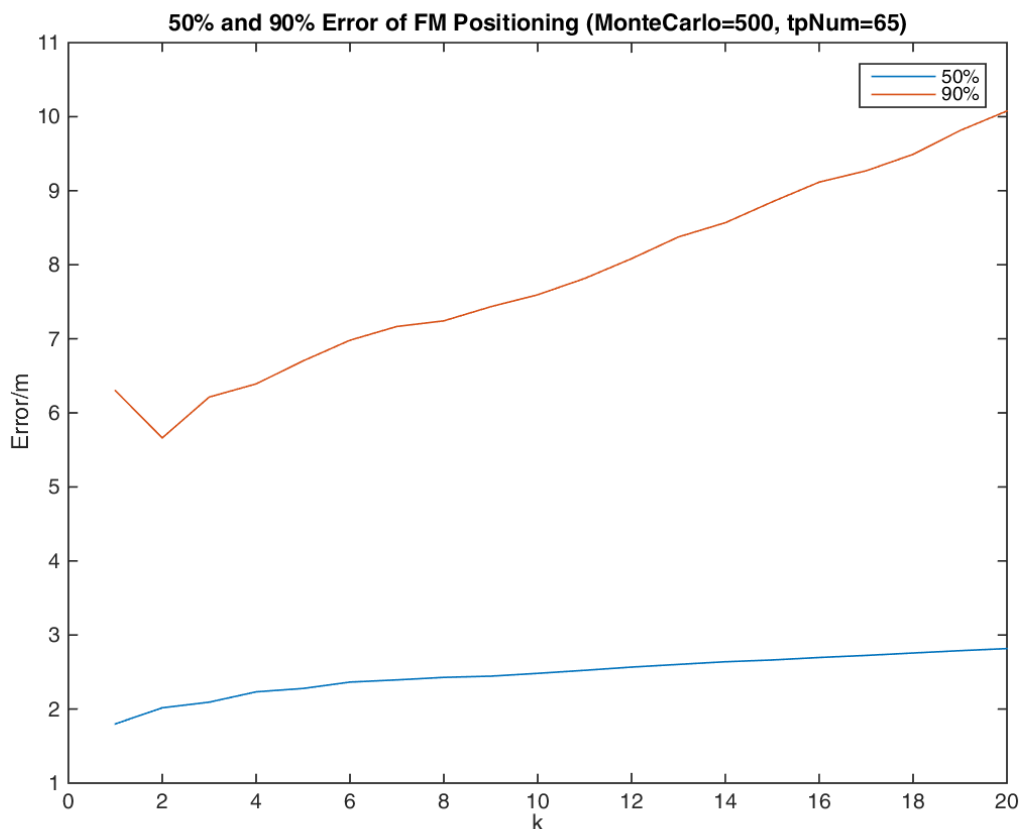


图 4.6 FM 单独定位的 50% 与 90% 误差值随 k 的变化

图 4.6 中横轴为 k 值, 纵轴为误差值。从图中可见, 前 50% 的误差值, 即最小的 50% 误差值在 $k=1$ 时最小, 为 1.80m, 之后随着 k 的增大缓慢增大, $k=20$ 时其值为 2.82m。前 90% 的误差值随着 k 的增大先减小后增大, 在 $k=2$ 时取得最小误差值, 为 5.67m, 曲线走向与算术平均数基本一致。

由图 4.5 和图 4.6 可以认为, $k=2$ 时 FM 信号的 KWNN 单独定位效果最好。因此作 $k=2$ 时的所有误差的频率分布图如图 4.7 和图 4.8 所示。

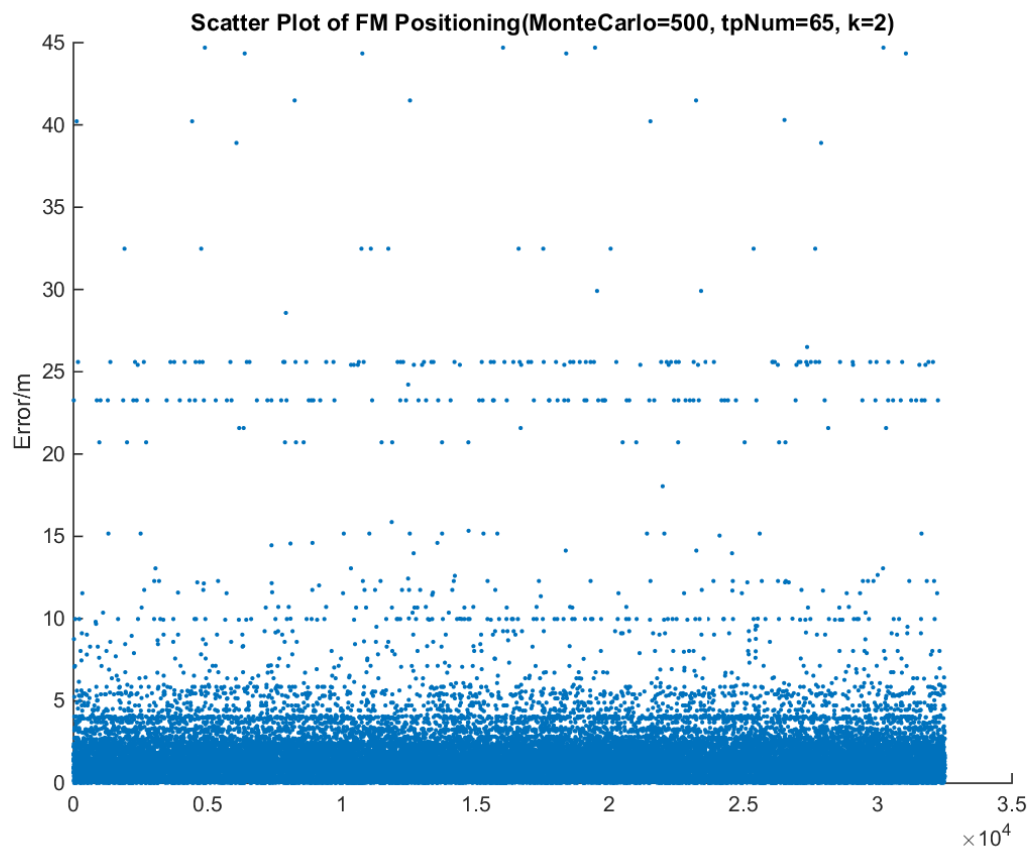
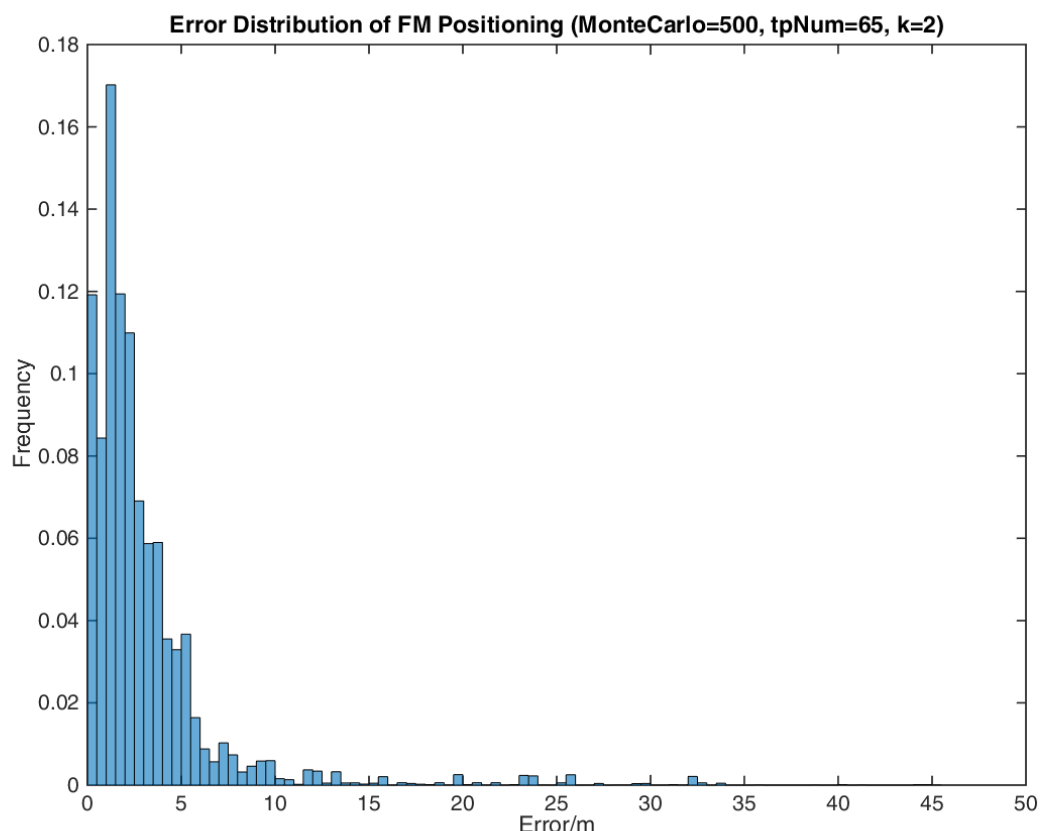


图 4.7 k=2 时的 FM 单独定位的误差散点图

图 4.8 $k=2$ 时的 FM 单独定位的误差频率分布

图中横轴为误差值，纵轴为出现的频率值。由图 4.7 和图 4.8 可见，绝大多数误差值均分布在 10m 以内，且分布较为集中在均值 3.06m 附近。结合图 4.6 可知 50% 的误差值在 1.80m 以内，90% 的误差值在 5.67m 以内。但与 WiFi 一样仍有少数点的误差值偏离较远，甚至达到 50m，可见在 FM 定位中坏点仍然存在，也需要剔除。

综上，FM 单独定位的效果可用表 3 总结。

表 3 FM 单独定位效果总结

平均误差/m	50% 误差/m	90% 误差/m
3.06	1.80	5.67

4.3 AP 辅助 FM 定位

由以上 WiFi 和 FM 信号单独定位的结果和分析可知，同样是 KWNN 算法，FM 单独定位的平均误差、50% 误差和 90% 误差均远大于 WiFi 的对应结果。这与理论分析一致，造成这样的原因是 FM 信号频率远低于 WiFi 信号。频率较低造成 FM 信号在室内

衰减较弱,不同地点的 FM 指纹区分度不如 WiFi 指纹,所以造成定位结果的较大误差。

因此使用 WiFi AP 对 FM 定位进行约束。约束环节基于 TP 的 WiFi AP 列表对数据库中的 RP 进行筛选,通过一定规则筛选出离 TP 距离较近的 RP 作为新的 RP 集合,再将新的 RP 集合作为数据库进行定位。

具体实验过程与 FM 单独定位相比增加了一个步骤,在 TP 确定后利用该 TP 进行 AP 约束,筛选出少量 RP,将这些 RP 作为新的数据库替换原来的数据库用到 KWNN 算法中。

4.3.1 均值评价指标

AP 辅助下的 FM 信号 KWNN 定位在均值评价指标下,采用与之前 WiFi 和 FM 信号单独定位相同的处理方法。将是否使用 AP 约束两种条件下 FM 定位的平均误差随 k 的变化作图如图 4.9 所示。

