



Indoor Localization

室内定位

理论、方法和应用

万 群 郭贤生 陈章鑫 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



电子科技大学无线定位研发组

室内定位理论、方法和应用

万 群 郭贤生 陈章鑫 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书较为系统地介绍了室内定位理论、方法及应用等内容,梳理了室内定位领域研究成果、理论研究和工程应用方面存在的挑战,给出了几种常见的定位实现方法。本书的主要内容包括:室内定位的发展概况,室内信道,参数化与非参数化室内定位方法,基于 ZigBee、麦克风阵列、电力线的室内定位方法,以及几种具有代表性的定位方案。

本书可作为高等院校电子、计算机、自动化等相关专业的高年级研究生和博士生的专业参考教材,也可以作为从事室内定位工作的工程技术人员和科研工作者的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

室内定位理论、方法和应用 / 万群, 郭贤生, 陈章鑫著. —北京: 电子工业出版社, 2012.9

ISBN 978-7-121-05878-3

I. ①室… II. ①万… ②郭… ③陈… III. ①无线电定位 IV. ①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 105974 号

策划编辑: 董亚峰

责任编辑: 谭丽莎

印 刷:

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 14.75 字数: 378 千字

印 次: 2012 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

前言

随着数据业务和多媒体业务的快速增加,人们对定位与导航的需求日益增大,尤其是在复杂的室内环境中,如机场大厅、展厅、仓库、超市、图书馆、地下停车场等,常常需要确定移动终端或其持有者、设施与物品在室内的位置。但与室外环境相比,室内环境受定位时间、定位精度及室内复杂环境等条件的限制,因此比较完善的定位技术目前还无法得到很好的利用。另外,由于复杂环境下的室内定位在地下救援、智能家居、大型展厅等具有重要的应用背景,所以对室内定位的研究可在一定程度上提高生活质量,保护生命财产安全。

目前,室内定位领域的研究吸引了越来越多的研究者的广泛关注,国内外的一些大型公司和科研院所也已经研发出一些先进的室内定位系统。例如,日本某公司就实现室内定位提出了不同的方法,即采用光照、红外线、无线网络、IMES 室内定位、RFID 射频识别与 QR 二维码识别位置,并且在对目前这些技术进行比较和分析之后,推出了工程样机,使得室内定位基本可以实现普通定位应用。又如,微软公司研发的 RADAR 系统、MIT 实验室研发的 Cricket 系统及美国 Auburn 大学研制的 ARIADNE 系统等都是室内定位系统的典型代表。唐恩公司是国内最早进行超宽带(Ultra Wide band, UWB)定位研究的公司之一,其开发的 iLocate 系统能够在传统的挑战性应用环境中达到较高的定位精度并具有很好的稳定性。成都无线龙通信科技也是较早进行室内定位的研究公司之一,其开发的 ZigBee 定位系统的性能也可以满足一般情况下的定位应用。其他的诸如宁波中科、台湾地区的采智等也都进行了室内定位的相关研究工作。

本书是作者在多年从事移动定位研究的基础上总结取得的研究成果,并结合当前国际、国内室内定位方面的最新进展撰写完成的。本书由 8 章构成,第 1 章简要介绍了室内定位的概况、发展及各种定位方法和定位系统;第 2 章介绍了蜂窝信道、天波信道等室外信道和室内信道,阐述了室内信道的特殊性;第 3 章介绍了常见的需要估计与位置有关的信号参数再进行定位的参数化定位方法,这些方法在室外定位中积累了大量的研究成果,在直达波传播情况下的定位效果较好,是定位理论的基础。第 4 章总结了几种常见的非参数化室内定位方法,这些方法可有效对抗室内环境下的非直达波传播,在一定程度上提高室内定位的精度。第 5 章、第 6 章及第 7 章分别介绍了几种典型的室内定位方案,这些方案代表了室内定位领域的现在和将来的发展方向,具有十分重要的研究意义。第 8 章介绍了室内定位领域的另外几种具有代表性的室内定位方案,如 UWB 定位及室内电力线定位,前者具有很高的定位精度,后者是室内定位的一个全新研究方向。这些典型的室内定位方案在现阶段具有十分重要的代表性,可作为室内定位的应用参考。

