

河北省自然科学基金资助项目 (E20200402086)

多源数据融合的 室内定位算法研究

袁德宝 张帆宇扬 苏德国 ○ 编著



西南交通大学出版社

河北省自然科学基金资助项目 (E20200402086)

多源数据融合的 室内定位算法研究

袁德宝 张帆宇扬 苏德国 © 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

多源数据融合的室内定位算法研究 / 袁德宝, 张帆
宇扬, 苏德国编著. —成都: 西南交通大学出版社,
2021.6

ISBN 978-7-5643-8117-2

I. ①多… II. ①袁… ②张… ③苏… III. ①数据融
合 - 应用 - 无线电定位 - 算法 - 研究 IV. ①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 125430 号

Duoyuan Shuju Ronghe de Shinei Dingwei Suanfa Yanjiu

多源数据融合的室内定位算法研究

袁德宝
张帆宇扬 编著
苏德国

责任编辑 张宝华
封面设计 何东琳设计工作室

印张 7 字数 90千

出版发行 西南交通大学出版社

成品尺寸 170 mm × 230 mm

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

版次 2021年6月第1版

地址 四川省成都市二环路北一段111号
西南交通大学创新大厦21楼

印次 2021年6月第1次

邮政编码 610031

印刷 成都蜀通印务有限责任公司

发行部电话 028-87600564 028-87600533

书号 ISBN 978-7-5643-8117-2

定价 45.00元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

尽管以 GNSS 系统为代表的定位技术的快速发展及广泛应用给人们的生产生活带来了翻天覆地的变化，但局限于其定位原理，当卫星接收终端位于树下、(构)建筑物群附近或建筑物内部时，卫星信号在穿过障碍物时衰减极大，甚至会出现 GNSS 信号中断的情况。这就导致在城市建筑物密集区域及建筑物内部的人们在利用自己的手机定位时常常会出现定位漂移或获取位置失败的情况，给人们利用 GNSS 技术进行基于位置的服务带来很大的困扰。本书以智能手机为定位终端，利用惯性传感器、Wi-Fi 信号接收器、地磁传感器等手机内部集成传感器，通过感知建筑物内 Wi-Fi 信号、行人航迹及地磁特征实现室内定位，并对传统定位算法及融合方式进行改进，以提高定位精度、稳定性及抗干扰能力，利于基于室内定位的 LBS 的推广应用。

本书是作者在总结前人研究成果的基础上，在河北省自然科学基金资助项目的 (E20200402086) 资助下完成的。全书共分八章：第 1 章概述了室内定位算法的研究进展，变形分析与预测模型和小波分析的研究现状以及存在的问题。第 2 章介绍了与室内定位相关的理论知识。包括常见的四类室内定位技术：基于无线信号发射设备的室内定位技术、基于惯性导航的 IMU 及 MEMS 室内定位技术、基于图片 (视频) 的计算机视觉定位技术、其他技术，以及常用的两类室内定位方法：三角测量方法和 RSSI 测量方法；总结了影响室内定位的各个因素，尽量减小或者避免定位过程中的误差。第

3 章介绍了 Wi-Fi 的发展历程、工作原理、系统组成, 以及利用 Wi-Fi 技术进行室内定位的流程及原理, 阐述了 Wi-Fi 室内定位的优缺点; 详细介绍了蓝牙 5.0 技术, 以及网络侧定位和终端侧定位两种蓝牙定位方式及其定位流程, 为 Wi-Fi 和蓝牙技术室内定位融合提供了理论支持; 为了验证 Wi-Fi 和蓝牙室内定位精度, 构建了 Wi-Fi 和蓝牙数据采集的实验环境, 制订了数据采集计划, 编写了数据采集软件, 并详细介绍了 Wi-Fi 和蓝牙信号强度的采集软件及使用方法。第 4 章提出了利用邻域均值滤波算法将指纹数据库中的噪声进行剔除, 提高了定位结果精度, 说明了数据库中噪声对定位结果的影响程度以及指纹数据库滤波去噪的重要性; 提出准确域的概念, 用于确定两种定位结果的准确度, 为融合两种定位方法提供可行性依据; 确定了融合过程中 Wi-Fi 和蓝牙定位结果的权重问题, 最终得到 Wi-Fi 和蓝牙定位技术融合后的定位结果, 提高了定位精度, 减小了平均定位误差。第 5 章介绍了主流 Wi-Fi 定位技术原理, 对采样点滤波所使用的移动平均滤波法进行了改进, 分析了指纹数据集, 通过筛选有效热点对数据采集量进行了简化; 在定位算法中优化了 K 邻近算法, 提出了楼层识别算法, 最后通过实验对定位方法进行了验证。第 6 章介绍了主流 PDR 定位技术的原理及定位坐标系, 通过基于加速度幅值的波峰波谷检测法提高了步态检测的准确率, 并依靠匹配路径特殊角度来消除累积误差, 实现对建筑物内空间信息的有效利用。第 7 章介绍了 Wi-Fi,

