

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

通信高精度定位理论与技术丛书

蜂窝网信息融合定位 理论与方法

王建辉 巴斌 逯志宇◎等著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

通信高精度定位理论与技术丛书

蜂窝网信息融合定位 理论与方法

王建辉 巴斌 逯志宇 孔范增 崔维嘉◎著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书汇集了作者近年来在蜂窝网信息融合定位领域的研究成果, 主要内容包括无线定位理论基础、蜂窝网定位参数测量算法、NLOS 误差鉴别与抑制算法、蜂窝网信息融合定位理论与方法、基于数据域融合的直接定位方法、基于路径追踪的决策层信息融合定位方法等。重点研究了基于测量参数、地理信息、传播路径和原始数据域信息的蜂窝网融合定位方法, 构建了蜂窝网信息融合定位模型, 同时给出了算法仿真与分析。

本书适合于高等院校通信、导航专业高年级本科生和研究生学习参考, 也可供致力于移动通信与无线定位研究的高校教师、研究所或公司研究人员参考使用。

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

蜂窝网信息融合定位理论与方法/王建辉等著. —北京: 电子工业出版社, 2019.5
(通信高精度定位理论与技术丛书)

ISBN 978-7-121-36312-2

I. ①蜂… II. ①王… III. ①码分多址—移动通信—通信网—定位系统—研究
IV. ①TN929.533

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 068269 号

策划编辑: 张楠

责任编辑: 夏平飞

印刷: 天津嘉恒印务有限公司

装订: 天津嘉恒印务有限公司

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: 720×1000 1/16 印张: 20.25 字数: 406 千字 彩插: 16

版次: 2019 年 5 月第 1 版

印次: 2019 年 5 月第 1 次印刷

定价: 128.00 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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: (010) 88254579。

丛书编委会

丛书主编：廖桂生

丛书副主编：吴启晖 张钦宇

丛书编委：沈 渊 张小飞 万 群 刘聪锋

郭福成 王 鼎 王建辉 尹洁昕

丛书序

无线信号定位技术已广泛应用于通信、雷达、目标监测、导航遥测、地震勘测、射电天文、紧急救助、安全管理等领域，其在工业生产和国防事业中都发挥着重要作用。鉴于该领域涉及的理论与技术十分丰富，知识覆盖面广，且新理论与新方法不断涌现，因此需要一套精品丛书来系统阐述其中的知识体系，以便适应该领域的发展需求。在此背景下，本丛书编委会发起《通信高精度定位理论与技术丛书》编写计划，并集聚国内该领域的优秀作者，力求真实、科学、系统地反映无线定位技术的知识体系、先进理论方法和工程应用等，从而打造出一套精品专著系列丛书。

本丛书定位为系列专著，其内容兼具系统性、基础性和前沿性，其中很多内容是作者多年研究成果的提炼与升华。本丛书的读者群包括从事通信与信息系统、信号与信息处理、雷达信号处理、控制科学与工程、应用数学等专业领域的研究人员、学者及工程技术人员。

我相信本丛书的出版必然会积极促进该领域的进一步发展，并在实际工程应用中发挥重要作用。

廖桂生

2018年11月

前 言

随着定位技术的不断发展,蜂窝网定位技术在定位领域备受关注。近年来,已有很多学者致力于蜂窝网定位技术的研究,并且在定位的精度、实时性和稳定性方面取得了显著成效。然而,蜂窝网定位技术仍面临着几个关键的问题:在复杂多变的定位环境中,如何改善定位参数的估计精度,如何进一步提升定位结果的精度,如何提高定位系统的可靠性等。针对这些亟待解决的问题,本书作者对蜂窝网信息融合定位技术进行了深入研究。

多源信息融合能够扩展时间和空间的观测范围,增强数据的可信度和系统的分辨能力,提高系统的可靠性和信息处理能力。因此,相关领域的研究学者对多源信息融合技术进行了深入的理论研究和广泛的实际应用,并取得了一系列的研究成果。本书作者将多源信息融合技术与蜂窝网定位技术相结合,给出了蜂窝网信息融合定位理论,并详细阐述了该理论的设计过程。通过大量的算法仿真和性能分析,使读者能够清晰地理解信息融合理论在蜂窝网定位中的应用。

本书分为上篇和下篇,共 10 章。

上篇主要介绍了蜂窝网信息融合定位的理论知识。通过蜂窝网定位技术和信息融合技术概况的阐述,将读者引导到蜂窝网信息融合定位领域,使其对蜂窝网信息融合定位有一个初步的认识。后续的内容则分别从定位参数估计,NLOS 误差的鉴别和抑制,数据层与决策层融合定位等方面展开论述;详细阐述了单径和多径的最大似然时延估计问题,时延和到达角联合估计算法,两种新的 NLOS 误差抑制算法(基于数据斜度归零准则的迭代算法,基于 Kalman 滤波器和神经网络的 NLOS 误差抑制算法),蜂窝网信息融合定位系统的设计,以及决策层融合方法等内容,为下篇的讲解做理论铺垫。