总之,本书在内容安排上特色鲜明,以室内定位问题为主线,以复杂环境下的目标定位问题为背景,从参数化定位到非参数化定位、直达波定位到非直达波定位、专用定位系统到寄生定位系统、室内定位理论到室内定位实现,系统全面地介绍了室内定位理论和关键技术,并给出了具有代表性的室内定位系统和典型应用示例。本书的另外一个特点是在反映本领域研究前沿的基础上,注重定位理论和实际实现相结合。

本书的部分研究工作得到了国家 863 高技术研究发展计划项目“室内多视时延轮廓定位

技术研究”(项目编号:2008AA12Z306)、教育部新世纪优秀人才支持项目“学习型定位理论和混合谱估计方法研究”(项目编号:NCET-05)、国家自然科学基金面上项目“高精度非直达波定位理论和算法研究”(项目编号:60372022),第51批中国博士后科研基金项目“基于空间谱群指纹的高精度室内定位方法研究”(项目编号:2012M510168),中央高校基本科研业务费(空间谱数据库高精度室内定位方法研究)(项目编号:ZYGX2010J018)及2012年江西省博士后科研基金项目的资助,在此表示诚挚的感谢。另外,本书的部分内容采用了作者所在研究组的研究成果,因此这里要特别感谢参与过本书研究工作的黄丹萍副教授、段林甫博士生、高宇飞博士生、李金洋、李亚楠、张胜蓝、郑娜、鲁文强、胡信华等研究生。

近年来,复杂环境下的基于位置服务的定位理论和算法等方面的研究进展十分迅速,特别是室内定位方面的研究不断取得新的进展。作者虽然力图在本书中展现室内定位领域的主要进展,但由于室内定位的理论、算法和实现等研究一直处在不断发展之中,再加上作者水平所限,难以全面、完整地对当前的研究前沿和热点问题进行一一探讨,所以书中难免存在疏漏与不当之处,敬请读者批评指正。

作者

2012年7月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 室内定位的特点	2
1.2 室内定位的发展	3
1.3 室内定位方法的分类	7
1.3.1 从室内信道的特征谈起	7
1.3.2 从参数化定位到非参数化定位	8
1.4 常见室内定位方法	14
1.4.1 红外线室内定位方法	14
1.4.2 超声波室内定位方法	15
1.4.3 蓝牙室内定位方法	16
1.4.4 RFID 室内定位技术	17
1.4.5 UWB 室内定位技术	18
1.4.6 WiFi 室内定位技术	20
1.4.7 ZigBee 室内定位技术	20
1.4.8 室内麦克风阵列定位技术	22
1.4.9 SLAM 室内定位技术	23
1.4.10 室内电力线定位技术	24
1.5 几种常见的定位机制	24
1.5.1 三角测量技术	25
1.5.2 RSSI 测量技术	27
1.6 室内定位的几种协议标准	28
1.6.1 红外通信协议	28
1.6.2 蓝牙通信协议	28
1.6.3 ZigBee 通信协议	29
1.6.4 UWB 通信协议	30
1.6.5 WiFi 通信协议	30
1.7 总结	32
第 2 章 室内环境和室内信道	33
2.1 常见的信道模型	33
2.1.1 经验模型	34
2.1.2 确定性模型	36
2.2 室内信道模型	37
2.2.1 S-V 模型	37
2.2.2 Δ -K 模型	38

2.2.3	两簇模型	38
2.2.4	IEEE 802.15.3a 标准模型	39
2.3	直达波和非直达波传播	41
2.4	直达波鉴别算法	41
2.4.1	Wylie 鉴别方法	41
2.4.2	假设检验判决方法	43
2.4.3	残差分析判决方法	46
2.5	非直达波剔除算法	47
2.5.1	Wylie 方法	47
2.5.2	残差加权算法	48
2.5.3	几何约束法	50
2.5.4	其他 NLOS 剔除算法	52
第 3 章	参数化室内定位方法	54
3.1	几种典型的定位方法介绍	54
3.1.1	TOA 估计法	54
3.1.2	TDOA 估计法	61
3.1.3	AOA 估计法 ^[184]	64
3.1.4	RSSI 估计法	67
3.1.5	混合定位算法	70
3.1.6	多维标度算法 (MDS)	75
3.2	影响参数化室内定位方法定位精度的因素	80
3.2.1	信号的自由空间衰减 ^[188]	80
3.2.2	信号的吸收效应 ^[188]	80
3.2.3	非视距 (NLOS) 传播	81
3.2.4	多径和阴影效应	81
3.3	参数化室内定位方法的定位误差分析	82
第 4 章	非参数化室内定位方法	86
4.1	非参数化室内定位概述	86
4.2	几种典型的非参数化室内定位技术	86
4.2.1	信号强度指纹定位技术	86
4.2.2	空间谱指纹定位技术	91
4.2.3	机器学习型自适应定位技术 ^[190]	93
4.2.4	图像指纹定位技术 ^[191]	97
4.2.5	RFID 标签定位技术	98
4.2.6	基于数据内插的定位技术	101
4.2.7	基于 Kernel 方法的定位技术	105
4.3	制约现有非参数化室内定位的定位精度的因素	108
4.3.1	失配问题	108
4.3.2	对信道状态信息的利用率很低	109