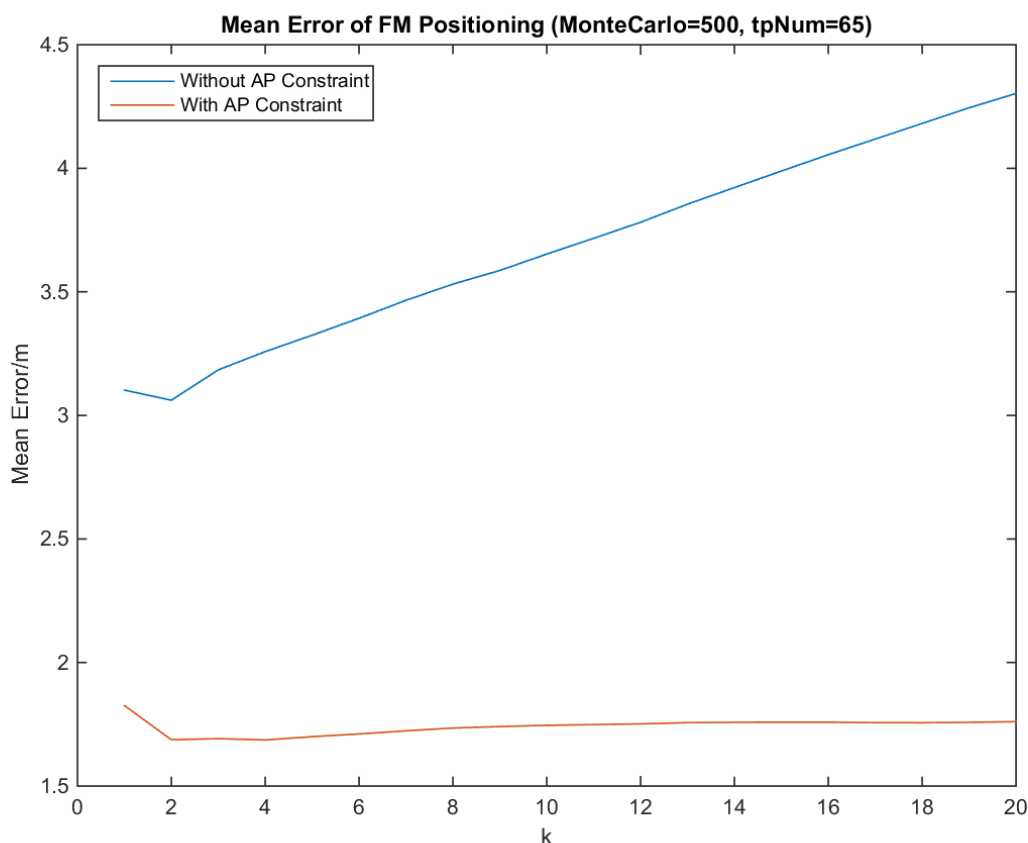


图 4.9 是否使用 AP 约束两种条件下 FM 定位平均误差随 k 的变化

图中横坐标为 k , 纵坐标为平均误差, 单位为米。由图 4.9 可知, 加上 AP 约束后, FM 定位精度大大提高, 平均误差随 k 的增大先减小后略微波动然后保持缓慢增大。使

得平均误差最小的 k 值为 4, $k=4$ 时最小平均误差为 1.69m.

相比不使用 AP 约束时的最小平均误差 3.06m, AP 约束下的最小平均误差为 1.69m, 定位精度提高了 44.77%.

4.3.2 误差分布评价指标

在误差分布评价指标下, 找出每个 k 值对应的 50% 和 90% 误差值, 并将是否使用 AP 约束两种条件进行对比, 可得图 4.10 和图 4.11。

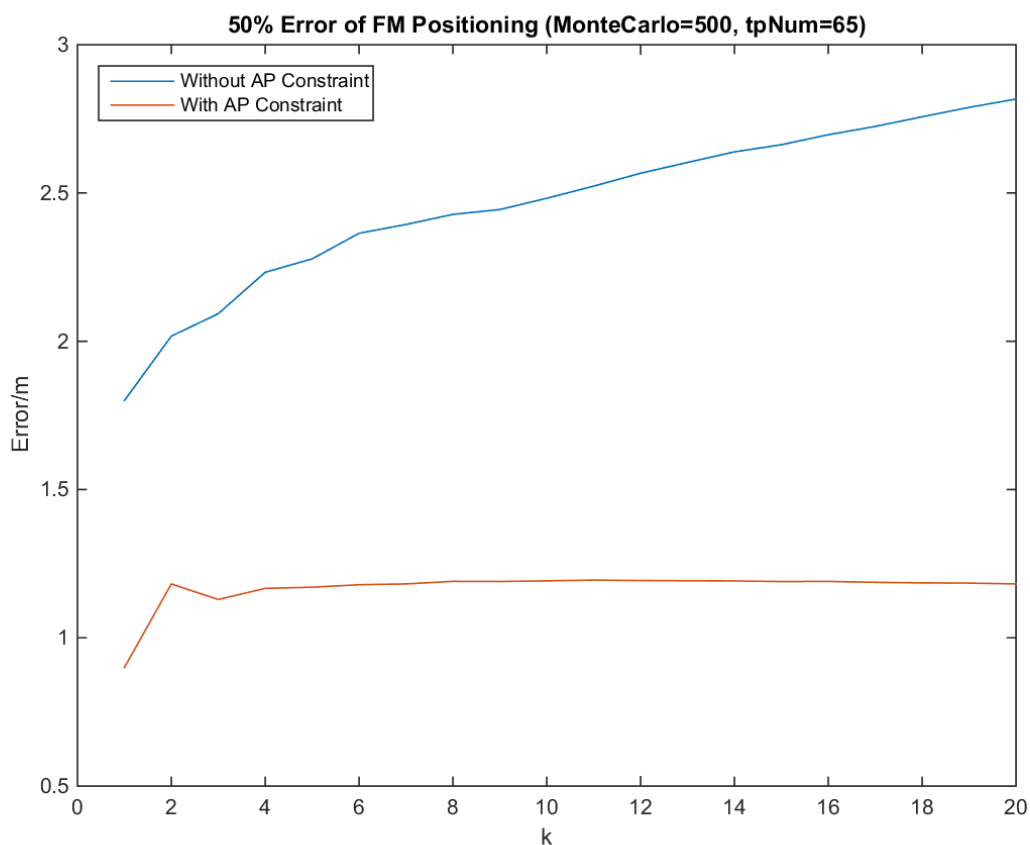


图 4.10 是否使用 AP 约束条件下 FM 定位的 50% 误差随 k 的变化

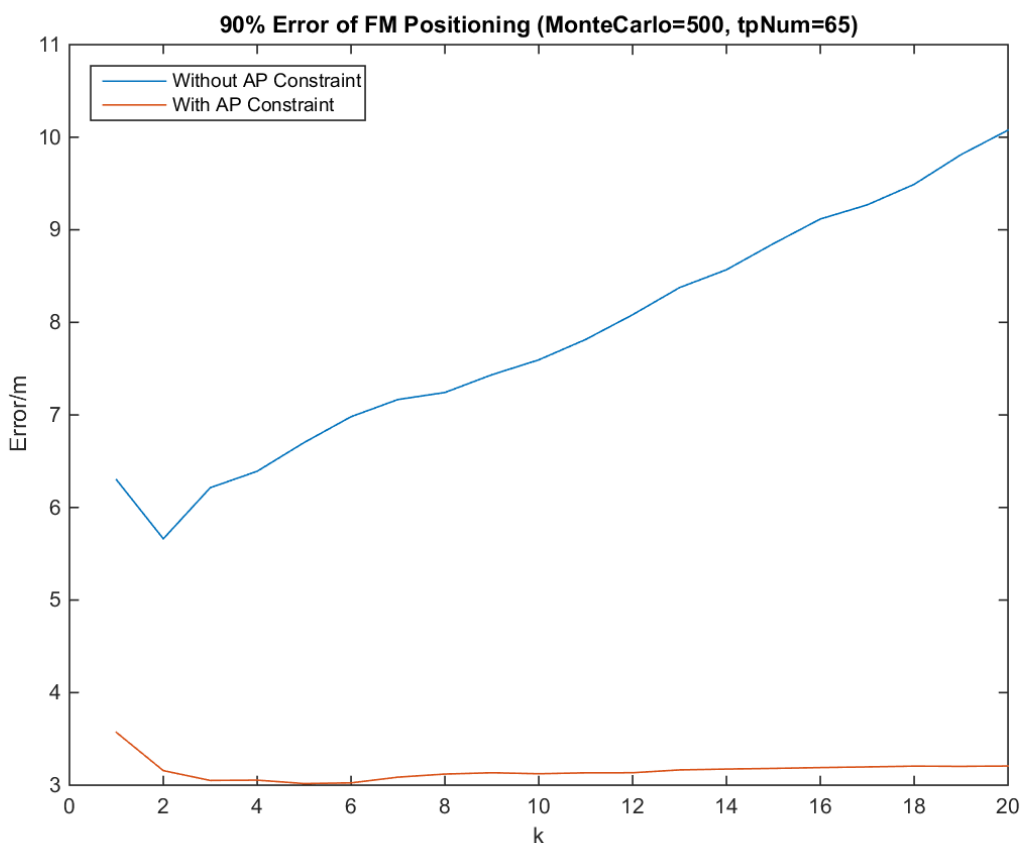


图 4.11 是否使用 AP 约束条件下 FM 定位的 90% 误差随 k 的变化

图 4.10 和图 4.11 中横轴为 k ，纵轴为误差值，单位为米。由以上两张图可以看出，AP 约束在 k 值增大过程中抑制了 FM 定位误差的增大，50% 和 90% 的误差值随 k 的增大变化不大。其中，50% 误差在是否加入 AP 约束条件下都是在 $k=1$ 时取最小值，未加约束时误差最小值为 1.80m，加上 AP 约束后最小误差值为 1.18m，误差减小了 34.44%。90% 误差在未加 AP 约束时最小值为 5.67m，加上约束时最小值为 3.02m，在 $k=5$ 时取到，误差减小了 46.74%。

