

Information &
Communication
信息与通信创新学术专著

Wireless Positioning Principles and Technologies

无线定位原理与技术

▶ 刘琪 冯毅 邱佳慧 / 编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

Information®
Communication
信息与通信创新学术专著

Wireless Positioning Principles and Technologies

无线定位原理与技术

▶ 刘琪 冯毅 邱佳慧 / 编著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

无线定位原理与技术 / 刘琪, 冯毅, 邱佳慧编著

— 北京: 人民邮电出版社, 2017. 7

(信息与通信创新学术专著)

ISBN 978-7-115-44324-3

I. ①无… II. ①刘… ②冯… ③邱… III. ①无线电定位 IV. ①TN95

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第147258号

内 容 提 要

本书聚焦无线定位的基本原理和关键技术。首先介绍了定位技术的起源, 并对定位技术进行了分类; 其次分析了影响定位的重要因素之一——无线传播环境; 然后介绍了无线定位的基本原理和算法, 并且分析了影响定位性能的主要因素; 接着分别系统地介绍了卫星定位、蜂窝网定位和无线局域网定位, 包括基本原理、定位方法、误差来源及应用, 并给出了蜂窝网定位的实例; 最后总结了无线定位技术在现网和 5G 中的应用, 并展望了未来无线定位的发展。

本书属于无线定位的基础教材, 适合从事无线定位理论与关键技术研究的专业人员阅读, 也可以供通信及计算机相关专业的研究生阅读。

◆ 编 著 刘 琪 冯 毅 邱佳慧

责任编辑 代晓丽

执行编辑 刘 琳

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

固安县铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 700×1000 1/16

印张: 12.5

2017 年 7 月第 1 版

字数: 245 千字

2017 年 7 月河北第 1 次印刷

定价: 88.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315



刘琪，清华大学博士后，现任中国联通网络技术研究院高级工程师、北京邮电大学兼职研究生导师、未来移动通信研究论坛5G工作组副组长。主要研究方向包括车联网、5G通信、异构网络融合、高精度定位等。

先后在国内外学术期刊发表高水平论文30余篇，出版专著2本，申请发明专利40余项。主持和参与了多项国家重点科研项目，多次获得省部级科技奖励。



冯毅，南京邮电大学工程硕士，长期从事移动通信网络规划、研发、设计等工作，现任中国联通网络技术研究院无线技术研究部主任，曾先后主持、参加了工业和信息化部和中国联通3G、4G、5G移动通信系

统关键技术和应用方向的多项研究课题，所主持、负责的项目成果获得国家级奖项11个、省部级奖项37个，目前主要负责中国联通的无线网络、物联网的技术路标、发展战略方面等研究工作。



邱佳慧，北京交通大学博士，现任中国联通网络技术研究院工程师。主要研究方向包括高精度定位、5G通信、车联网等。曾参与多项国家重点科研项目，发表国际国内论文12篇，申请发明专利10余项。

《无线定位原理与技术》顾问及编委名单

(按姓氏拼音排序)

顾问委员：张 涌，迟永生，刘华平，马红兵

编委成员：陈 祎，冯 毅，胡荣贻，刘 珊，

刘 琪，马 玥，邱佳慧，张文浩

序 言

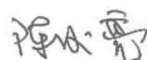
人类社会正在向信息化社会迅速发展，万物互联、信息交互已经成为必然的发展趋势，信息的获取、分析和利用是人类改造世界和推动社会发展的重要手段。位置信息作为人类生活的基本信息之一，越来越受到重视。定位，就是获取目标位置信息的过程。一方面，人类在不断探索如何获得更加精确的位置信息并加以利用；另一方面，在人类隐私不断被攻击破坏的时代，个人位置信息的保护同样受到关注。

定位应用的历史最早可以追溯到 20 世纪 70 年代。美国军方为实现对陆海空三大领域提供实时、全天候和全球性的定位导航服务，研制了 GPS，并在海湾战争中大规模使用。后续前美国总统克林顿又颁布法令，将 GPS 免费向民用领域开放。1966 年，美国联邦通信委员会提出的 E-911 紧急呼叫定位需求，使基于电信蜂窝网络的定位技术得到充分发展。随着科技的进步以及人类生产、生活水平的不断提高，基于室内定位的需求越来越强烈，包括机场导航、商场导购、仓储与物流等，未来还将会应用到虚拟现实、机器人和无人机等领域。考虑到 GPS 在室内应用的局限性以及目前蜂窝网的定位精度问题，基于局域网定位的技术应运而生，如 Wi-Fi 定位、蓝牙定位、超宽带定位和射频识别定位等。每一项技术都可以形成一套完整的定位系统，并根据其在网络部署、定位能力和运营成本等方面的特点应用于各个领域。多种技术融合来实现高效精准的定位将是未来定位行业的重要发展趋势。