4.3.3 对指纹库的利用率低	109
4.4 非参数化室内定位的发展方向	110
4.4.1 在算法研究方面	110
4.4.2 在工程应用方面	111
4.5 总结	112
第 5 章 基于 ZigBee 的无线传感器网络室内定位	113
5.1 ZigBee 知识的介绍	113
5.1.1 概念	113
5.1.2 ZigBee 技术的硬件	114
5.1.3 ZigBee 技术的软件	118
5.1.4 ZigBee 技术的应用与发展	121
5.2 基于 ZigBee 的参数化室内定位方法	124
5.2.1 数学模型	124
5.2.2 算法介绍	124
5.2.3 ZigBee 室内定位网络	125
5.2.4 上位机软件实现	128
5.2.5 ZigBee 参数化室内定位的实现	129
5.3 基于 ZigBee 的非参数化室内定位方法	134
5.3.1 非参数化定位算法	134
5.3.2 非参数化定位的网络架构	135
5.3.3 测量多信道 RSSI 与距离的关系	137
5.3.4 非参数化室内定位实现	140
5.4 基于 ZigBee 技术的室内定位分析	154
5.4.1 参数化与非参数化定位结果分析	154
5.4.2 基于 ZigBee 技术的室内定位的各种改进	154
第 6 章 麦克风阵列室内定位方法	156
6.1 引言	156
6.1.1 麦克风阵列的应用	157
6.1.2 基于室内麦克风阵列的音频信号处理	158
6.2 麦克风阵列音频定位概述	160
6.2.1 室内音频信号的特点	160
6.2.2 麦克风阵列信号处理	160
6.2.3 基于麦克风阵列的室内声源定位方法的分类	163
6.3 基于信号到达角度 (DOA) 的定位方法	163
6.3.1 基于最大输出功率的可控波束形成技术	164
6.3.2 基于信号协方差的空间功率谱方法	170
6.3.3 波达角定位	171
6.4 基于时延估计 (TDE) 的定位方法	172
6.4.1 时延估计方法	173

6.4.2	时延估计定位	176
6.5	基于信号能量 (RSSI) 的定位方法	177
6.5.1	信号模型	177
6.5.2	最大似然估计定位方法	178
6.6	数据库匹配定位方法	179
6.7	小结	183
第 7 章	电力线室内定位系统	184
7.1	电力线定位概述	184
7.1.1	电力线室内定位研究的意义	184
7.1.2	电力线室内定位的国内外研究现状	185
7.2	电力线信号传输原理	185
7.2.1	电力线的复用技术	185
7.2.2	电力线复用传输信号的加工	186
7.2.3	低压电力线的信道特性 ^[282]	188
7.3	电力线室内定位技术	192
7.3.1	电力线室内定位技术的工作原理	192
7.3.2	定位算法	194
7.4	实验设计	196
7.4.1	信号发生模块的设计	196
7.4.2	标签的设计	196
7.4.3	软件的设计	197
7.5	实验结果	198
7.6	电力线室内定位与 GSM、WiFi 定位的比较	198
7.7	总结及展望	199
第 8 章	室内定位的典型应用	200
8.1	室内定位技术在地下停车场中的应用	200
8.1.1	定位系统介绍	201
8.1.2	需解决的关键问题	202
8.2	室内定位技术在展会等环境中的应用	203
8.2.1	系统介绍	203
8.2.2	系统特点	203
8.2.3	系统布置	204
8.3	室内定位技术在智能家居中的应用	205
8.3.1	典型的智能家居系统	205
8.3.2	典型的智能家居网络——WHANs	206
8.3.3	智能家居无线网络的设计要求	207
8.3.4	智能家居无线网络的各种标准特征	207
	参考文献	209