PDR，地磁的结合定位。首先对地磁定位原理进行介绍，绘制定位区间的磁力图，分析地磁定位特性。其次，通过三种定位方式的结合使用，解决 PDR 定位中初始位置难以自动获取、长距离定位累积误差较大、地磁定位易出现模糊解和 Wi-Fi 定位不连续等问题。最后通过实验验证，分析本书所提出的结合定位算法的定位效果。第 8 章为总结与展望。

在本书即将出版之际，特别感谢河北省自然科学基金资助项目在研究过程中所给予的经费支持！在研究过程中还得到了北京建筑大学王坚教授的热情帮助和指导，中国矿业大学（北京）测绘与土地利用系及遥感与地理信息系的全体同事对作者的研究工作也给予了大力支持，实验室部分学生对采集数据提供了大力帮助，在此一并表示由衷的感谢！书中引用了一些研究者发表的文献资料和成果，在此对所引用文献的作者及未能提及的作者表示诚挚的谢意！

鉴于时间比较仓促，书中可能存在不妥或疏漏之处，恳请读者批评指正。

作 者

2021 年 4 月

1	绪论	001
	1.1 研究背景及意义	001
	1.2 室内定位研究进展	007
2	室内定位相关理论	015
	2.1 常见的室内定位技术	015
	2.2 室内定位方法	020
	2.3 室内定位的影响因素	025
3	Wi-Fi 和蓝牙室内定位方法	028
	3.1 Wi-Fi 室内定位技术	028
	3.2 蓝牙室内定位技术	030
	3.3 实验环境构建	032
	3.4 数据采集	033
4	Wi-Fi 和蓝牙定位融合	037
	4.1 指纹数据库滤波	037
	4.2 Wi-Fi 和蓝牙融合定位	042
5	基于 Wi-Fi 的位置指纹室内定位方法	046
	5.1 基于位置指纹的 Wi-Fi 定位概述	046
	5.2 数据采集及处理	050

5.3	定位点坐标计算	054
5.4	实验设计及分析	056

6

结合手机惯性传感器的室内定位算法	062
------------------------	-----

6.1	定位方法概述	062
6.2	航位推算	066
6.3	特征角度匹配校正	072
6.4	实验仿真	073

7

地磁、Wi-Fi 与 PDR 的结合定位算法	077
------------------------------	-----

7.1	地磁定位概述	077
7.2	Wi-Fi、地磁与 PDR 的结合	085
7.3	实验设计与分析	088

8

总结与展望	092
-------------	-----

8.1	工作总结	092
8.2	工作展望	094

参考文献	096
------------	-----

1 绪论

1.1 研究背景及意义

基于位置的服务 (Location Based Service, LBS)^[1]是通过各种技术手段获取移动终端用户的位置信息,并以此为基础为用户提供相应服务,即通过将地理位置信息与用户的服务需求相结合,给用户带来更好的服务体验。最早基于位置服务需求的提出方是美国通信委员会,他们在 1996 年推出了一项行政性命令 E911,主要内容是要强制性构建一个公众安全网络,用于通过无线信号来追踪用户的位置,以解决 911 呼救中心无法通过手机信号确定呼叫终端地理位置的问题,这也是位置服务的雏形。LBS 的诞生旨在完成紧急情况下对呼救人员的位置确定,以便救援任务的及时展开。2001 年,911 恐怖袭击事件让美国政府及公众进一步认识到位置服务的重要性,这也从某种角度上催生了相关的市场服务业务。