由于平均误差的最小值在 $k=4$ 时取到，故将 $k=4$ 时所有误差值的频率分布作散点图和误差分布图如图 4.12 和图 4.13 所示。

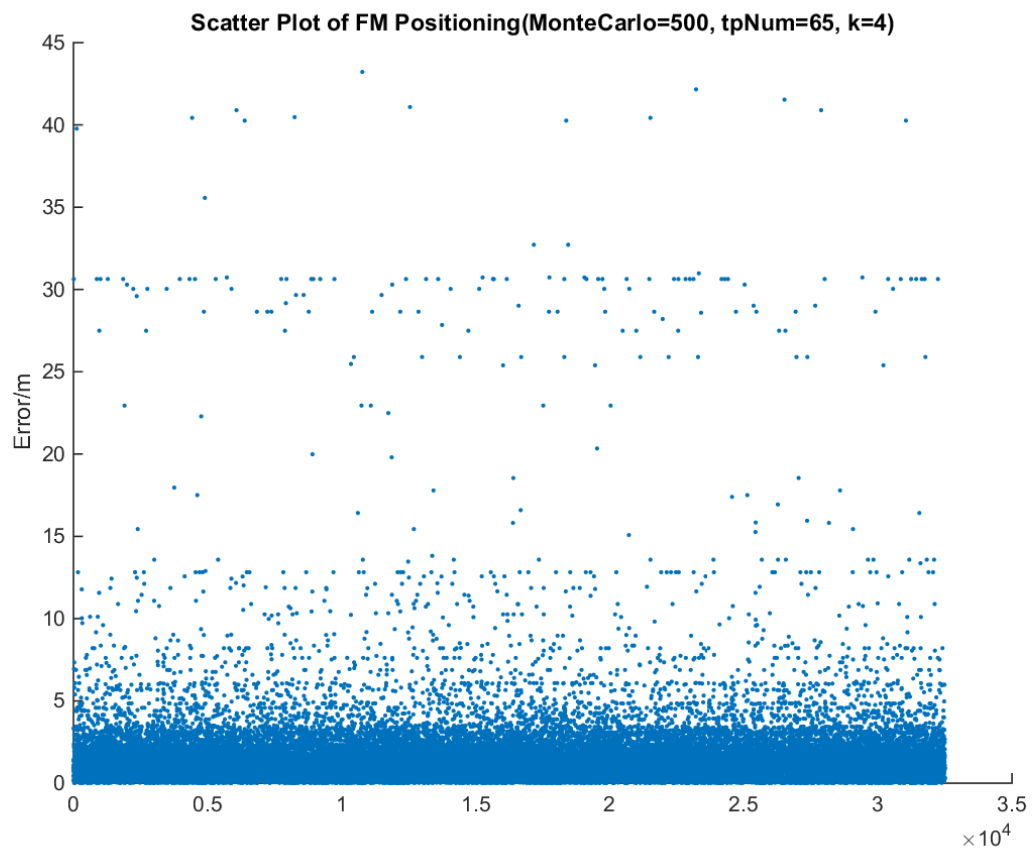
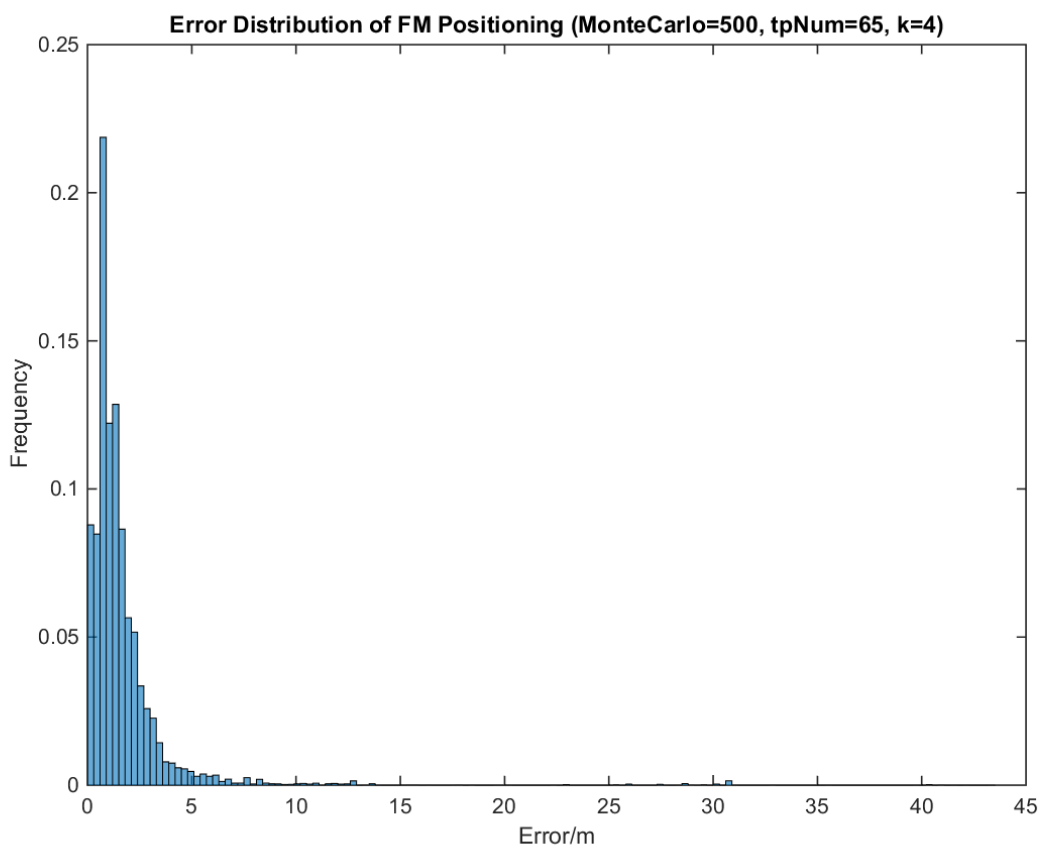


图 4.12 k=4 时 AP 辅助下 FM 定位的误差散点图

图 4.13 $k=4$ 时 AP 辅助下 FM 定位的误差分布

图中横轴为误差值，单位为米，纵轴为误差值出现的频率。由图 4.12 和图 4.13 可以看出，绝大部分误差值均在 5m 以内，但也有少数误差值达到了 40m 以上，说明即使在 AP 约束下，坏点依然未能完全消除，有可能是在坏点处符合条件的集合 S 为空集，导致程序放弃使用约束，也有可能是使用了 AP 约束但坏点的影响依然存在。

不仅如此，实验中的时间测试表明，加上 AP 约束后能使运算时间减少约 22%，这一特性有利于移植到运算能力有限的移动平台上。

综上，AP 辅助 FM 定位的效果可用表 4 总结。

表 4 AP 辅助 FM 定位效果总结

平均误差/m	50%误差/m	90%误差/m
1.69	1.18	3.02

4.4 AP 辅助 WiFi 定位

AP 约束 WiFi 的具体方法与约束 FM 相同。

4.4.1 均值评价指标

均值评价指标下, 是否采用 AP 约束的定位效果对比如图 4.14 所示。

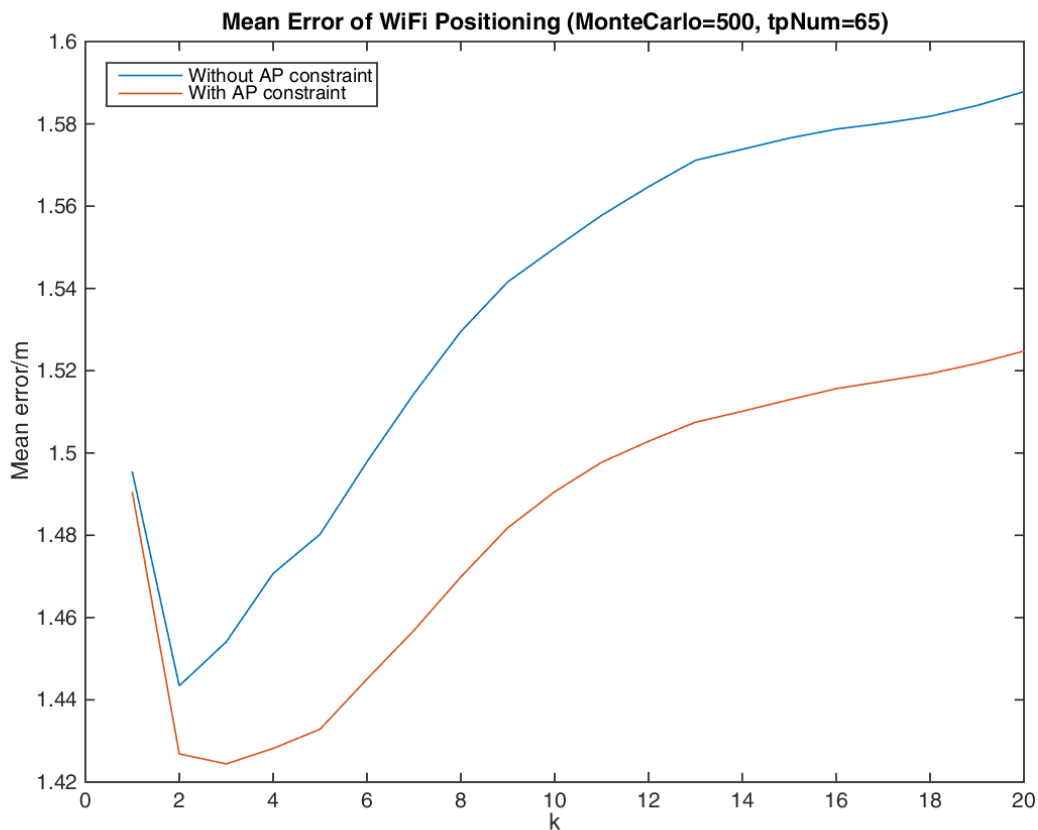


图 4.14 是否使用 AP 约束两种条件下 WiFi 定位平均误差随 k 的变化

由图 4.14 可以看出, 加与不加 AP 约束两种情况下平均误差随 k 的变化趋势是一致的, 都是先减小后增大。但不加约束时最小误差在 $k=2$ 时取到, 最小误差为 1.44m, 而加约束时最小误差则在 $k=4$ 时取到, 最小误差为 1.42m, 误差减小了 1.4%。