第1章 概述

近年来,随着物联网概念的兴起,工业、农业、商业、军事等领域的研究者越来越关注基于无线传感器网络(Wireless Sensing Networks, WSN^[1~5])和无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN^[6~11])等面向区域的定位技术。WSN的目标就是将分散且独立的传感器节点通过无线方式连接起来,组成一个分布式的无线传感器网络,它可以针对环境信息适时做出自我调整,以实现使用者与工具的互动。而WLAN的思想则是通过现有的接入点和无线网络提供目标的位置估计。环境信息中很重要的一点是空间位置信息,如果可以获得节点的当前位置,则许多实用的个性化功能就能实现,举例如下。

在大型仓储式超市中对商品进行分门别类,划分区域,并且给每个货架配置一个WSN节点,然后在每个购物车上安置一个收发器,使之成为移动节点,这样顾客在购物时就可以根据自己的需求与购物车的实时位置信息,快速地找到所需之物,超市也因此可以省去布置无处不在的导购指示等开销。由于WSN节点的特点之一就是硬件单元很廉价,故可以大量布置,这样整个购物流程趋于自动化,店员的工作量也会减少很多。

在医院或社区建筑物内布置WSN节点,并且给每一位病人随身携带一套生理指标监视器,该监视器通过无线网络将病人的生理指标参数实时传送给监控中心。一旦病人的某项指标出现异常,监控中心可以及时做出反应,赶往病人所在区域进行诊治。该解决方案在ICU病房护理中的优势特别明显。因此,基于WSN的病人无线监测网络可以在很大程度上提升救援速度、减少救援参与人数、减少医护成本等。

在博物馆的各个展台布置WSN节点,并且给游客配发一个小型收发器,再配合定向扬声器,这样博物馆的每个展区、每个展台就可以针对不同的游客广播不同的内容。由于不同游客的行走路线不同,所以每位游客观看的内容都是与众不同的——博物馆的智能导游系统可以根据游客已经参观过的展品来组织当前的解说,以使得前后介绍衔接自然。对于一个资料库丰富的博物馆来说,从软件上做到这一点并不复杂,而且游客也可以获得最佳的游览体验。

室内定位在智能家居中也具有十分广阔的发展前景和商业应用价值,目前广泛提出的无线家庭自动网络(Wireless Home Automation Networks, WHANs^[12])就是专门为智能家居提供的无线传感器网络的相关技术。目前,现有的基于IEEE 802.15.4相关协议标准的ZigBee、Z-Wave、INSTEON、Wavenis和基于IP的技术都为WHANs相关硬件标准和协议提供了充足的理论和技术支持。

在我国,智能家居的相关研究计划也已经受到国家和相关部门的日益重视。2010年10月,上海市委、市政府积极制定落实各项政策措施应对人口老龄化带来的诸多影响,同步提高了老年人的经济、医疗、服务保障水平。上海市在过去的几年中一直在积极探索构建老年人社区支持系统,构建为保障老年人基本生活所提供的服务支持体系。目前,上海已经成立了“上海市科技助老服务中心”,拟用新理念、新科技、新技术、新材料等途径实现

对老年群体的关爱。针对失智老人容易走失的状况,上海市正在虹口区进行失智老人佩戴GPS定位装置的试点。老人带上这一装置后,如果离家超过一定范围,该装置将主动给老人的照顾者发送短信提醒。除此之外,上海市还将通过红外线探测、GPS定位等多种高科技手段的组合,建立独居老人紧急援助系统。该系统可在老人出门后主动向子女或照顾者发送警示信息;当老人在家中独居时,安装在房间各处的红外线探测传感器倘若超过10个小时未曾检测到环境的改变,就会向老人的照顾者主动报警。这种新型的定位监测技术是智能家居的范畴,也是室内定位技术的典型应用之一。

从以上几个简单的例子可以看出,面向区域的定位技术是一个前景广阔的研究方向,而室内定位是其中的典型代表,因为它具有定位面积小、多径传播严重、定位环境易发生改变等特点。对于室外环境而言,目前已经有卫星定位(GPS、伽利略、北斗等系统)或移动基站定位。但对于室内环境而言,一方面卫星信号因无法穿透建筑物而失去作用,另一方面移动基站的定位精度太低,无法满足室内精度的要求,再加上室内环境存在多径效应及人员走动所带来的不可避免的干扰,使得室内定位的效果很难同时兼顾精度和稳健度,因此寻找一个适用于室内环境的定位系统,已经成为业界的研究重点。