基于位置的服务起源于紧急呼叫服务,在 20 世纪末同时也对以军事为目的的相关任务提供了支持。随后,LBS 在市场外围的一些民用领域开始得到应用。例如,专业测绘、车辆及轮船航海导航等领域,利用全球卫星导航系统,通过便携式导航设备对移动人员和物体进行位置信息采集,并结合地理信息系统进行辅助分析,从而为用户提供定点定位、目的地选择和路径规划引导等服务,建立起人与地点之间的联系。在此阶段,LBS 虽然能够给人们带来一些出行上的便利,但服务范围仍局限在专业领域,且不能感知人们进行相关行程的目的,这就削弱了基于位置信息提供附加服务的能力,导致 LBS 产业链中进行位置信息服务的运营服务商不能获取足够的利润,而获取利润较多的终端生产商只能提供硬件设备,并不能提供高质量的位置信息,这

也限制了基于位置服务的发展。

进入 21 世纪，随着奔腾系列微处理器时代（1993—2005）的到来，人们所使用的个人计算机在网络化和智能化等方面都得到了进一步提升；全球互联网经过十几年的发展，截至 2007 年，其基础设施已经覆盖五大洲的 233 个国家和地区，用户约 10.93 亿，普及率为 16.6%；次年 7 月，苹果公司发布 iPhone 3G，从此开启了智能手机的新时代。由于微处理器、互联网以及智能手机的快速发展和普及，移动互联网成为越来越多的人的生活必需品，随之也产生了大量的位置服务需求。伴随着移动互联网用户对搜寻地点、发现人以及发现各类消费服务位置的需求市场的日益增大，LBS 在 2009 年迎来了新的发展高峰。

2009 年 3 月，美国 Foursquare 网站成立，它将 LBS 平台与消费者对饮食、旅游、休闲、购物等场所所在的地理位置相关联，使用户在消费地点以“签到”的方式将消费内容及商户信息体现在网站地图上，完成与其余注册用户的互动。这既为潜在消费用户提供了店铺位置信息，又在一定程度上为商家做了宣传，同时使用户本身获得了一种成就感和满足感；依靠此经营模式，Foursquare 仅用一年半的时间便积累了 300 万以上的用户量。除以“签到”为核心的“LBS+生活分享”模式外，2011 年，以陌陌和微信“附近的人”为代表的“LBS+社交”模式的出现标志着 LBS 开始与传统社交网络及各种移动互联网产品进行融合。2013 年，中国互联网公司百度、阿里巴巴和腾讯将 LBS 与 O2O（线上到线下）进行整合，并在该领域展开了竞争。至此，LBS 成为连接网络和实体业务的有效平台，它通过虚拟网络使原本相距较远的消费者与商家在线上变得触手可及，极大地方便了人们的生活，甚至改变了传统的购物方式。经过若干年的发展，基于位置的服务实现了从军用到民用、从市场外围到实现商业价值的快速发展，这也向人们证明了 LBS 与日常生活息息相关。未来随着定位技术的发展，其潜力将得到进一步释放。

如今,在人们生活中普遍使用的定位系统^[2]有全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)、格洛纳斯卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)、伽利略卫星导航系统(Galileo Satellite Navigation System, GALILEO)等全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)。全球导航卫星系统(GNSS)的主要构成包括空间星座部分、地面测控部分和用户部分。其基本原理是利用空间距离后方交会进行定位,即基于卫星的空间坐标与卫星至接收机天线的相位中心的距离交会实现定位,从而推算出控制点 P 的空间坐标(见图 1.1)。在获取地理空间位置信息时,全球导航卫星系统具有如下三个方面的优势:(1)提供全天候、全球性的导航和定位服务,能够使全球范围内的用户获取位置信息,方便用户进行导航和定位;(2)可进行高精度、高速度的实时精密导航和定位^[3],能够更加及时、快速、准确地为军民提供授时服务以及飞机、轮船、汽车的实时导航定位服务;(3)用途广泛,操作简便。