本书介绍了当前主流无线定位技术，包括卫星定位、蜂窝网定位以及无线局域网定位，内容涵盖了室内定位的基本原理、定位系统、误差评估及实际应用案例。兼顾原理与应用是本书的一大特色，既有详细的定位理论推导，也有定位系统演示、实验结果及性能分析。本书体系完整、内容

详实、深入浅出，对未来无线定位的发展和应用具有重要的参考价值和指导意义。

中国科学院院士和中国工程院院士
北京邮电大学教授



2016年8月于北京

前 言

随着无线通信技术的飞跃发展，人们对智能化生活的需求也不断提升。基于位置的服务已经逐渐成为日常生活的必要组成部分，例如导航追踪、交通管理及旅游服务等。实际上，LBS 在室内场景下的应用更加广泛，比如商场或超市购物、仓库物品管理、游戏开发等。在未来 5G 的发展中，车联网、智能家居、工业 4.0、VR 等新兴技术与产业更加需要高精度定位技术的支持。

无线定位技术研究受到国内外标准组织、研究机构及产业界的广泛关注。国际标准组织 3GPP 长期致力于无线定位技术标准化，主要内容涉及无线定位方法、LBS 标准，并且详细规范了定位系统的网络架构、网络单元及工作流程等。美国 FCC 主要致力于无线网络紧急呼叫业务下的无线定位标准，对无线定位精度进行了量化规范。中国 2016 年国家重大研发计划将“导航与位置服务核心技术”方向作为重要支持项目之一，作者所在单位也承担了该项目的研究工作。国内外各大公司，包括谷歌、苹果、微软、百度和阿里巴巴等互联网公司，也都在室内外地图、定位系统部署和导航追踪等方面颇有建树。

发展至今，无线定位技术已经趋于成熟，全球已部署 4 套卫星定位系统，基于蜂窝网等地面广域覆盖网络的定位系统也已经开始应用。为满足室内 LBS 性能要求，近年来基于无线局域网、射频识别、超宽带和蓝牙等网络实现室内定位的技术也如雨后春笋般涌现，其定位精度达米级，甚至采用超宽带技术可达厘米级精度。然而，由于无线传播环境复杂、生活环境不断变化等因素影响，现有的定位服务尚不足以满足人们的高精度、多样化业务需求，还有待于依靠多种定位技术融合协作进一步提高定位性能。

本书聚焦无线定位的基本原理和关键技术。全书共分为 8 章，第 1 章主要介绍定位技术的起源、发展与分类；第 2 章分析影响定位的重要因素——无线传播环境；第 3 章介绍定位基本原理和算法，包括测量方法和定位算法；第 4~6 章分别系统介绍卫星定位、蜂窝网定位和无线局域网定位，包括基本原理、定位方法、误差来源及应用；第 7 章给出蜂窝网定位的实例——LTE 室内高精度定位，包括系统架构、实现原理及方法以及性能演示分析等，本章的定位系统是作者的自主

研发成果；第 8 章总结无线定位在现网和 5G 中的应用以及未来无线定位的发展。作者长期从事室内外定位技术研究工作，并且致力于定位系统的设备研发与网络部署等领域。

本书由刘琪担任主编，冯毅、邱佳慧、胡荣贻、张文浩、陈祎、马玥、刘珊等共同撰写完成。其中，刘琪、冯毅主要负责全书内容选材和审稿；邱佳慧负责第 1、6、7 章的编写和统稿；张文浩负责第 2、7 章的编写；胡荣贻负责第 3、5、7 章的编写；陈祎负责第 4、7 章的编写；马玥负责第 5 章的编写；刘珊负责第 8 章的编写。感谢北京邮电大学陈俊亮院士对本书出版的大力支持，并欣然作序。在本书撰写过程中，中国联通的迟永生、刘华平、马红兵、唐雄燕、范斌、胡云、王友祥、韩潇、王蕴实，北京交通大学的苏伟、陈佳等提供了支持和帮助，对此表示衷心感谢。同时，感谢深圳国人通信有限公司对本书出版的支持。各位同事的技术积累、专业精神与无私支持是完成本书的动力所在。