4.4.2 误差分布评价指标

误差分布评价指标下, 是否采用 AP 约束的定位效果对比如图 4.15 和图 4.16 所示。

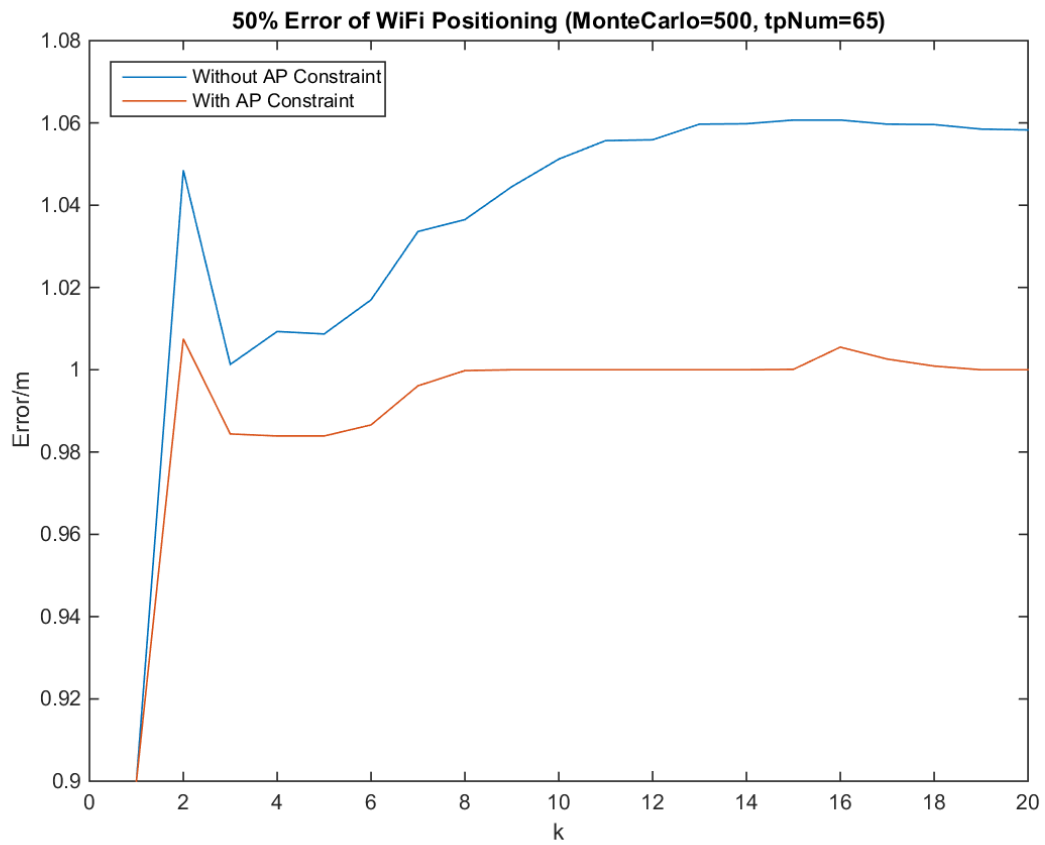


图 4.15 是否使用 AP 约束条件下 WiFi 定位的 50% 误差随 k 的变化

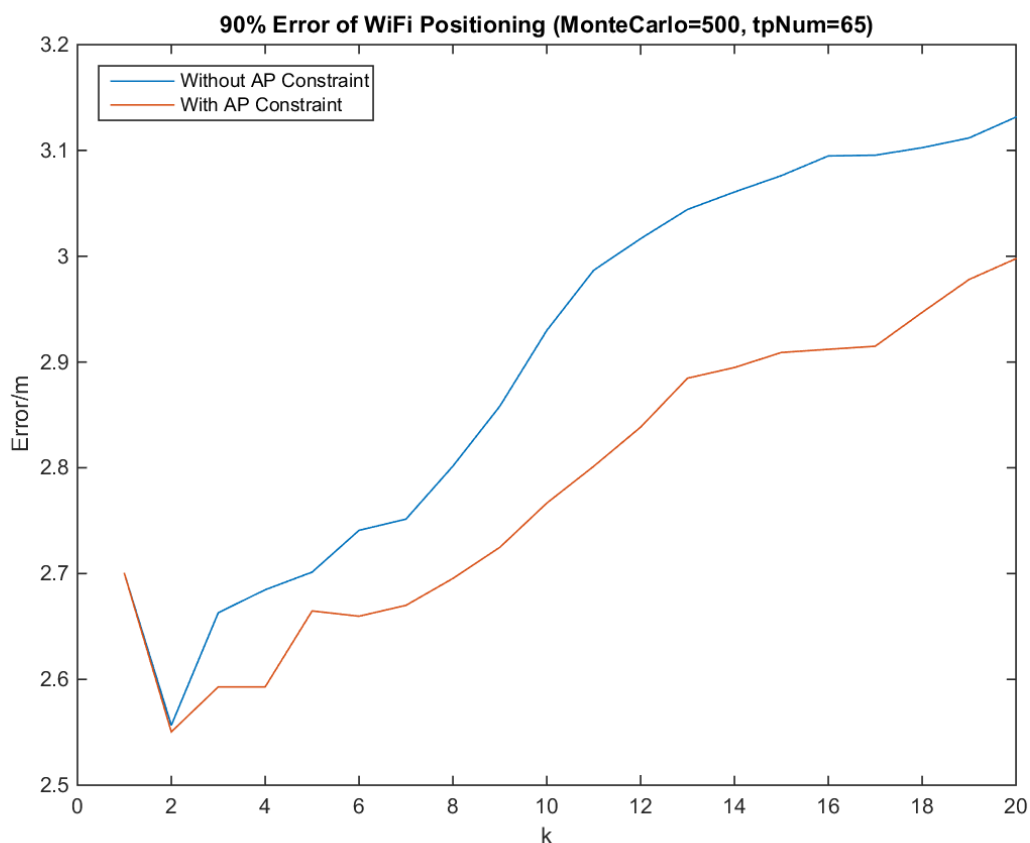


图 4.16 是否使用 AP 约束条件下 WiFi 定位的 90% 误差随 k 的变化

图 4.15 和图 4.16 中横轴为 k，纵轴为误差值，单位为米。由这两张图可以看出，在 50% 或 90% 误差取最小值时，AP 约束对最小误差值得提升基本没有帮助。50% 误差和 90% 误差取最小值时的 k 不变，k=1 时，50% 误差取得最小值 0.90m；k=2 时，90% 误差取得最小值 2.55m，加上 AP 约束仅能使 90% 误差减小 0.1m。

综合以上三张图，选择 k=3 做出定位误差的散点图和频率分布图如图 4.17 和图 4.18 所示。

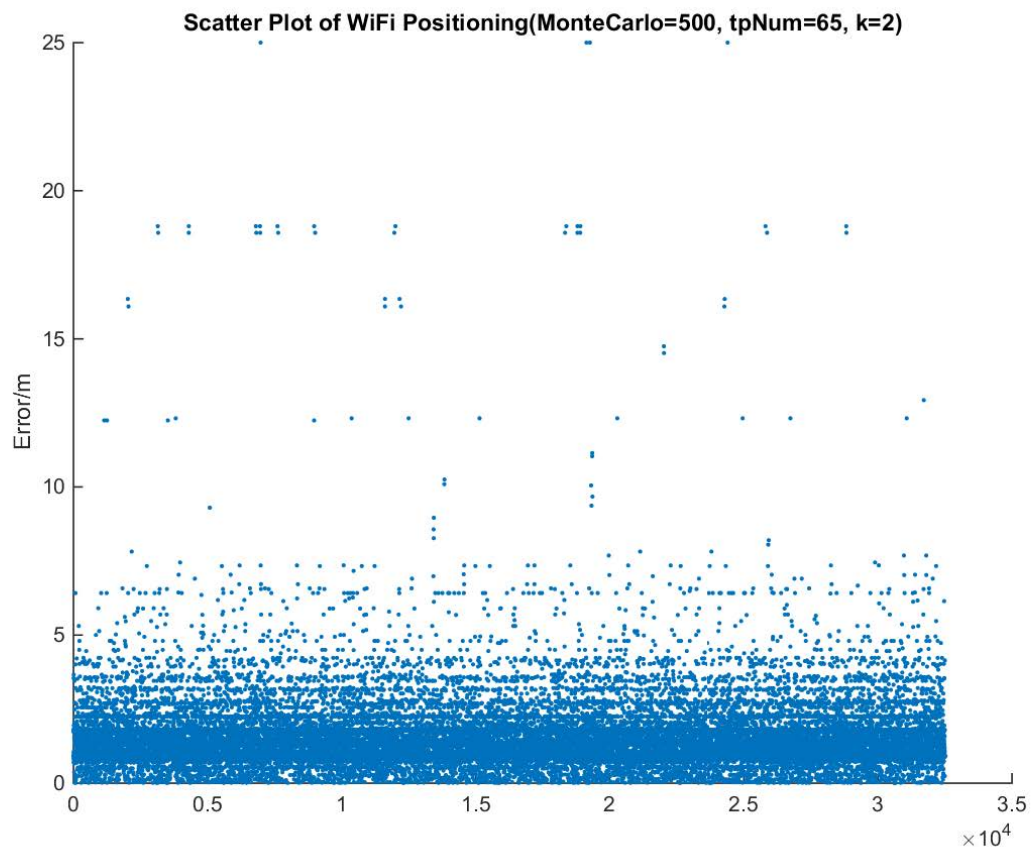


图 4.17 AP 辅助下 WiFi 定位误差的散点图

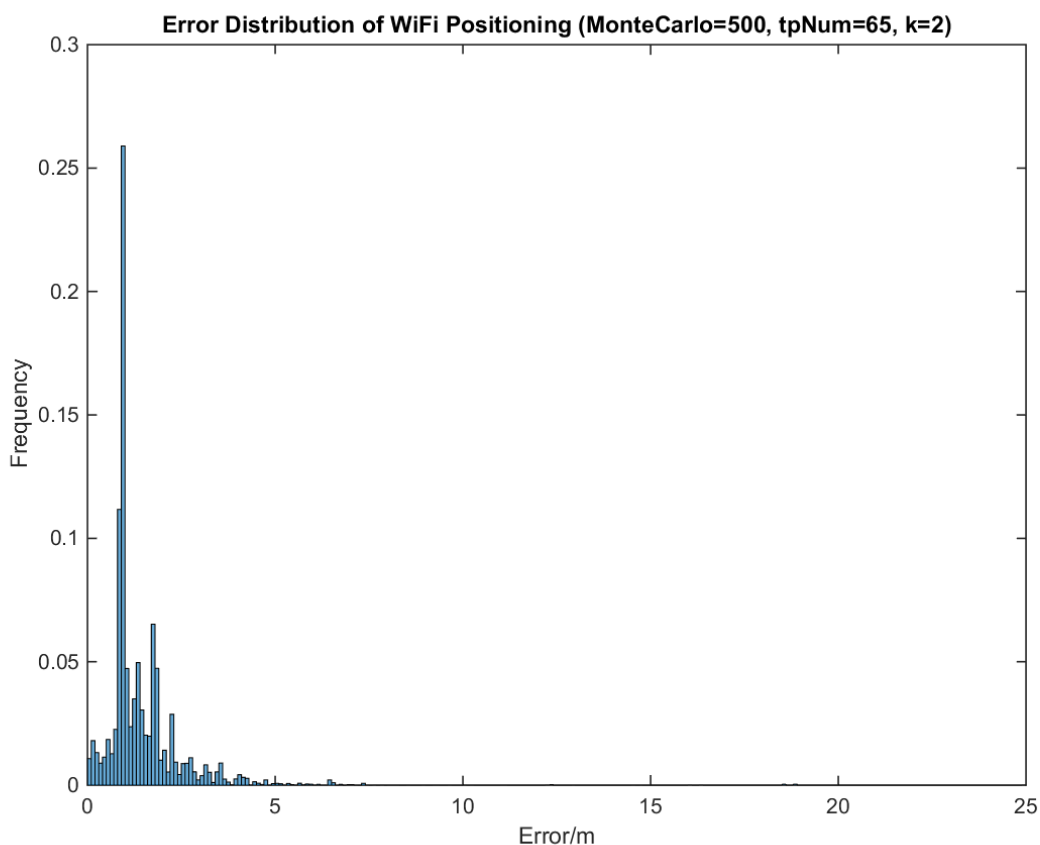


图 4.18 AP 辅助下 WiFi 定位误差的频率分布图

由以上两张图可知大部分误差值均在 5m 内，少数点误差达到 20m 以上，效果与不用 AP 约束时较为接近。

由以上分析可知，AP 约束对 WiFi 定位的精度提升作用很小。但实际上在实验中发现，AP 约束能显著降低 WiFi 定位的运算量，加上 AP 约束后运行时间减少了约 39%。这对于将定位算法移植到手机平台尤其有利，在功耗、性能有限的情况下有助于减少运算时间，提升用户体验。

综上，AP 辅助 WiFi 定位的效果可用表 5 总结。

表 5 AP 辅助 WiFi 定位效果总结

平均误差/m	50%误差/m	90%误差/m
1.42	0.90	2.55

4.5 指纹融合

指纹融合就是将 WiFi 和 FM 所有频道及其 RSSI 全部用到定位中。

采用与 WiFi 单独定位相同的方法和条件,进行蒙特卡罗实验,蒙特卡罗次数 500 次。

4.5.1 均值评价指标

指纹融合方法,是否加上 AP 约束两种情况,在均值评价指标下,作图反映误差均值随 k 的变化如图 4.19 所示。

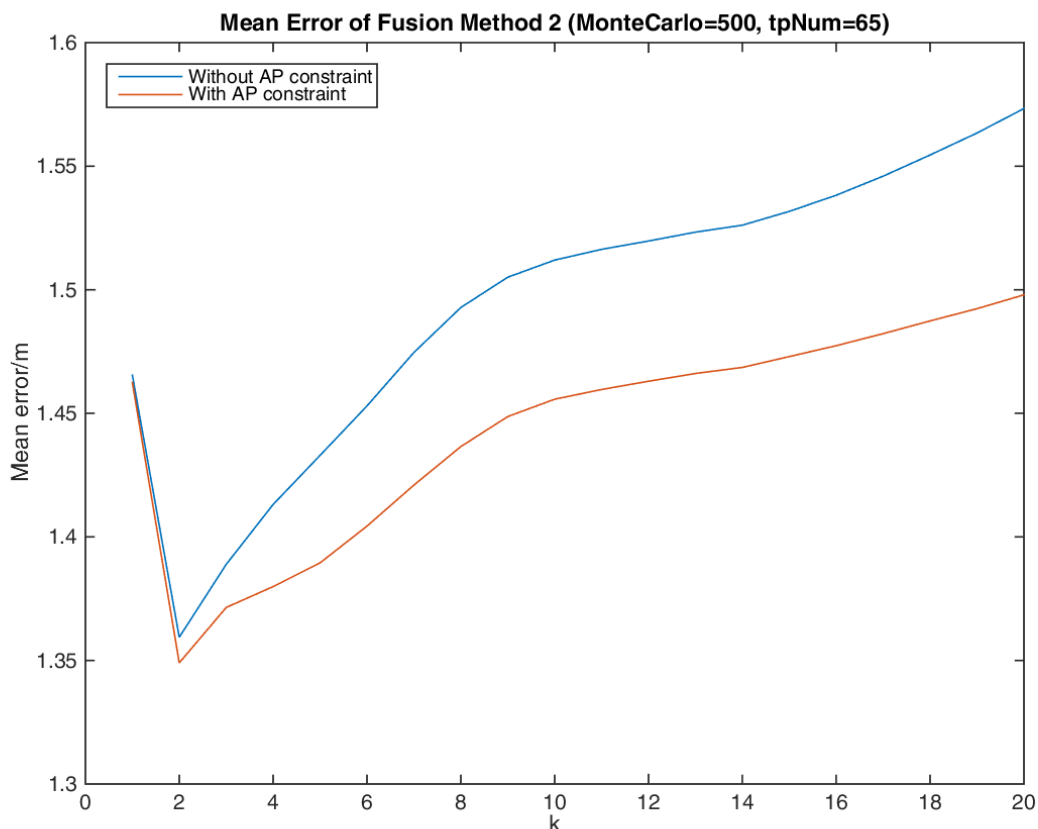


图 4.19 指纹融合方法平均误差随 k 的变化

图中横坐标为 k 值,纵坐标为平均误差,单位为米。由图 4.19 可见,是否加上 AP 约束两种情况平均误差随 k 的变化趋势一致,且均在 $k=2$ 时取得最小平均误差,不加约束时,最小平均误差为 1.36m,加上约束时,最小平均误差为 1.35m。可见 AP 约束对指纹融合的最小平均误差提升并不大。指纹融合方法相比 AP 约束的 WiFi 定位在精度上提升了 4.9%。