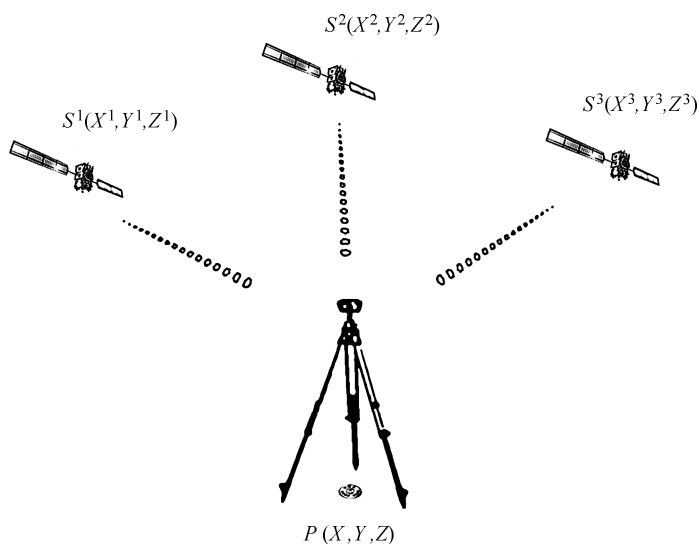


图 1.1 GNSS 空间距离后方交会原理示意图

随着 GNSS 接收芯片的微型化^[4]，手机的定位精度也得到了提高。2018 年，小米公司发布的小米 8 手机首次集成了博通 BCM47755 定位集线器，通过支持 GPS 双频（L1+L5）信号协同工作，在城市复杂环境下，有效改善了导航精准度，使得用户能够在移动端获得更加精确稳定的定位服务。精确便捷的位置信息获取无疑进一步推动了基于位置服务的发展，为消费者日常使用的应用程序，如高德地图、滴滴打车、美团外卖等提供了更加精确的位置基础。

尽管以 GNSS 为代表的定位技术的快速发展及广泛应用给人们的生产生活带来了翻天覆地的变化，但局限于其定位原理，当卫星接收终端位于树下、（构）建筑物群附近或建筑物内部时，卫星信号在穿过障碍物时衰减极大，甚至会出现 GNSS 信号中断的情况。这就导致在城市建筑物密集区域及建筑物内部的人们在利用自己的手机定位时常常会出现定位漂移或获取位置失败的情况，给人们利用 GNSS 技术进行基于位置的服务带来很大的困扰。研究表明，在人类活动中，80% 的信息与地理位置有关，其中的 80% 又与室内位置有关。例如，大型仓储式超市内购物引导、医院或社区建筑物内病人移动监护、博物馆内游客导览以及室内人与智能家居之间的互联等，都是室内定位技术应用的典型代表。由此可见，面向室内的定位技术是一个前景广阔的研究方向，如何在建筑物内同时兼顾定位的精度和稳健度，寻找一个便于布设、使用方便且成本较低的适用于室内环境的定位系统已经成为业界的研究重点。本书以智能手机为定位终端，利用惯性传感器、Wi-Fi 信号接收器、地磁传感器等手机内部集成传感器，通过感知建筑物内 Wi-Fi 信号、行人航迹以及地磁特征实现室内定位，并对传统定位算法及融合方式进行改进，以提高定位精度、稳定性及抗干扰能力，利于基于室内定位的 LBS 的推广应用。

随着互联网技术的发展，以 GNSS 定位技术为信息源的基于位置的服务已渗透到人们生活中的方方面面。打开我们的智能手机，可以

发现常用的计算机应用程序（Application，APP）几乎都融合了 LBS 功能。例如，购物软件如淘宝、京东、顺丰中的物流配送信息，生活服务软件如美团、滴滴出行和共享单车中的附近服务信息，导航软件如高德地图、百度地图中的实时路况信息，社交软件如微信、QQ 中的附近的人的信息，等等，这些正潜移默化地改变着我们的生活方式，给我们的生活工作带来了极大的便利。

虽然 GNSS 定位精度不断提高，接收终端也越来越智能化，但是其服务范围仍存在盲区。当用户身处室内时，往往无法接收到有效 GNSS 信号，导致室内环境下的定位需求得不到满足，为此，室内定位技术成为解决此问题的有效途径^[5]。也就是说，人们在户外可以方便地通过卫星定位获得自己的位置信息，但是当其身处室内，环境复杂又急需定位时，却发现根本没有卫星信号，或定位误差极大，得到的位置信息往往不可用，这给习惯了位置信息服务的人们带来了极大的不便和困扰。所以说，室内定位技术具有广阔的应用场景，或者说是目前消费者亟待满足的刚需，基于室内位置信息的服务也是最具市场前景和发展潜力的业务之一。随着人们经济收入水平的提高，人们对生活质量、工作效率和社会服务的期望也随之增高，在行政办公、文教、医疗服务、商业、工程测量以及工业生产等方面，室内定位技术均有不可或缺的应用价值。例如：