1.1 室内定位的特点

与传统的卫星定位及蜂窝定位系统不同,室内定位的环境范围较小、直达波路径严重缺失、信道非平稳。室内定位技术在定位精度、稳健性、安全性、方向判断、标志识别及复杂度等方面有着自身的特点,现列举如下。

1. 定位精度

定位精度是一个定位系统的最重要的指标,尤其是对于相对狭小的室内环境而言。几年前的研究室内定位的文献中还没有要求较高的定位精度,如对于写字楼定位,只需精确到“房间”就可以满足指标了。近几年的研究工作开始追求更高的定位精度,如室内机器人定位就要求定位精度必须满足机器人在房间内自由运动的要求^[13]。更高精度的定位信息会带来更大的便利——若能普及廉价的高精度室内(或区域)定位技术,则现在的工业自动化生产的效率会大幅提高。

2. 稳健性

室内定位的困难之一是不容易保证定位方法的稳健性,这是由于室内环境的复杂性和多变性造成的。对于室内环境,目标位置的相对改变程度往往很大,这就要求定位技术具有很好的自适应性能,并且拥有很高的容错性,这样在室内环境并不理想的情况下,定位系统仍能提供位置信息。此外,系统稳健性的提高也可以减小维护的难度。

3. 安全性

所有的定位系统都必须注意安全性问题。对于室内定位而言,很大一部分应用需求都是针对个人用户的,而私人信息往往不愿被公开,这就使得室内定位系统在面向个人用户

时必须满足信息交换的安全性要求。该问题属于通信安全领域,在此不做深入讨论。

4. 方向判断

室内定位的方向判断问题与卫星导航的方向判断问题一样,都是要在判断出目标的方向后,进一步判断目标未来的运动趋势。该问题分为两种情况:运动时的方向判断和静止时的方向判断,其中在静止时判断目标未来运动趋势在现阶段还是一个难题。

5. 标志识别

室内环境往往具有一些“标志性”目标,如门牌、办公桌等,利用这些标志自身的特点,可以大大提高定位精度,因此,一个好的室内定位系统应该具有完善的标志识别功能。

6. 复杂度

室内定位的应用特点是规模小,应用对象是个人,因此,室内定位系统的复杂度应该较低(不能使用大量的硬件设施,最好能利用现有的硬件基础或稍加改动),并加入先进的算法来完成定位,只有这样才能将室内定位技术推向应用领域。此外,定位的实时性也要求定位算法不能太复杂。

1.2 室内定位的发展

室内定位技术无论在民用还是军事领域,都具有巨大的应用潜力。近年来国内外已出现了很多具有代表性的研究成果。

1. 室内定位在民用领域中的发展

1992年,AT&T剑桥实验室开发出了Active Badge定位系统^[14,15],此系统是基于红外线定位的方案。待定位目标上装有红外发射器,作为移动站(MS),它周期地发射唯一ID标识。同时,定位区域内布置有若干红外接收器,作为基站(BS)。BS通过线缆或无线方式连接到控制中心,当MS进入相应定位区域并且被该区域的接收器识别出时,控制中心就可以确定目标当前的位置。Active Badge定位系统的缺陷是:室内环境的复杂性会造成很多死角,致使接收器无法收到红外信号;此外,这种方案只能确定一个模糊的定位区域,精度无法满足要求。

1999年,AT&T剑桥实验室又开发出了Bat室内定位系统^[16],此系统是基于超声波定位的方案。待定位目标携带有超声波发生器(作为MS);布置在定位区域内的超声波接收器的节点作为BS。此外,该系统还有中心服务器。MS通过无线网络与中心服务器相连,中心服务器会定期发送启动信号,移动终端收到信号后会发射一簇超声波作为响应,接收器会先后收到中心服务器发出的射频信号和移动终端发射的超声波信号,比较两者的到达时间差,从而计算出与移动终端的距离,并把结果反馈给中心服务器,中心服务器只要接收到3个或3个以上的反馈距离值,就可以通过三角或三边算法,计算出移动终端当前的位置。Bat室内定位系统的缺陷是:超声波信号极易受到环境干扰,精度很不稳定;而且AT&T提出的