4.5.2 误差分布评价指标

是否加上 AP 约束两种情况,其 50%和 90%误差随 k 的变化如图 4.20 和图 4.21 所示。

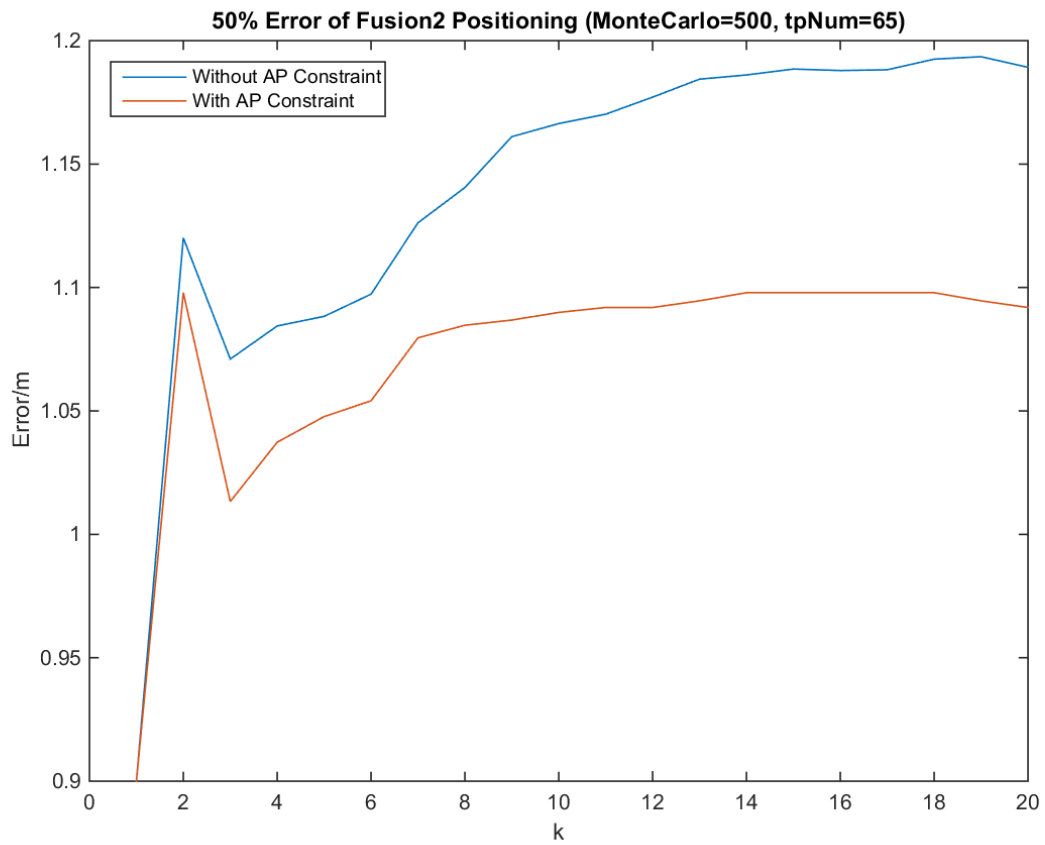


图 4.20 指纹融合方法 50%误差随 k 的变化

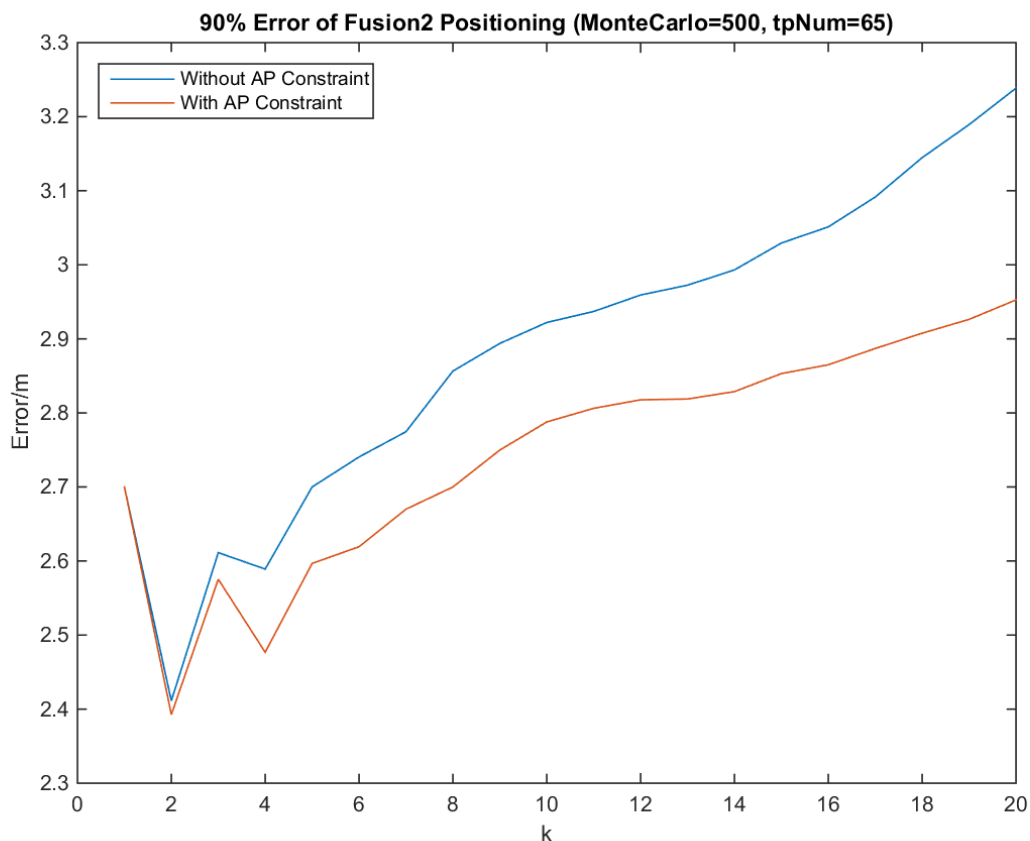


图 4.21 指纹融合方法 90%误差随 k 的变化

由图 4.20 和图 4.21 可见，是否加 AP 约束对定位误差随 k 的变化趋势影响较小。50% 误差在 $k=1$ 时取得最小值，是否有约束情况下 50% 误差最小值都是 0.9m，而 90% 误差在 $k=2$ 时取得最小值，无约束时 90% 误差最小值为 2.41m，有约束时误差最小值为 2.39m。