（1）博物馆数字化管理。博物馆承担着历史文化宣传教育功能，利用室内定位技术可满足不同观众的展品讲解需求，且不受讲解人员数量的限制，并能根据观众位置推荐合适的参观路线，实现自动导览、智能互动，提升观众体验感。

（2）养老院及医院智能看护。老人和病人的生活自理能力较弱，室内定位技术可帮助医护人员实时掌握他们的位置，并在紧急情况下及时处理应急情况，为他们的生命健康提供有力保障。

（3）大型购物商场购物辅助。消费者在大型商场内迷失方向，以

及面对琳琅满目、种类繁杂的商品很难找到他们自己所需要的东西时，商户可利用室内定位技术，将优惠信息、个性广告精准地投送给消费者，消费者同时也可获得最优路径导航。

（4）隧道及地铁的建设及运营管理。随着城市功能的日益完善，城市地下空间结构越来越复杂，由于环境特殊，针对隧道及地铁的安全施工与安全管理成为工程建设中的重中之重。通过室内定位技术对施工人员的位置进行追踪，可实时掌握隧道人员的位置分布^[6]，便于管理，或者通过高精度室内定位技术来取代传统巷道测量技术，通过智能化施工方案来减少工人工作量，提高工作效率。此外，还能通过在地铁站及运营线路内设置相关的定位设备来监测车站人流及流动方向，当遇到紧急情况时便于迅速组织人员疏散并展开救援，提供安全保障。

（5）智慧工厂员工管理。现代生产车间面积较大、生产线员工数量较多，使用室内定位技术能够对员工行为动态监控，实施智能考勤、工时统计，提高公司产品生产效率及风险管控能力。

（6）仓库及物流中心自动化管理。企业生产销售与仓库及物流中心息息相关，利用室内定位技术可实现无人叉车自动导航，智能机器人自动分拣传送货物，进而提高仓库内人员、货架、托盘、穿梭车等工作要素的管理效率，实现物流的全路径跟踪，降低企业生产成本，将工人从重复性简单烦琐的工作中解放出来。

（7）机场旅客个性化服务。布置室内定位系统的机场可实现航站楼内各功能区旅客自助导航、行李标记航迹追踪，将定位导航、停车场车辆定位、旅客财产管理及应急救援等功能集一体，构建智慧机场，提高机场服务质量。

（8）建筑工地安全管理。建筑工地施工作业现场存在人员流动大、现场状况杂乱、安全隐患难以觉察等问题，采用室内定位技术可对建筑物内施工人员进行标记，当其靠近危险区域或危险设备时即时发出

警告，预防安全事故发生。

此外，基于室内位置信息的服务还可应用于儿童看护、消防现场反馈、虚拟现实多人互动、大型会展精准导航、地下停车导航与寻车、军事训练等领域，具有较高的市场潜力与商业价值。因此，对于定位精度高、稳定性强、系统布设简单、成本低、易于推广的室内定位技术进行深入研究，具有重要的现实意义。

1.2 室内定位研究进展

1.2.1 室内定位技术研究现状

室内定位通常是指在室内环境下，通过无线定位、惯性定位、地磁定位、视觉定位^[7]等技术，实现室内空间人员、物体等的位置信息获取，从而为人们的定位导航或物体监管提供数据支持，实现对室内人员及相关固定资产移动状态的远程管理。现阶段研究较为深入的几种室内定位方法有射频识别技术、低功耗蓝牙定位技术、Wi-Fi 定位技术、ZigBee 定位技术、红外定位技术、可见光定位技术、超宽带定位技术、伪卫星定位技术、超声波定位技术、惯性定位技术、地磁定位技术等，而且都取得了比较丰硕的研究成果。下面对以上技术进行简要介绍。

射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）^[8]技术通过设置能够将无线电信号调成电磁场的固定天线，来感应相配套的电子标签并产生感应电流，利用感应电流进行数据交换，以达到识别和实现分米级定位精度的目的。其中，通过信号接收强度为特征信号进行定位的研究较多。Hightower J.^[9]等人较早提出通过在室内空间布置好的多个阅读器来捕获标签信号，通过信号的衰减来解算标签位置。Qiu Lanxin^[10]，Lin Qiongzhen^[11]等人设置多个标签，使用全向天线接收其响应信号，通过模拟阵列天线来代替阵元，解决了单一阵元定位稳定