因作者水平有限，书中难免存在错漏与不足之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2016 年 9 月 27 日于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 定位技术的起源与发展	1
1.2 研究现状	3
1.2.1 标准化	3
1.2.2 产业界	5
1.3 无线定位技术分类	5
1.3.1 卫星定位	6
1.3.2 蜂窝网定位	7
1.3.3 无线局域网定位	8
1.3.4 其他定位技术	8
1.4 本书内容编排	10
参考文献	10
第 2 章 无线传播环境	12
2.1 无线传播基本方式	12
2.2 无线传播特性	13
2.2.1 传播的大尺度衰落	14
2.2.2 传播的小尺度衰落	17
2.3 无线传播模型	22
2.3.1 经验路径损耗模型	23
2.3.2 统计多径信道模型	28
2.4 本章小结	32
参考文献	33
第 3 章 无线定位基本原理及算法	34
3.1 无线定位测量	35
3.1.1 时间测量	35

3.1.2 角度测量	37
3.1.3 场强测量	37
3.2 几何建模法	38
3.2.1 解析几何法	38
3.2.2 最优估计法	42
3.3 概率分析法	48
3.3.1 最近邻法	48
3.3.2 图样匹配法	49
3.4 定位性能评估指标	50
3.5 本章小结	53
参考文献	53

第4章 卫星定位 54

4.1 卫星导航定位系统	54
4.1.1 GPS	54
4.1.2 北斗导航定位系统	56
4.1.3 GLONASS	60
4.1.4 Galileo	61
4.1.5 4种定位系统比较	62
4.2 卫星定位的原理及分类	63
4.2.1 卫星信号简介	63
4.2.2 卫星接收机结构	66
4.2.3 卫星定位原理	69
4.2.4 卫星定位分类	71
4.3 卫星定位误差来源分析	72
4.3.1 卫星系统误差	72
4.3.2 信号传播误差	74
4.3.3 接收机误差	75
4.3.4 误差修正方法	76
4.4 本章小结	77
参考文献	77

第5章 蜂窝网定位 79

5.1 蜂窝网技术概述	79
-------------	----

5.1.1 蜂窝网简介	79
5.1.2 蜂窝网定位	80
5.2 蜂窝网定位的基本原理	82
5.2.1 蜂窝网定位原理概述	82
5.2.2 蜂窝网定位系统架构	83
5.2.3 蜂窝网定位方法	86
5.3 蜂窝网定位技术	89
5.3.1 A-GNSS 定位技术	90
5.3.2 E-CID 定位	91
5.3.3 OTDOA 定位	95
5.3.4 UTDOA 定位	100
5.3.5 RFPM 定位	102
5.3.6 混合定位	103
5.3.7 5G 时代的定位	104
5.4 蜂窝网定位误差分析	106
5.5 本章小结	109
参考文献	109

第 6 章 无线局域网定位	111
6.1 Wi-Fi 定位技术	111
6.1.1 Wi-Fi 标准简介	111
6.1.2 Wi-Fi 定位技术	112
6.1.3 Wi-Fi 定位实例	114
6.2 蓝牙定位技术	115
6.2.1 蓝牙标准简介	115
6.2.2 蓝牙定位技术	116
6.2.3 蓝牙定位实例	117
6.3 RFID 定位技术	118
6.3.1 RFID 标准简介	118
6.3.2 RFID 定位技术	120
6.3.3 RFID 定位实例	121
6.4 UWB 定位技术	122
6.4.1 UWB 标准简介	122
6.4.2 UWB 定位技术	124