由以上三张图可以认为， $k=2$ 且采用 AP 约束时指纹融合的定位效果最好，因此作 $k=2$ 时散点图与频率分布图如图 4.22 和图 4.23 所示。

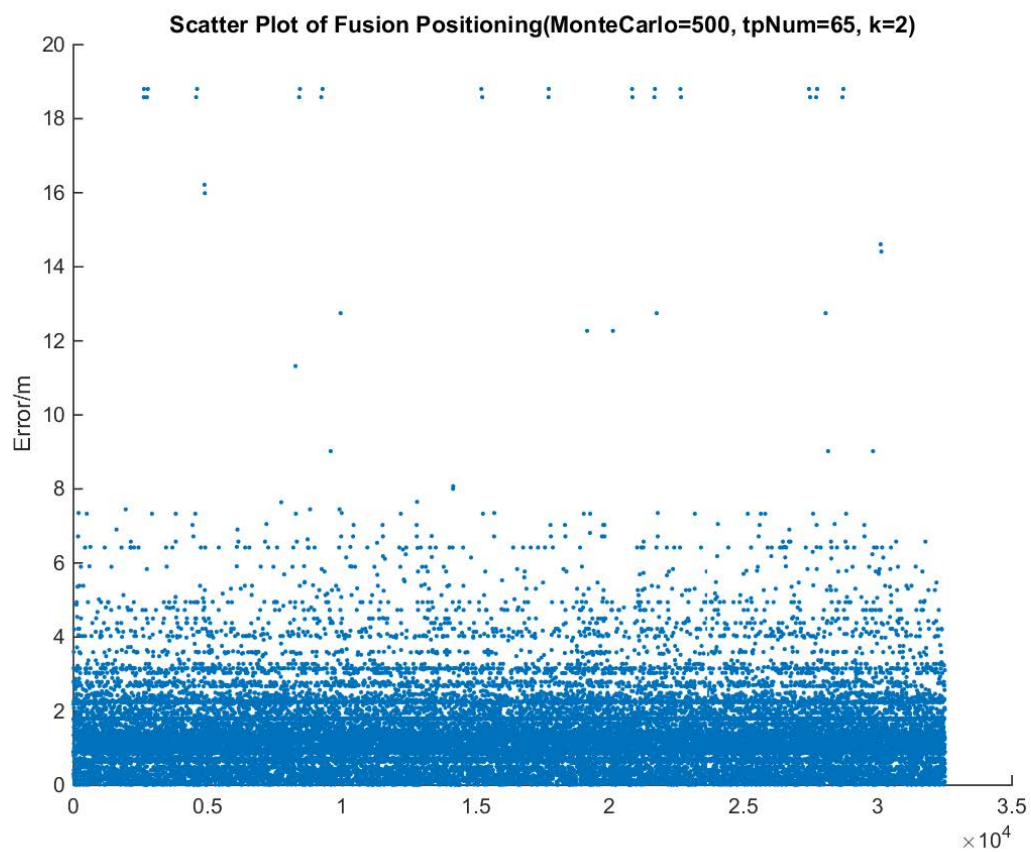


图 4.22 指纹融合的误差散点图

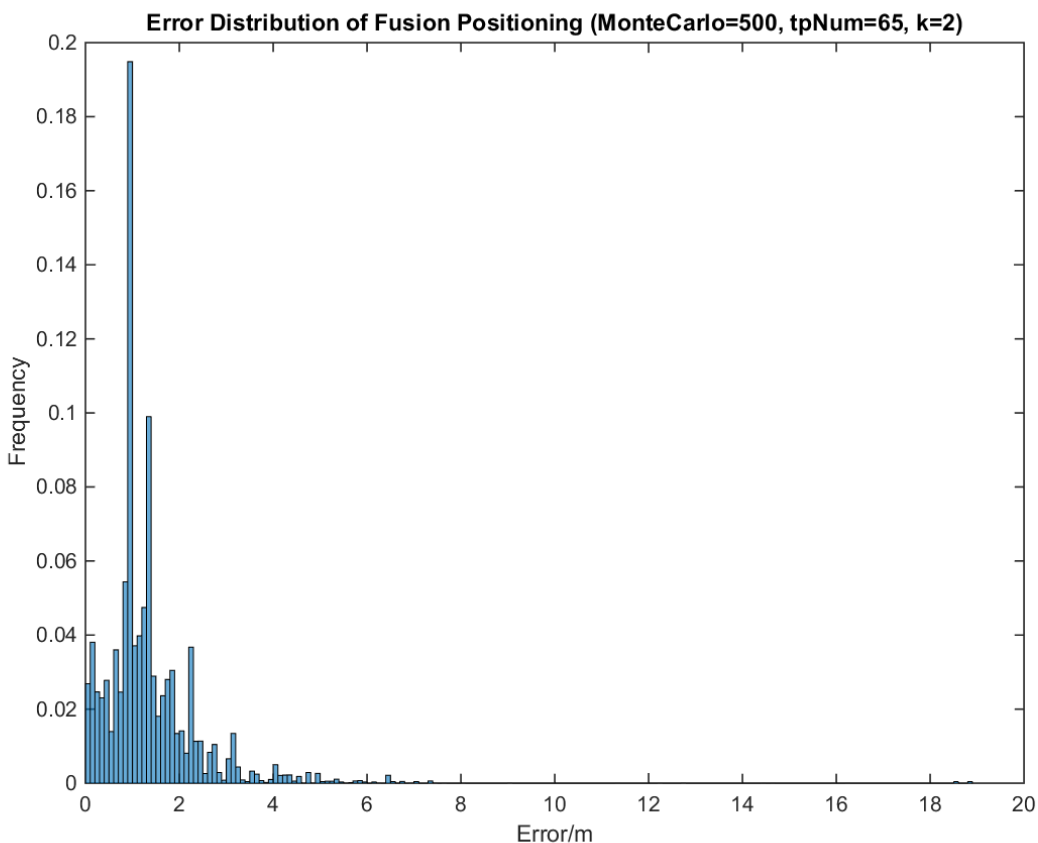


图 4.23 指纹融合的误差分布频率图

图中横轴为误差值，纵轴为出现的频率值。由图 4.22 和图 4.23 可见，绝大多数误差值均分布在 3m 以内，且分布较为集中在 1m 附近，最大误差达 20m。前面的方法中效果较好的 AP 辅助 WiFi 方法的误差主要分布在 5m 内，最大误差达 25m 左右。可见指纹融合的方法不仅在平均误差上有提升，而且在误差分布上更集中，说明融合的信息发挥了作用，算法性能得到了提升。

AP 约束对融合定位的精度提升不明显，而时间测试结果显示加上 AP 约束后指纹融合的运行时间减少了约 29%，这两点与 WiFi 定位是一致的。

综上，指纹融合的定位效果可用表 6 总结。

表 6 指纹融合的性能指标

	平均误差/m	50% 误差/m	90% 误差/m
指纹融合，无约束	1.36	0.90	2.41
指纹融合，AP 约束	1.35	0.90	2.39

4.6 加权融合

另一种融合方法是将 WiFi 和 FM 独立定位得到的坐标进行加权平均。

要进行这样的融合，首先要用 WiFi 和 FM 信号分别进行独立定位。由 4.3 和 4.4 可知，AP 约束对 WiFi 和 FM 单独定位的效果均有提升，因此 WiFi 和 FM 均加上 AP 约束进行定位。进而可知，对于 AP 约束下的 WiFi, $k=3$ 时能取得均值评价指标下的最小误差；对于 AP 约束下的 FM, $k=4$ 时能取得均值评价指标下的最小误差。因此，本融合方法中独立定位的方案为 AP 约束下 $k=3$ 时的 WiFi 定位与 AP 约束下 $k=4$ 时的 FM 定位。

实验采用蒙特卡罗的方法进行 500 次蒙特卡罗实验，每次选一组 TP，数量 65 个，对每个 TP 均用 AP 约束的 WiFi 和 FM 信号分别进行定位，将得到的两个三维坐标用各种权重比分别进行加权，再将所得加权坐标与真实坐标比较计算误差。

4.6.1 均值评价指标

在均值评价指标下，对平均定位误差与权重比的关系作图如图 4.24 所示。

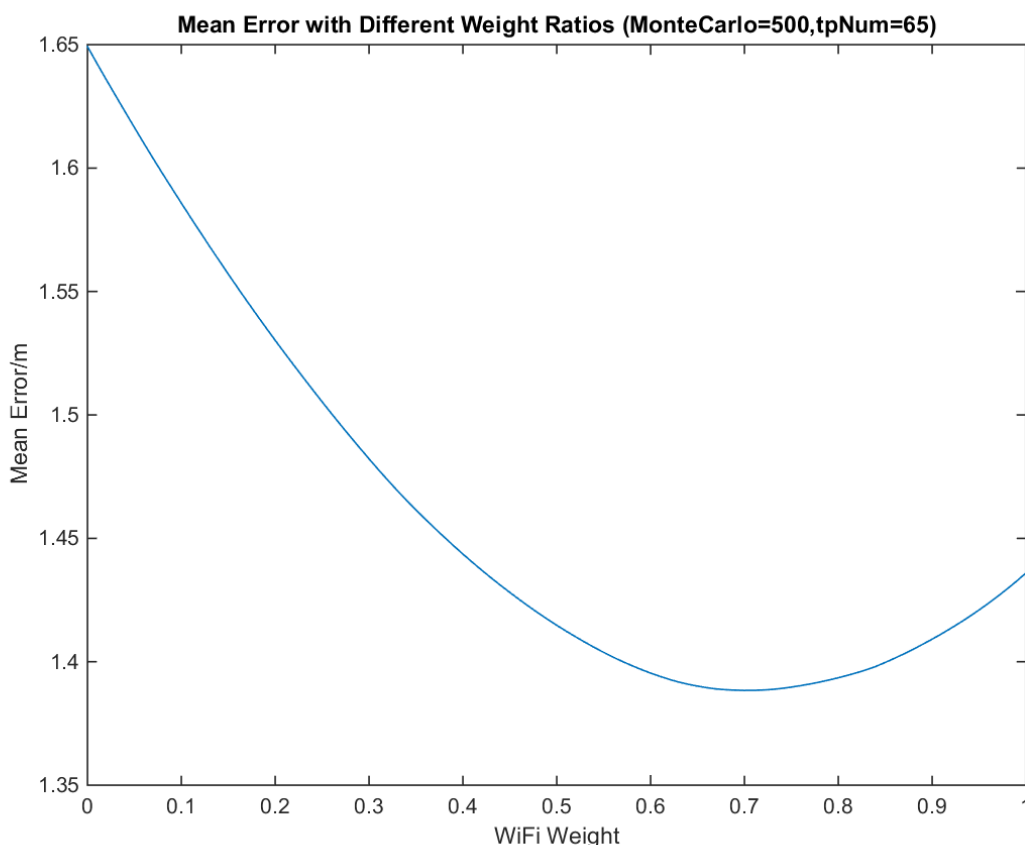


图 4.24 独立定位后加权方法下平均定位误差与权重比关系

图中横轴为 WiFi 的权重 w_{WiFi} ，对应的 FM 的权重就是 $w_{FM} = 1 - w_{WiFi}$ ，纵轴为平均误

差,单位为米。由图 4.24 可知,在 $w_{WIFI} = 0.70, w_{FM} = 0.30$ 平均误差取得最小值,最小平均误差为 1.39m。在曲线左端 $w_{WIFI} = 0, w_{FM} = 1$, 表示 FM 单独定位的情况,平均误差为 1.65m; 曲线右端 $w_{WIFI} = 1, w_{FM} = 0$, 表示 WiFi 单独定位的情况,平均误差为 1.43m。比较可知,加权融合相比 WiFi 独立定位误差减小了 2.8%, 相比 FM 独立定位误差减小了 15.76%。

4.6.2 误差分布评价指标

在误差分布评价指标下,对 50%与 90%定位误差与权重比的关系作图如图 4.25 所示。

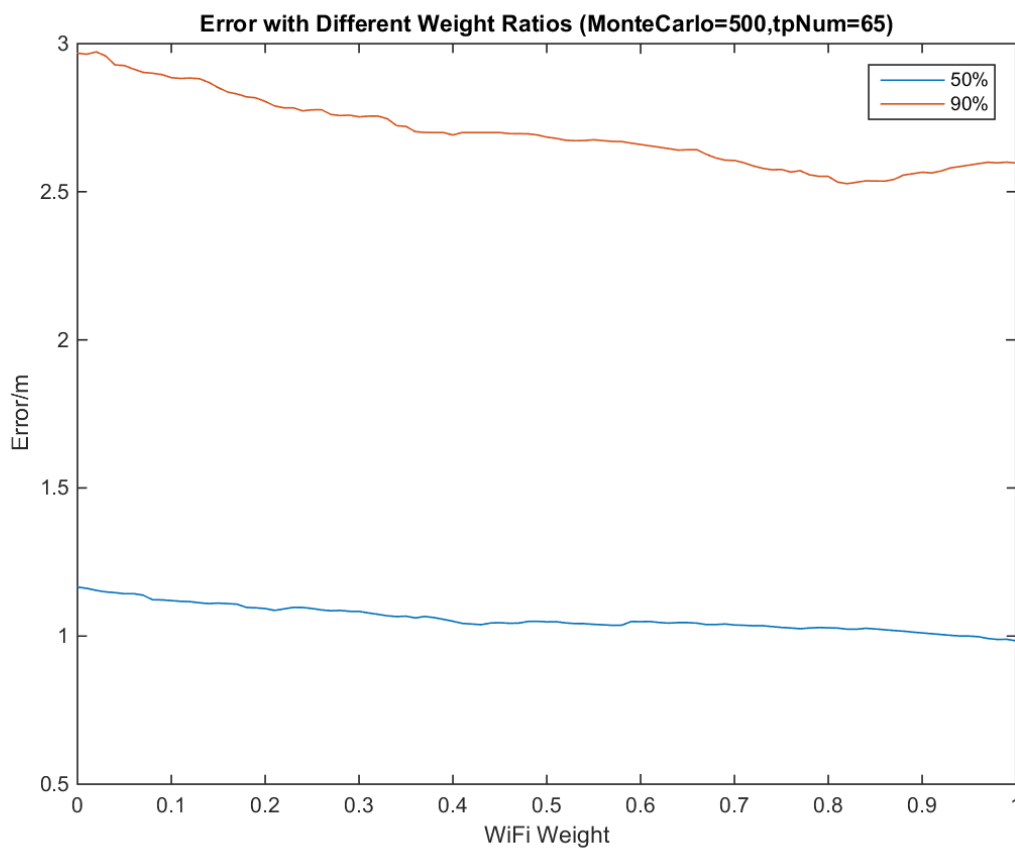


图 4.25 独立定位后加权方法下 50%与 90%定位误差与权重比关系

图中横轴为 WiFi 的权重,纵轴为误差值,单位是米。由图 4.25 可知,随着 WiFi 权重的增大,50%误差值基本呈减小趋势,而 90%误差值则大致呈先减小后增大的趋势。 $w_{WIFI} = 1.00, w_{FM} = 0$ 时 50%误差取得最小值 0.98m, 而 $w_{WIFI} = 0.82, w_{FM} = 0.18$ 时 90%误差取得最小值 2.53m。

综上，先独立定位后加权的定位效果可用表 7 总结。

表 7 先定位后加权的方法的效果总结

平均误差/m	50%误差/m	90%误差/m
1.39	0.98	2.53

4.7 融合效果的研究

由以上分析可以看出，在当前实验环境下，WiFi 独立定位已经能达到较高精度，FM 独立定位精度与 WiFi 差距较大，加上 AP 约束后精度提高了很多，与 WiFi 定位相比精度接近，而指纹融合和加权融合对定位精度的提升都较小，因此当前环境中并不能看出融合的作用。

事实上当前实验环境中 WiFi AP 数量丰富，从图 3.11 可知当前每个采集点都可以检测到 20 个以上的 AP，因此 WiFi 独立定位已经能达到较好效果。但在 WiFi 传播环境较为恶劣或是 WiFi AP 数量较少的区域，WiFi 定位精度严重下降甚至难以定位时，实验表明 AP 约束或是将 WiFi 与 FM 进行融合将对定位误差有较大改进。