方案是采用有线网络方式来连接中心服务器与接收器节点,系统的应用范围很受限制。

2000年,微软研究院提出了RADAR定位系统^[17],此系统是基于RSSI测量的室内定位方案。它的硬件组成是基于802.11协议的WLAN。RADAR定位系统的定位工作主要分为两个阶段:离线建库阶段——实时定位前,在目标区域内广泛采集样本,生成射电地图(radio map),即表示位置信息与信号强度关系的映射表;在线定位阶段——实时定位过程中,移动终端收到无线接入点的信号,存储RSSI值,然后通过已有的射电地图相比较,找出匹配度最大的结果,完成定位,这个匹配过程也可交由一个中心服务器完成。RADAR定位系统的优势在于它的硬件平台非常成熟,无须再开发新的应用平台。其缺陷是:射电地图对环境的依赖性很大,再加上室内环境存在多变性,一旦环境改变度较大,则原射电地图很可能失效。

2000年,MIT开发出了Cricket^[18]室内定位系统,此系统是基于射频+超声波的TDOA定位系统。Cricket室内定位系统也由三部分组成:作为MS的Listener;作为BS的Beacon;服务器。Beacon是安放在已知位置的节点,并周期性地发送射频信号和超声波脉冲;Listener相当于移动终端,接收Beacon发来的射频信号和超声波信号,并记录下时间差,从而计算出与Beacon之间的距离;Listener将距离值传给服务器,由服务器根据三角或三边算法计算出Listener的当前定位。由于该系统基于TDOA定位方案,故可以提供厘米级的定位精度。Cricket室内定位系统的缺陷是:所有Beacon的坐标位置需要事先设定好,一旦环境改变或网络覆盖范围发生了变化,最终得到的定位结果也会存在误差。因为Cricket室内定位系统的高精度定位性能在很大程度上要依靠Beacon的精确放置,故往往需要事先人工测量节点位置以进行校对,这在实际使用时会带来极大的不便。

2003年,洛杉矶加州大学UCLA开发的AHLos定位系统^[19]可看做Cricket室内定位系统的改进。它基于超声波通信技术,且完全是分布式的,并采用原子式、协作式和重复式三种最大似然估计定位方法,将已定位移动节点作为锚节点对待,解决了定位网络中信标稀疏的问题。但AHLos定位系统采用的算法较为复杂,需要较强的数据处理能力,否则无法做到实时定位。

国内对室内定位的研究工作起步较晚,但近年来发展迅速,如很多高校和研究所都投入了大量精力和资源到该领域的研究中去。对室内定位领域的算法研究和室内定位相关硬件等的开发也受到了越来越多的重视。国内的清华大学^[20]、中国科学院^[21~24]、上海交通大学^[25~29]、电子科技大学^[30~34]、哈尔滨工业大学^[35~47]、北京邮电大学^[48~50]、天津大学^[51~53]、浙江大学^[54,55]、复旦大学^[56~63]、中山大学^[64]、南开大学^[65]、西安电子科技大学^[66]、华中科技大学^[67]、华南理工大学^[68~71]、大连理工大学^[72~74]、武汉理工大学^[75]、中国移动通信公司^[76]、某军事院校^[77~79]、国防科技大学^[80]、湘潭大学^[81]、中国联合通信有限公司等都提出了一些代表性的室内定位解决方案。

编者在国家自然科学基金项目“高精度非直达波定位理论和算法研究(项目编号:60372022)”的支持下,研究了严重非直达波传播环境下的室内定位算法,取得了较好的定位效果。为充分利用室内多径信道环境下的时延信息,编者提出了单、多视时延轮廓的高精度室内定位解决方案,以该思路进行主要研究的863项目“室内多视时延轮廓定位技术研究(项目

编号: 2008AA12Z306) ”已在 2008 年得到了资助。同时, 作为该项目的研究成果, 专利技术“一种基于信道频域幅度响应的多用户定位方法”、“一种采用单站多信道的室内定位方法”、“一种利用无线信号的幅度谱对非合作目标的定位方法”和“一种基于无线信道频域幅度响应的匹配定位方法”等十余项与室内定位技术相关的专利也在审批之中, 其中的部分专利已得到授权。