性较差的问题。Han Jinsong^[12]等人使用到达相位差法，将多普勒频偏用于标签的定位计算，解决了利用信号强度进行定位抗干扰能力弱、定位精度低的问题。

低功耗蓝牙（Bluetooth Low Energy, BLE）^[13]与 Wi-Fi 定位技术的主要原理是利用测定出的信号强度值来计算终端位置。主流的定位法有通过建立信号衰减模型进行定位的三角定位法和通过匹配所建立的室内信号分布样本进行定位的指纹法，能够达到米级定位精度。尽管 Wang Quanyu^[14]等人在理想环境下通过布置多个蓝牙信号源利用三角定位法取得了较高精度的定位结果，但由于室内环境复杂，蓝牙及 Wi-Fi 信号均会受到干扰，多路径效应、障碍物及人体等因素都会严重影响信号的传播强度，理想的实验条件难以实现。刘振远^[15]等人基于高斯分布对低功耗蓝牙信号进行过滤，提出两点定位算法，实现了类似走廊等狭长空间较高精度的三角定位。熊海龙^[16]等人对三角定位算法进行优化，通过利用若干个满足一定要求的节点对定位坐标进行校正，降低了定位误差。基于指纹法定位的算法优化研究较多，如邻近算法（K-Nearest Neighbor, KNN）、加权邻近算法（Weighted K-Nearest Neighbor, WKNN）、支持向量机（Support Vector Machine）、贝叶斯概率法等。刘志昆^[17]等人利用限定区域对采集到的信号特征进行分类，根据信号强度变化趋势定义接近度，提出基于蓝牙 4.0 指纹定位技术的接近度邻近算法，优化了指纹库的建立和定位精度。Ma Rui^[18]等人提出了加权融合的 Wi-Fi 室内定位算法，即通过对指纹的预匹配选择候选指纹，再结合改进后的欧氏距离法和联合概率法计算出两个中间结果，并使用加权融合法处理后得到精度较高的最终结果。Peerapong Torteeka^[19]等人提出了模糊邻近算法，即在指纹集的标签分类中应用了模糊集论与邻近算法，提高了定位的鲁棒性。

ZigBee 是一种适用于短距离、小范围内进行室内定位的无线通信技术，它具有低功耗特点，实现方式是通过布设若干个待定位的盲节

点和一个已知位置的参考节点，将其与网关之间形成组网并相互协调通信以实现全部定位，可以达到米级定位精度。余凯^[20]等人利用 ZigBee 技术实现了封闭空间内盲人的定位及远程监控，提出了基于距离的定位算法，改进了质心定位算法处理盲点距离参考点较远时定位误差较大的缺点。Alvarez Y.^[21] 等人为避免 ZigBee 组网节点信号强度波动对定位精度产生影响，设计了基于相对场水平的算法，并对发射节点的数量对位置计算精度的影响进行了评估，优化了传感器的部署方式。

红外定位技术的主要原理是通过测量多个激光信号源往返消耗时间或入射角度来计算距目标点的位置，其精度能达到分米级。蔺璐^[22]等人基于红外线技术对多种定位方法及算法进行了对比研究，筛选出了适合井下定位的精确算法；但所进行的验证实验均为较为理想环境下的仿真实验，而实际的井下工作环境中的烟尘、灯光、设备辐射等干扰因素未进行模拟，因此实用性判断不够严谨，具有一定的局限性。可见光定位技术在 2011 年由 Giulio Cossu^[23] 等人引入，在 90 cm 距离的 90°照明角度条件下实现了对接收机的位置跟踪，验证了可见光定位的可行性。之后，可见光定位逐渐成为研究的热点，Se-Hoon Yang^[24]，Thomas Q. Wang^[25]，Muhammad Yasir^[26]等团队分别使用时分复用法、基于到达时间的距离估计法和基于信号强度的距离估算法对可见光定位技术进行了研究，实现了分米级的定位精度，可见光定位技术已趋于成熟。

超宽带定位技术利用纳秒级的短脉冲完成数据传输，对多路径效应应有较强的抗干扰能力，基于超宽带的定位技术可实现厘米级的定位精度。超宽带定位技术常用的算法有 Chan 算法^[27]、泰勒展开法、卡尔曼滤波法、Fang 算法等，其中，Li Hua 等人将 Chan 算法与泰勒展开法^[28]相结合，弥补了传统单一算法的不足，简化了接收机的结构。Li Xuchong^[29] 等人使用卡尔曼滤波算法对 Chan 算法进行了补充和优化，