实验中对数据库进行操作以模拟 WiFi 信号衰减较大的复杂室内环境。具体模拟方法为：将数据库中每个采集点中 RSSI 最小的 85% 的 AP 剔除，保留剩下信号较强的 15%。此时数据库中每个点的 AP 数量分布如图 4.26 所示。

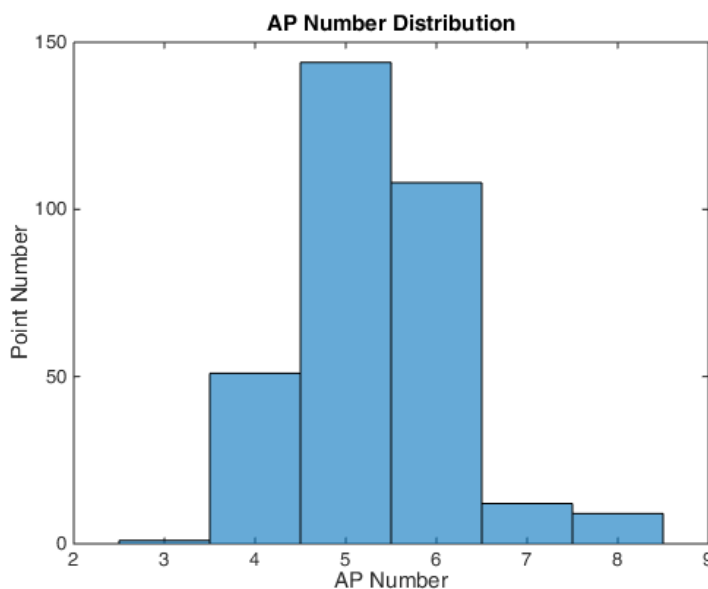


图 4.26 模拟环境下所有采集点 AP 数量分布

首先在该环境下测试 WiFi 和 FM 信号独立定位以及指纹融合的定位方式，蒙特卡罗次数 100 次，每次蒙特卡罗均使用同一组的 65 个 TP 进行定位，均值评价指标的结果

如图 4.27 所示。

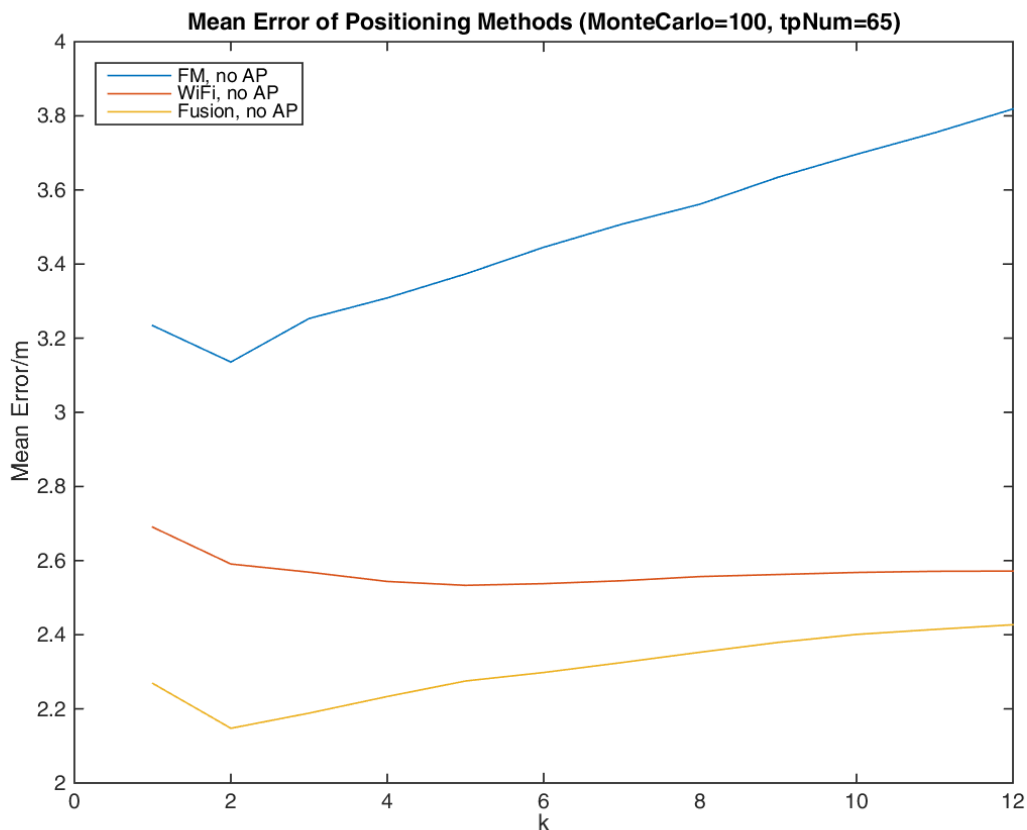


图 4.27 模拟环境下 WiFi, FM 以及指纹融合的平均定位效果

图中横轴为 k 值，纵轴为平均误差，单位为米。由图 4.27 可知，在该环境中，WiFi 单独定位最小平均误差为 2.53m，此时 $k=5$ ；FM 单独定位最小平均误差为 3.14m，此时 $k=2$ 。而指纹融合最小平均误差为 2.15m，误差相比 WiFi 单独定位减小了 15.0%，相比 FM 单独定位减小了 31.5%。

然后在该环境下对无约束的 WiFi 与 FM 采用加权融合进行定位实验。蒙特卡罗次数 100 次，结果如图 4.28 所示。

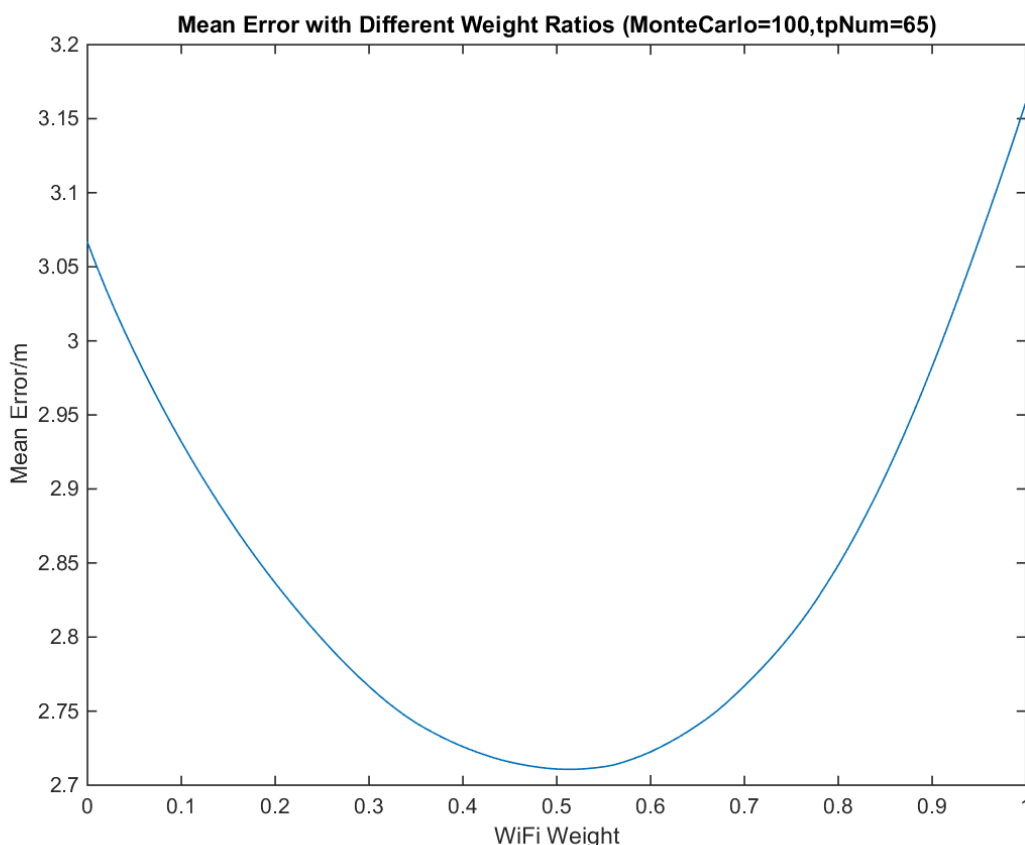


图 4.28 模拟环境下加权融合的定位误差

图中横轴为 WiFi 的权重 w_{WiFi} ，相应地 FM 的权重为 $w_{FM} = 1 - w_{WiFi}$ ，纵轴为平均误差，单位为米。由图 4.28 可知，无约束情况下， $w_{WiFi} = 1$ 时，为 WiFi 独立定位，平均误差为 3.16m； $w_{WiFi} = 0$ 时，为 FM 独立定位，平均误差为 3.07m. 而加权融合的最小误差出现在 $w_{WiFi} = 51\%$ 时，此时误差为 2.71m. 由此可知，AP 数量很少时，加权融合的精度相比 WiFi 单独定位提高了 14.2%，相比 FM 定位提高了 11.73%.

4.8 总结与分析

由以上实验，可总结出不同条件下 WiFi 定位的性能指标如表 8.

表 8 不同条件 WiFi 单独定位的性能指标

	平均误差/m	50% 误差/m	90% 误差/m
不加约束	1.44	0.90	2.56
AP 约束	1.42	0.90	2.55

不同条件下 FM 定位的性能指标如表 9.



表 9 不同条件下 FM 单独定位的性能指标

	平均误差/m	50% 误差/m	90% 误差/m
不加约束	3.06	1.80	5.67
AP 约束	1.69	1.18	3.02

指纹融合与加权融合两种方式在 AP 数量较多时的性能指标如表 10.

表 10 AP 数量较多时不同融合方式的性能指标

	平均误差/m	50% 误差/m	90% 误差/m
指纹融合, 无约束	1.36	0.90	2.41
指纹融合, AP 约束	1.35	0.90	2.39
加权融合	1.39	0.98	2.53

首先, WiFi AP 数量较多时, WiFi 独立定位的精度比 FM 高。比较表 8 和表 9, 是否加 AP 约束两种条件下, 平均误差、50% 误差和 90% 误差三个指标上 WiFi 的误差均比 FM 小, 这与理论结果一致。

第二, AP 约束对 FM 的定位精度有很大提升, 对 WiFi 的定位精度提升较小, 而对二者运算量则均能减小很多。由表 8 可知, AP 约束将 WiFi 独立定位精度提升了 1.4%; 由表 9 可知, AP 约束将 FM 定位独立精度提升了 44.8%。计算量方面, AP 约束让 WiFi 定位运行时间减少了 39%, 让 FM 定位运行时间减少了 22%。因此在实际应用中应尽可能使用 AP 约束, 既能提高精度, 又能减小运算量。

第三, WiFi AP 较多的环境中, 指纹融合和加权融合对 WiFi 或 FM 定位精度的提升不大; AP 很少的时候, 两种融合方式对定位精度的提升都很大。由表 10 可知, AP 数量较多的时候, 指纹融合平均误差最小 1.35m, 相比 AP 辅助下 WiFi 的 1.42m 提升了 4.9%, 相比 AP 辅助下 FM 的 1.69m 提升了 20.1%; 加权融合平均误差为 1.39m, 相比 WiFi 精度提升了 2.1%, 相比 FM 精度提升了 17.8%。但 AP 数量较少的时候, 指纹融合平均误差相比 WiFi 单独定位减小了 15.0%, 相比 FM 单独定位减小了 31.5%; 而加权融合相比 WiFi 单独定位提高了 14.2%, 相比 FM 定位提高了 11.7%。因此 WiFi 与 FM 的融合定位尤其适合 WiFi 环境较差, AP 很少的地方, 能获得比单独一种信号高得多的定位精度。