在定位系统的研发方面, 国内的唐恩科技有限公司利用 UWB 精确定位技术开发了 iLocateTM 系统^[82], 该系统采用的 UWB 精确定位技术可以应用在监狱、地下矿井等危险作业场所。该系统的精度可以达到 15cm, 其无缝链接功能可以有效扩大监控范围, 其高刷新率和良好的穿透性为系统的稳定性提供了良好的保障。该系统还可为博物馆、科技楼来访者提供访问路线和展品访问人流数据分析, 并为危险环境工作企业提供安全生产监控。

2. 室内定位在军事领域中的发展

在军事领域中, 室内定位技术近年来也得到了十分迅猛的发展。

1) 美国的 Boomerang 狙击手定位系统^[83]

2003 年秋季, 驻伊美军经常遭到当地狙击手的袭击。袭击者往往埋伏在距离美军车队路线 100m 左右的建筑物内, 当车队经过时突然发起袭击, 此时车内人员由于周围噪声及头盔隔音效果的影响, 不能够及时察觉并做出反应, 以至于造成大量人员伤亡。针对这种情况, 美国国防部先期研究计划局 (DARPA) 开始研究相对应的反制措施, 展开了名为 Boomerang (“飞去来器”) 的应急行动, 希望能够迅速部署 50 套新型狙击探测系统。BBN 公司用了 65 天时间, 顺利完成了 50 套 Boomerang I 狙击手定位系统的设计、试验和生产, 并于 2004 年 3 月开始装备驻科威特美海军陆战队的“悍马”车。该系统在固定式“子弹之耳”狙击手探测系统的基础上增加了一些新功能, 使其能够在高速运动的车辆上或嘈杂的环境下正常工作。

Boomerang I 型狙击手定位系统 (简称 I 型系统) 由声传感器阵列、信号处理单元和用户界面三部分组成。该系统的初始设计目标为: 在速度不超过 96km/h 的车辆上正常工作; 在城市的低矮建筑环境内, 能够有效探测 50~150m 范围内的射击; 在 1s 内能够迅速将射击方位锁定在 $\pm 15^\circ$ 的范围内, 距离误差为 1~30m, 误警率小于 0.1%; 能够适应沙漠作战环境。经过实战检验后, 发现 I 型系统有一些缺陷, 如无法精确测定来袭弹丸的仰角和距离、显示系统不够直观精确等。BBN 技术公司又在 I 型系统基础上设计了 Boomerang II 型狙击手定位系统 (简称 II 型系统)。与 I 型系统相比, II 型系统采用更紧凑的传感器阵列, 加强了传感器阵列及其他部件的密封性, 提高了抗恶劣环境的性能等方面的性能。II 型系统的实物和侧视图如图 1-1 所示。采用声探测技术的反狙击手系统还有美国 AAI 的 PDCue 射弹探测和定位系统, 通用动力公司研制的子弹探测指示系统, 加拿大迈克唐纳·底特维勒公司的“雪貂”系统, 阿连特技术系统公司的“安全”探测定位系统, 以及以色列拉斐尔公司研制的 SADS 反狙击手探测系统。

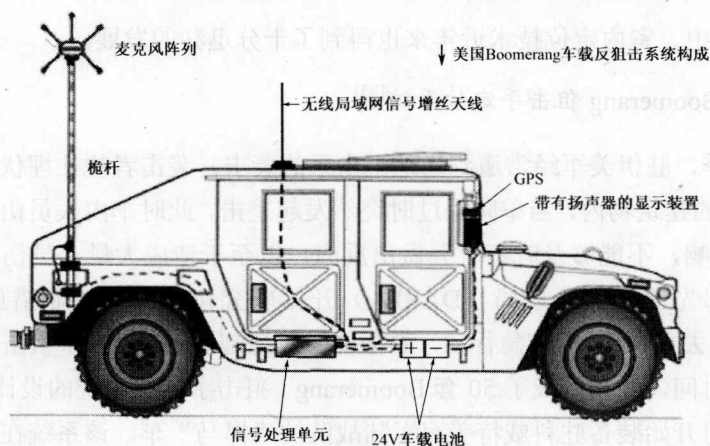


图 1-1 Boomerang II 型狙击手定位系统的实物和侧视图

2) 激光狙击手定位探测系统^[84, 85]