下篇主要研究了几种新的蜂窝网信息融合定位方法。详细阐述了直接定位方法的基本原理,并在此基础上,给出了基于角度和多普勒信息的多站直接定位方法,基于时延和多普勒信息的多站直接定位方法,基于反射体信息辅助的

多径点源直接定位算法等多种直接定位方法。引入了位置指向性路径和区域指向性路径以及偏射角的概念，有效地减少了信号传播模型和实际环境之间的差异性；构建了基于虚拟定位站的路径追踪定位算法框架，给出了基于聚类分析的反向路径追踪算法和基于路径追踪的决策层信息融合定位算法。针对本篇给出的定位算法，进行了详细的算法仿真和分析，便于读者能够更深入地认识蜂窝网信息融合定位技术。

本书是作者课题组在该领域研究与实践的成果，主要取材于各阶段的研究、论证以及相关论文内容等，由王建辉、巴斌、逯志宇、孔范增、崔维嘉撰写完成。我们尽自己的最大努力试图给出蜂窝网信息融合定位理论的最新成果，然而信息融合定位是一个发展迅速的领域，新的理论和技术层出不穷，本书无法对这些发展和成果做出全方位的介绍和讨论。鉴于作者水平有限，书中难免存在错误和疏漏，殷切希望广大读者批评指正。

作者

2018年12月

目 录

上 篇

第 1 章 绪论	3
1.1 蜂窝网定位技术概述	3
1.1.1 无线定位技术的概念	3
1.1.2 蜂窝网定位技术的应用领域	4
1.1.3 蜂窝网定位技术的发展	5
1.1.4 蜂窝网定位系统的分类	7
1.2 信息融合技术概述	9
1.2.1 信息融合技术基础	9
1.2.2 信息融合的体系结构和分类	10
1.2.3 信息融合技术的研究现状	11
1.2.4 多源信息融合的优势	12
1.2.5 多源信息融合存在的主要问题	13
1.3 蜂窝网信息融合定位技术的可行性分析	15
1.3.1 基于信息融合的定位技术研究现状	15
1.3.2 蜂窝网信息融合定位技术的可行性和意义	15
参考文献	17
第 2 章 无线定位理论基础	18
2.1 无线定位常用方法	18
2.1.1 场强定位方法	18
2.1.2 基于到达时间测量的定位方法	19
2.1.3 基于到达时间差测量的定位方法	20
2.1.4 基于信号到达角的定位方法	21

2.1.5 基于指纹匹配的定位方法	22
2.2 传统的定位参数测量方法	23
2.2.1 时延估计	23
2.2.2 角度估计	24
2.2.3 时延和到达角联合估计	27
2.3 NLOS 误差鉴别与抑制方法	28
2.4 传统的移动台位置解算算法	30
2.4.1 非迭代定位算法	31
2.4.2 迭代定位算法	36
2.5 定位性能指标	40
参考文献	42
第 3 章 蜂窝网定位中的时延估计算法	47
3.1 超分辨时延估计算法	47
3.1.1 OFDM 信号时延估计模型	47
3.1.2 子空间类时延估计算法	49
3.1.3 最大似然时延估计算法	53
3.2 基于蒙特卡罗直接抽样的最大似然时延估计算法	58
3.2.1 信号模型	59
3.2.2 算法原理	60
3.2.3 克拉美罗下界	62
3.2.4 算法仿真与分析	63
3.3 基于重要性抽样的最大似然时延估计算法	66
3.3.1 信号模型	66
3.3.2 算法原理	67
3.3.3 克拉美罗下界	71
3.3.4 算法仿真与分析	72
3.4 本章小结	76
参考文献	76
第 4 章 蜂窝网定位中的时延和到达角联合估计算法	78
4.1 基于求根 MUSIC 的时延和到达角联合估计	78
4.1.1 时延和到达角联合估计模型	79
4.1.2 算法原理	80