6.4.3	UWB 定位实例	125
6.5	ZigBee 定位技术	126
6.5.1	ZigBee 标准简介	126
6.5.2	ZigBee 定位技术	128
6.5.3	ZigBee 定位实例	129
6.6	局域网定位技术比较	130
6.7	本章小结	131
	参考文献	131
第 7 章	蜂窝网定位实例——LTE 室内高精度定位	133
7.1	室内定位的特点	133
7.2	LTE 网络简介	135
7.3	LTE 室内高精度定位系统架构	138
7.4	LTE 室内定位基本原理	139
7.4.1	SRS 信号相关性能分析	139
7.4.2	定位算法原理	141
7.5	LTE 的室内高精度定位系统	149
7.5.1	原型机设计	149
7.5.2	信号检测和处理	152
7.5.3	位置估计	155
7.5.4	接口设计	156
7.5.5	界面演示	159
7.6	定位系统性能验证	159
7.6.1	实验系统简介	160
7.6.2	系统参数	161
7.6.3	测试性能分析	161
7.7	本章小结	166
	参考文献	167
第 8 章	无线定位应用及发展	168
8.1	无线定位在现网中的应用	168
8.1.1	安全性管理	168
8.1.2	消费者服务	170
8.2	无线定位在 5G 中的应用	172

8.3 无线定位的发展及展望.....	175
8.4 本章小结.....	178
参考文献.....	178
中英对照表.....	180
名词索引.....	185

第 1 章

绪论

1.1 定位技术的起源与发展

定位，就是确定地球表面某个物体在某一参考坐标系中的位置^[1]。

定位技术的大规模发展源于全球定位系统（Global Positioning System, GPS）技术的产生和普及。GPS 是 20 世纪 70 年代由美国陆海空三军联合研制的新一代空间卫星导航定位系统。截至 1994 年 3 月 10 日，预定的 24 颗卫星全部发射完毕，全球覆盖率高达 98%。2000 年美国取消了对 GPS 卫星民用信道的干扰信号，民用 GPS 的定位精度达到平均 6.2 m 的实用化水平，从而掀起 GPS 产业和应用热潮^[2]。

基于无线网络的定位技术起源于 20 世纪 90 年代中期美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）提出的 E-911（Emergency Call 911，紧急呼叫“911”）服务条款^[3]，要求无线网络能够提供符合要求的、可靠的、准确的定位信息^[4]。E-911 服务条款的提出使基于无线通信网络的移动终端定位技术得到了快速发展，其应用范围也不断延伸到人们生活的方方面面。

随着智能化生活需求的不断提升，用户的业务需求需要无线终端提供多样化的服务。其中，基于位置的服务（Location Based Service, LBS）就是无线终端通过卫星通信技术、无线蜂窝通信技术、无线局域网（Wireless Local Area Networks, WLAN）等通信网络获取位置信息并为用户提供基于位置信息的个性化服务。

室外场景下的 LBS 应用包括导航追踪、交通管理及旅游服务等。在室外场景下，常用的无线定位技术包括 GPS^[5]、辅助 GPS（Assisted GPS, A-GPS）^[6]，以及基于无线蜂窝网络的定位，如小区 ID（Cell ID, CID）技术^[7]、增强型小区 ID（Enhance Cell ID, E-CID）技术^[8]。LBS 在室内场景下的应用更加广泛，比如商场或超市购物、仓库物品管理、游戏开发等。为满足室内 LBS 定位性能要求，近年来国内外学者及科研机构研究利用 WLAN^[9]、射频识别（Radio Frequency

Identification, RFID)^[10]、超宽带(Ultra Wide Band, UWB)^[11]、蓝牙^[12](Bluetooth)等无线网络来实现室内移动终端的定位技术,其定位精度可达米级,而采用UWB技术甚至可达厘米级精度^[11]。图 1-1 给出了基于各种无线网络的定位技术的性能对比^[13,14]。LBS 市场的拓展与无线定位技术的发展是相互关联、相互促进的,无线定位技术性能的提高有利于 LBS 服务质量的提高,而 LBS 市场应用的拓展进一步加大了无线定位技术研究面的广度与研究点的深度。