激光狙击手定位探测系统利用了“猫眼”效应。猫的视网膜比其身体其他部位的反射能力强，导致猫眼能在黑暗中发光。同样，当不可见光波段的激光束照射到狙击手的瞄准望远镜的表面时，由于瞄准望远镜的反射能力要强于周围背景，就会产生狙击手不易察觉而激光探测系统可以察觉的反光，从而发现狙击手。因此，激光狙击手定位探测系统是一种主动系统，可以在狙击手开枪之前找出他们的位置。美国、法国、以色列和加拿大等国家都先后开展了该项目的研究工作。

作为一种典型的激光探测系统，法国激光工业公司（CILAS）的狙击手定位探测系统（SLD-400）由 3 部分组成：光学传感器、转塔和遥控单元。工作时，激光发射装置发射出编码扫描激光束，每次扫描覆盖 $5^{\circ} \times 4^{\circ}$ 的区域；同时，激光接收装置随即获得激光图像和该区域的可见光图像。两种图像传送至遥控单元后，由探测系统自动比较两者的细微差别。若有异常，探测系统将在 0.1s 内启动警报，并在监视器上显示异常的位置和图像。操纵人

员可以通过控制手柄放大观察可疑区域,以进一步确认是否存在问题。该系统使用近红外激光,工作波长为 $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$,探测范围为水平 $-175^\circ \sim +175^\circ$ 、俯仰 $-20^\circ \sim +20^\circ$,探测距离白天为 1000m、夜间为 4000m (雾天除外)。该系统可以探测到隐蔽在伪装网后的狙击手步枪的瞄准镜,还能探测到夜视镜、测距仪、望远镜等其他光学部件。该系统在城市环境中的玻璃表面比较多,会产生干扰,但通常可以通过图像处理软件轻易滤除这些干扰。有一种情况比较麻烦,就是新闻记者相机的镜头比较接近瞄准镜,可能会造成误判,目前从技术上还无法有效解决这一问题。

SLD-400 系统在萨拉热窝于 1994 年年底得到首次应用,效果非常显著。据报道,在 1992 年前,由于未装备反狙击手系统,驻萨拉热窝的法国维和部队在很短时间内就有 80 多人死于装备精良的狙击手枪下。而装备该系统后,在随后几年内没有因为狙击手损失一名士兵。除了狙击手探测外,SLD-400 系统在战场上也可以用来对付敌军车辆,如通过探测敌军车载瞄准装置来记录车辆的运动情况。该系统也有助于特种作战部队的目标识别。

1.3 室内定位方法的分类

1.3.1 从室内信道的特征谈起

室内的信号传播环境是极端复杂的,即使是在固定的格点位置上,其接收信号强度由于环境变化等原因也是随着时间变化的。通常情况下,接收信号的信号强度信息 (RSSI) 既包含直达波的成分,也包含大量非直达波的成分。由于室内环境的丰富的多径散射,所以室内信道的脉冲响应函数可以看做目标所处位置和周围环境信息的函数。信号经过多径到达接收站时是复杂的叠加过程,叠加的结果既有可能使信号增强,也有可能使信号减弱,这和多径的相位有关。而且接收信号的强度不仅和室内的传播环境有关,还受到带限系统信号带宽的限制:当带宽增大时,时间分辨率也增加,可观测的多径就越明显。因此,室内定位的最大挑战来源于由丰富的反射、衍射、折射引起的多径效应,多径效应直接导致了接收信号场强的不稳定性和时变性^[86~88]。

如上所述,由于接收信号的 RSSI 值既包含直达波成分,也有很多非直达波成分的贡献,所以,单纯利用 RSSI 进行定位的方法精度往往不高,而信道脉冲响应函数则记录了复杂的室内环境信息,它可以看做目标所处位置信息的函数^[88]。可以说,如果能够获取有关信道状态 (Channel State Information, CSI) 的越多的信息,则定位结果就越精确。下面从信道的特征的角度分析现有室内定位方法。从分析结果来看,不论定位方法是基于接收信号 RSSI、基于信号到达时间 (TOA)、基于信号到达时间差 (TDOA),还是基于信号到达角度 (AOA) 等,都建立在信道的状态信息基础上^[8, 89]。

我们知道,多径信号之间的相关性是很低的^[90],因此,沿着任意一条多径的频偏所产生的脉冲畸变并不会导致脉冲形状的明显改变。一般假设任意一条路径的时延 τ_n 总是大于脉冲的宽度,则信道的脉冲响应函数 $h(t)$ 可表示为

$$h(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n \delta(t - \tau_n) = \sum_{n=1}^N h_n(t - \tau_n) \quad (1-1)$$