4.1.3	算法仿真与分析	83
4.2	基于 Hadamard 积扩展子空间的时延和到达角联合估计	90
4.2.1	算法原理	91
4.2.2	克拉美罗下界	93
4.2.3	算法仿真与分析	96
4.3	本章小结	100
	参考文献	100
第 5 章	蜂窝网定位系统的 NLOS 误差抑制算法	102
5.1	蜂窝网定位系统的误差分析	102
5.2	典型的定位误差鉴别与抑制算法分析	103
5.2.1	NLOS 误差鉴别算法	103
5.2.2	NLOS 误差抑制算法	105
5.3	基于信号斜度归零准则的 NLOS 误差抑制算法	107
5.3.1	NLOS 误差的信道模型	108
5.3.2	基于信号斜度归零准则的 NLOS 误差鉴别算法	108
5.3.3	基于数据斜度归零准则的 NLOS 误差抑制算法	110
5.3.4	算法仿真与分析	111
5.4	基于偏差 Kalman 滤波器和神经网络的 NLOS 误差抑制算法	114
5.4.1	偏差 Kalman 滤波器	114
5.4.2	Kalman 滤波器对 TOA 进行无偏估计的算法推导	115
5.4.3	基于 BP 神经网络的 NLOS 误差环境模型系数估计	116
5.4.4	算法总体流程	118
5.4.5	算法仿真与分析	118
5.5	本章小结	122
	参考文献	122
第 6 章	蜂窝移动通信系统信息融合定位理论	124
6.1	引言	124
6.2	信息融合定位系统的总体设计方案	125
6.3	基于信息融合的蜂窝网定位系统结构	127
6.3.1	信息融合定位系统的功能结构	127
6.3.2	信息融合定位系统的层次结构	128
6.3.3	信息融合定位系统的整体框架	129

6.4	基于多源测量参数信息的数据层融合定位算法	130
6.4.1	经典无线位置估计算法	130
6.4.2	基于多目标优化理论的多源测量参数信息融合定位	132
6.5	多目标优化信息融合定位的求解方法	134
6.5.1	多目标优化理论的最优解	134
6.5.2	多目标优化问题的经典求解方法	135
6.5.3	基于遗传算法的多目标进化算法	137
6.6	基于多目标优化的数据层信息融合定位方法	138
6.7	基于分布式结构的改进遗传算法	141
6.7.1	改进遗传算法的必要性	141
6.7.2	常见的变异改进型遗传算法	142
6.7.3	分布式遗传算法原理	143
6.7.4	分布式遗传算法设计	144
6.8	基于分布式遗传算法的测量参数数据层定位算法	145
6.8.1	目标种群设计	145
6.8.2	子种群设计	146
6.8.3	分布式遗传算法的整体流程	148
6.8.4	算法仿真与分析	148
6.9	本章小结	153
	参考文献	154
第7章	移动台位置融合决策与系统性能评估优化	155
7.1	信息融合定位系统的决策层融合结构	155
7.1.1	决策层融合的概念和常用方法	155
7.1.2	信息融合定位系统的决策层融合结构	156
7.2	基于贝叶斯规则的决策层融合算法	159
7.2.1	贝叶斯决策层融合算法	159
7.2.2	贝叶斯决策层融合的序贯递推	160
7.2.3	贝叶斯决策层融合的性能分析	161
7.3	基于闭环反馈结构的改进粒子滤波决策层融合定位	162
7.3.1	基本的粒子滤波算法	162
7.3.2	闭环反馈型的改进粒子滤波器	165
7.3.3	基于 IUKF 算法的粒子重采样	167
7.4	算法仿真与分析	175

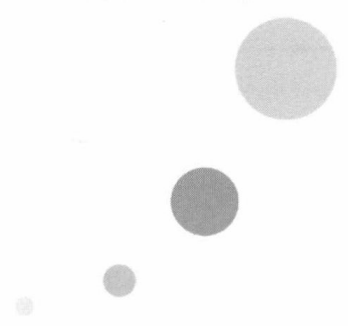
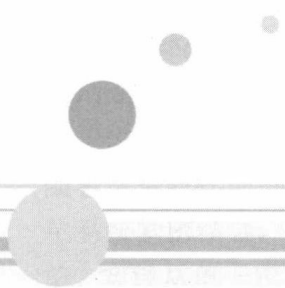
7.5	信息融合定位系统的性能评估	178
7.5.1	信息融合定位系统性能评估的作用	178
7.5.2	信息融合定位系统的测试评估原理	179
7.6	信息融合定位系统的控制优化	181
7.6.1	控制优化的整体策略	181
7.6.2	基于信息反馈的控制优化结构	182
7.6.3	基于专家系统辅助的性能优化方法	183
7.7	本章小结	188
	参考文献	188