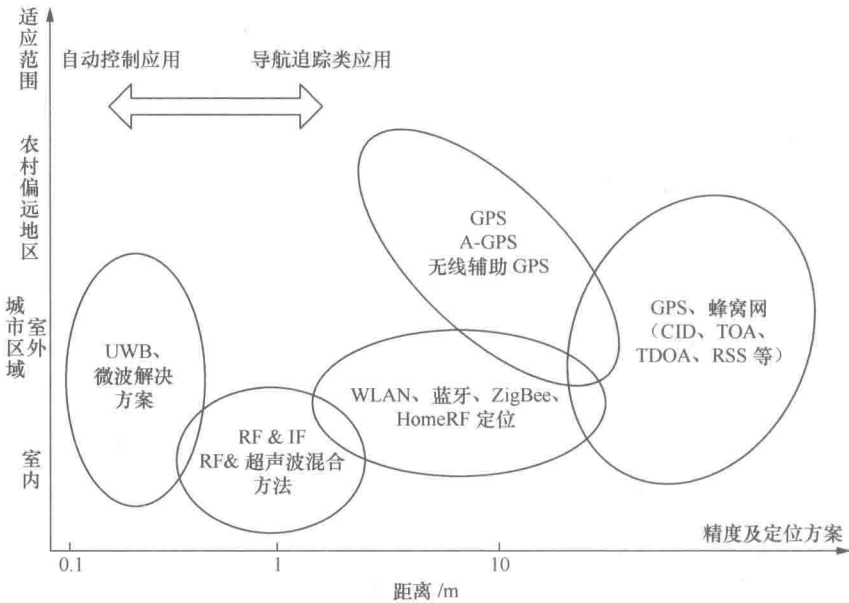


图 1-1 定位系统性能比较

无线定位系统主要由 4 部分组成,包括信号接收、参数估计、位置计算和定位显示与应用,如图 1-2 所示。

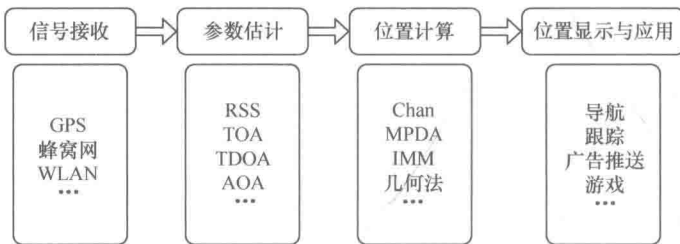


图 1-2 无线定位系统组成

(1) 无线接收信号

无线定位技术能够利用的无线信号包括移动蜂窝通信网络(2G/3G/LTE/LTE-A)、GPS、WLAN 等,可为不同应用场景下的不同用户提供不同业务类型的无线通信服务。

(2) 参数估计

收发机之间距离信息需要通过估计两者无线信道链路的参数信息来获取, 该参数包括接收信号强度 (Received Signal Strength, RSS)、到达时间 (Time Of Arrival, TOA)、到达时间差 (Time Difference Of Arrival, TDOA)、到达角 (Angle Of Arrival, AOA) 等。上述参数是进行下一步位置估计的前提。实际接收的无线信号受非视距传输及多径效应、阴影效应的影响, 因此, 即使精确估计信道参数信息, 也难以获取准确的收发机之间的直线距离。

(3) 位置计算

定位算法是整个定位系统性能的关键性影响因素, 一方面要求定位算法有较好的精准度; 另一方面又要求定位系统有较低的复杂度和时延。精准度与复杂度之间的平衡, 是定位系统开发考虑的重要因素。常见的优化算法包括 Chan 算法、MPDA 算法、IMM 算法等。

(4) 位置信息显示与应用

定位技术的实现可以在终端界面直观地以地图信息的方式显示估计的位置结果; 同时, 定位技术需要与其他应用相结合, 在终端软/硬件的支持下完成数据处理, 为用户提供数字化的 LBS 服务。

1.2 研究现状

随着市场的需求不断增大, 定位技术的发展也越来越迅速, 以求满足人们在不同场景下的定位要求。下面将从标准化和产业发展两个方面, 简要介绍目前定位技术的发展现状。

1.2.1 标准化

主要的定位标准化组织及其职能描述如下。

(1) 美国联邦通信委员会

美国联邦通信委员会^[15]主要致力于无线网络提供紧急呼叫业务下的无线定位标准, 对无线定位精度进行了量化规范。在早期颁布的 E-911 条令中, 要求基于无线网络的定位技术提供 100 m 精度的概率达到 67%, 300 m 精度的概率达到 90%; 而基于手持终端的定位技术 (如 GPS 技术) 提供 50 m 精度的概率为 67%, 150 m 精度的概率为 90%。2006 年, 美国联邦通信委员会提出了 NG911 (Next Generation 911, 下一代 911) 服务以进一步提高定位精度, 特别是环境恶劣的地区, 如城区、山区、森林等。同时支持空白 (Void) 业务, 以自动识别呼叫者的位置信息。