5 后续工作计划

目前已经基本完成对定位算法效果的研究工作, 接下来计划将算法移植到手机平台上, 做成一个能够在数据采集区域进行实时定位的 Android 软件。

软件的总体架构已经设计完成, 如图 5.1 所示。

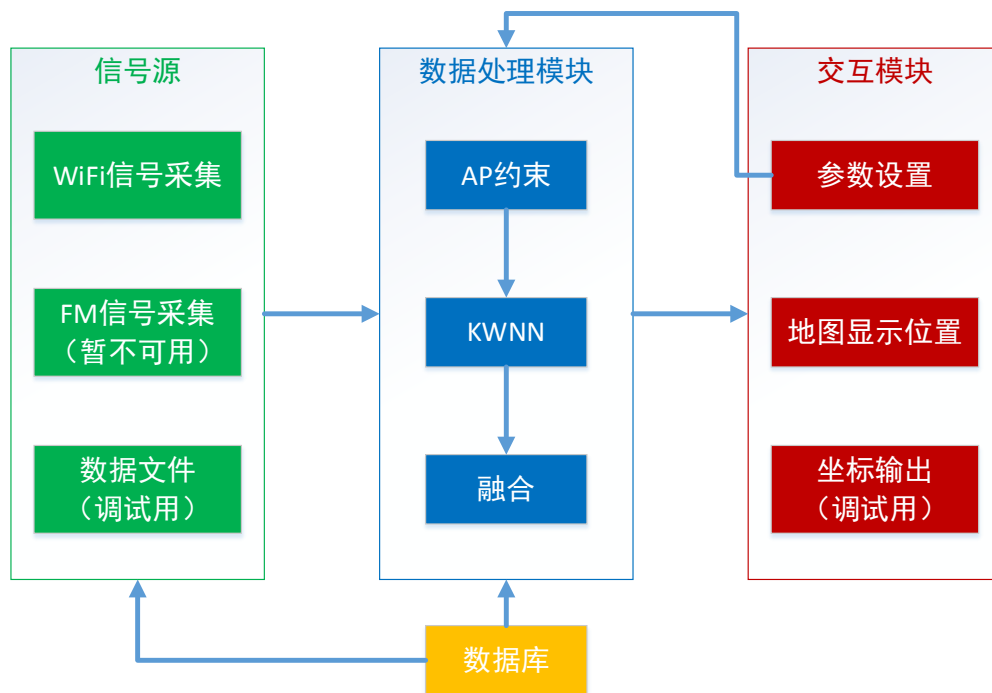


图 5.1 Android 定位软件总体架构

如图 5.1 所示, 软件主要分为信号源、数据处理模块和交互模块三个部分。

信号源采集所使用信号 RSSI 信息。由于 Android 没有提供控制 FM 模块的官方 API, 各个手机厂家基本都是采用 FM 模块生产商提供的库或是在其基础上进行二次开发, 整个毕设阶段都在寻找适合于测试机 PLK-AL10 的开源 FM 库, 但并未找到。今后计划从 Android 源码中的隐藏 API 入手, 尝试采用相应的 FM 的隐藏 API 控制 FM 模块。因此当前仅能实现 WiFi 信号 RSSI 的采集, FM 信号暂时不能采集。数据库文件则是用来测试手机上运行的算法的正确性, 通过与 PC 上已经反复验证的正确的算法进行结果对比。

数据处理模块运行算法。由于之前已经验证 AP 约束不仅能减小误差, 还能大大减小计算量, 因此将 AP 约束加入算法中。如果有多重信号, 就可以进行融合, 使得在 WiFi AP 很少的地方依然保持较高定位精度。

最后数据处理模块将处理结果发送给交互模块, 交互模块在地图上相应位置显示出



计算的位置。直接输出坐标的功能既可以用来测试算法准确性，又可以用来计算实际定位误差值。还应该加上设置界面，用来对算法中用到的 k 值、是否使用 AP 约束等参数进行调整。



结论

本课题采用 KWNN 算法对 WiFi 与 FM 信号的指纹定位进行了研究, 采用了蒙特卡罗实验的方法对 WiFi 和 FM 信号各自单独定位和 AP 约束下两种信号的定位效果进行了实验, 采用了算术平均和误差分布两种评价指标对各种方法的效果进行了评估, 并在 AP 数量较多和 AP 数量很少两种环境下研究了融合定位的效果。

经过一系列的实验与分析, 了解到在 AP 数量较多的环境下, WiFi 单独定位的平均误差为 1.44m, 加上 AP 约束为 1.42m, 精度提高了 1.4%, 运算时间减少了 39%; FM 单独定位的平均误差为 3.06m, 加上 AP 约束为 1.69m, 精度提高了 44.8%, 运算时间则减少了 22%。这表明, AP 约束能显著提高 FM 定位的精度, 同时还能减少 WiFi 和 FM 定位的运算量, 有利于程序移植到智能手机平台。

而在 AP 数量较多时, 指纹融合和加权融合相比 WiFi 独立定位的精度提升分别为 4.9% 和 2.8%, 相比 FM 独立定位的精度提升则为 20.1% 和 17.8%。AP 数量较少时, 指纹融合和加权融合相比 WiFi 独立定位精度提升分别为 15.0% 和 14.2%, 相比 FM 独立定位的精度提升分别为 31.5% 和 11.7%。由此说明融合方法在 WiFi AP 较多时对精度提升效果不明显, 而在 AP 数量很少时对定位精度的改善效果显著。在室内 WiFi 信号衰减较大或是 AP 布置本来就很少的环境中, 采用融合定位精度将比 WiFi 或 FM 单独定位高很多。

课题在研究过程中, 也发现在多种定位条件下的定位结果均存在误差偏离平均值过大的情况, 这些坏点对算法整体效果有较大影响, 考虑在后续工作中采用一定方法予以剔除, 进一步提高定位精度。



致谢

历时三个多月的本科毕设工作即将结束，在此我衷心感谢在这段时间悉心指导、帮助、鼓励过我的老师、师兄师姐和亲人们，真心谢谢你们。

首先非常感谢我的指导老师丛丽老师对我的工作的悉心指导，在整个毕设过程中，她一直关心着我的工作，在我对前进方向感到疑惑的时候她总会为我指明道路，在我对研究过程有疑问的时候她总是耐心与我讨论、讲解并给出建议。每次与她讨论总能让我明确方向、清楚认识方法，加深我对组合导航的认识理解。我非常期待今后在丛老师的指导下进行学习、科研的研究生生活。

然后要感谢实验室的屈阳师兄对我的帮助。本课题中所有的实地测量和数据采集工作都是在屈阳师兄的帮助下完成的，课题中使用的 FM 信号数据全部由屈阳师兄采集，在我们共同工作的过程中师兄的经验让我们少走了不少弯路，如果没有师兄的帮助我一个人可能会花上多得多的时间才能完成测量和采集工作。同时要感谢实验室的吴飞燕师姐和谭滋中师兄，感谢他们在区域选择和程序优化方面给予的宝贵建议，让我能采用正确的方法高效地完成工作。

最后要感谢我的父亲母亲，感谢他们对我的关心和支持，帮助我克服困难，让我能专心完成毕设工作。

最后再次感谢在我的毕设工作过程中所有关心过帮助过我的人们，谢谢你们。



参考文献

- [1] ABI Research. Indoor location in retail: Where is the money?
<https://www.abiresearch.com/market-research/service/location-technologies/>, 2015-05.
- [2] P. Bahl, et al. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system [A]// INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE [C]. IEEE, 2000: 775-784.
- [3] W. Ching, R. J. Teh, B. Li, et al. Uniwide WiFi based positioning system[A]//IEEE international symposium on technology and Society (ISTAS)[C]. 2010: 180-189.
- [4] J. Ledlie, J. G. Park, D. Curtis, et al. Molé: a scalable, user-generated WiFi positioning engine[J]. Journal of Location Based Services, 2012, 6(2): 55-80.
- [5] J. Hallberg, M. Nilsson, K. Synnes. Positioning with Bluetooth[A]//10th International Conference on Telecommunications[C]. IEEE, 2003: 954-958.
- [6] Liu Shu, Yingxin Jiang, A. Striegel. Face-to-face proximity estimation using Bluetooth on smartphones[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(4): 811-823.
- [7] Weinberg, A. Digital AM/FM positioning system (DAFPS)—an international positioning system[P]. U.S. Patent: 6219385. 2001.
- [8] A. Papliatseyeu, N. Kotilainen, O. Mayora, et al. FINDR: Low-cost indoor positioning using FM radio[A]// MobileWireless Middleware, Operating Systems, and Applications[C]. Springer Berlin Heidelberg, 2009: 15-26.
- [9] V. Otsason, A. Varshavsky, A. LaMarca, et al. Accurate GSM indoor localization[A]// UbiComp 2005: Ubiquitous Computing[C]. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 141-158.
- [10] M. Ibrahim, M. Youssef. Cellsense: A probabilistic rssi-based gsm positioning system[A]// Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE[C]. IEEE, 2010: 1-5.
- [11] L. M. Ni, Yunhao Liu, Yiu Cho Lau, et al. LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID[J]. Wireless networks, 2004, 10(6): 407-415.
- [12] P. Bahl, V. N. Padmanabhan. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system[A]// INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE[C]. IEEE, 2000: 775-784.
- [13] P. Bahl, V. N. Padmanabhan, A. Balachandran. Enhancements to the RADAR user location and tracking system. <http://research-srv.microsoft.com/en->



[us/um/people/bahl/papers/pdf/msr-tr-2000-12.pdf](http://www.us.um/people/bahl/papers/pdf/msr-tr-2000-12.pdf), 2000.

- [14] Wang Chin-Liang, Chiou Yih-Shyh. An adaptive positioning scheme based on radio propagation modeling for indoor WLANs[A]// Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd[C]. IEEE, 2006: 2676-2680.
- [15] Li Binghao, Yufei Wang, Hyung Keun Lee, et al. Method for yielding a database of location fingerprints in WLAN[J]. Communications, IEE Proceedings-, 2005, 152(5): 580-586.
- [16] V. Moghtadaiee, A. G. Dempster, S. Lim. Indoor localization using FM radio signals: A fingerprinting approach[A]// Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2011 International Conference on[C]. IEEE, 2011: 1-7.
- [17] B. Shin, J. H. Lee, T. Lee, et al. Enhanced weighted K-nearest neighbor algorithm for indoor Wi-Fi positioning systems[A]// Computing Technology and Information Management (ICCM), 2012 8th International Conference on[C]. IEEE, 2012: 574-577.
- [18] Chen Yin, D. Lymberopoulos, Jie Liu, et al. FM-based indoor localization[A]// Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services[C]. ACM, 2012: 169-182.
- [19] P. Noah. Indoor Location with Wi-Fi Fingerprinting[A]// Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR): Sensing for Control and Augmentation, 2013 IEEE[C]. IEEE, 2013: 1-8.
- [20] M. N. Husen, S. Lee. Indoor human localization with orientation using WiFi fingerprinting[A]// Proceedings of the 8th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication[C]. ACM, 2014: 109.
- [21] Y. Sungro, K. Lee, Y. YeoCheon, et al. ACMI: FM-based Indoor Localization via Autonomous Fingerprinting[A]// IEEE Transactions on Mobile Computing[C]. IEEE, 2016: 1318-1332.
- [22] A. M. Ladd, et al, Robotics-based location sensing using wireless Ethernet[J]. Wireless Networks, 2005, 11(1-2), 189-204.
- [23] He Suining, S-H Gary Chan. Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 18(1): 466-490.
- [24] A. Popleteev, V. Osmani, O. Mayora. Investigation of indoor localization with ambient FM radio stations[A]// Pervasive Computing and Communications (PerCom), 2012 IEEE International Conference on[C]. IEEE, 2012: 171-179.



[25] Li Binghao, J. Salter, A. G. Dempster, Indoor positioning techniques based on wireless LAN[A]// LAN, First IEEE International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications[C]. 2006.