下 篇

第 8 章	基于数据域融合的直接定位方法	191
8.1	直接定位方法基本原理	191
8.1.1	直接定位技术概述	191
8.1.2	直接定位信号模型	192
8.1.3	直接定位解算方法	193
8.2	基于角度和多普勒信息的多站直接定位方法	194
8.2.1	基于角度和多普勒信息的信号接收模型	195
8.2.2	基于最大似然准则的直接定位算法	196
8.2.3	克拉美罗下界推导	199
8.2.4	算法仿真与分析	201
8.3	基于时延和多普勒信息的多站直接定位方法	206
8.3.1	基于时延和多普勒信息的信号接收模型	207
8.3.2	基于分段信号相关累加的移动台直接定位算法	208
8.3.3	克拉美罗下界推导	212
8.3.4	算法仿真与分析	214
8.4	本章小结	218
	参考文献	218
第 9 章	融合多径信息的直接定位方法	220
9.1	基于反射体信息辅助的多径点源直接定位算法	220
9.1.1	基于角度和时延信息的多径信号接收模型	220
9.1.2	算法基本原理	222
9.1.3	克拉美罗下界推导	228

9.1.4	算法仿真与分析	232
9.2	基于旋转不变性的多径分布源直接定位算法	236
9.2.1	相干分布源信号接收模型	236
9.2.2	算法基本原理	239
9.2.3	计算量分析	241
9.2.4	算法仿真与分析	242
9.3	基于迭代优化的低复杂度直接定位方法	247
9.3.1	基于子空间正交性的直接定位滤波模型	247
9.3.2	修正容积卡尔曼滤波算法原理	249
9.3.3	计算量分析	252
9.3.4	算法仿真与分析	252
9.4	本章小结	256
	参考文献	256
第 10 章	基于路径追踪溯源的蜂窝网定位方法	258
10.1	基于路径追踪溯源的蜂窝网定位理论基础	258
10.1.1	经典蜂窝网信道模型	258
10.1.2	地理信息系统 (GIS)	262
10.1.3	路径追踪对于无线定位技术的意义	264
10.2	基于路径追踪溯源的蜂窝网定位原理	265
10.2.1	位置指向性路径与区域指向性路径	266
10.2.2	基于虚拟定位站的路径追踪定位算法框架	269
10.3	无线信号传播环境模型的建立	271
10.3.1	无线信号传播环境模型	271
10.3.2	基于 GIS 环境模型的建立	273
10.4	基于聚类分析的反向路径追踪算法	276
10.4.1	位置指向性路径的反向追踪算法	277
10.4.2	区域指向性路径的反向追踪算法	281
10.4.3	算法仿真与分析	283
10.5	路径追踪定位算法的 CRLB 与 GDOP	290
10.5.1	镜像定位站位置估计	291
10.5.2	克拉美罗下界推导	297
10.5.3	几何精度因子 (GDOP)	304
10.5.4	算法仿真与分析	318

10.6 基于路径追踪的决策层信息融合定位算法	325
10.6.1 移动台位置粗估计过程	325
10.6.2 异常检测过程	326
10.6.3 加权融合过程	328
10.6.4 算法总体流程	331
10.6.5 算法仿真与分析	332
10.7 本章小结	338
参考文献	339



上 篇

第 1 章

绪 论

空间位置是人类在社会活动中必不可少的重要元素。随着人类社会的不断发展,活动范围的不断扩大,空间位置的作用也越发凸显,引起了人们的广泛关注,位置信息逐渐成为现代人生活中最重要且最有价值的信息资源之一。随着信息时代的到来,通信与定位技术在相互交融中迅速发展,通信系统与定位系统紧密结合,使个人用户的定位信息产生更大的应用价值,发挥更多的效能,实现从单一定位向监控、管理、交通、救助、娱乐等综合位置服务的转变。位置服务作为战略新兴产业已广泛进入人们的生活,正在成为国防安全、经济建设、社会生活中不可或缺的部分。

1.1 蜂窝网定位技术概述

1.1.1 无线定位技术的概念

定位通常是指确定地球表面某个物体在某一坐标系中位置的过程。无线定位则是利用无线信号的电参量获取定位参量,并采用适当的定位算法计算出目标的位置。由于无线定位利用的是无线电波,相比传统定位受气候条件影响较小,因此在实际生产生活当中得到了广泛应用。无线定位既是保障人类交通安全和从事军事活动的必要手段,也是复杂气候条件下一种有效的导航方法。无线定位不仅应用在现代社会生活中,在信息化战争中也发挥着越来越大的作用。

蜂窝网定位技术是无线定位技术的一种,其依托蜂窝移动通信系统实现对目标的无线定位。由于蜂窝移动通信系统覆盖的广泛性,移动终端获得了迅猛普及,催生出一系列基于蜂窝网络的位置信息服务应用,如公共安全服务、紧急报警服务、基于目标位置的计费、车辆和交通管理、导航、城市观光、网络规划与设计、网络 QoS (Quality of Service, 服务质量) 和无线资源管理的改