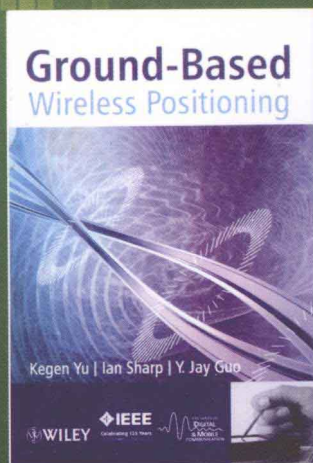


国外电子与通信教材系列



地面无线定位技术

Ground-Based Wireless Positioning



[澳] Kegen Yu 著
Ian Sharp
Y. Jay Guo

崔逊学 汪涛 译

国外电子与通信教材系列

地面无线定位技术

Ground-Based Wireless Positioning

Kegen Yu

[澳] Ian Sharp 著

Y. Jay Guo

崔逊学 汪涛 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入 21 世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入 WTO 后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在 2000 年至 2001 年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了 40 余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

- | | | |
|-----|----------------------------|---|
| 主任 | 吴佑寿 | 中国工程院院士、清华大学教授 |
| 副主任 | 林金桐 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师 |
| | 杨千里 | 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长
中国通信学会常务理事、博士生导师 |
| 委员 | 林孝康 | 清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系主任 |
| | 樊昌信 | 西安电子科技大学教授、博士生导师
中国通信学会理事、IEEE 会士 |
| | 程时昕 | 东南大学教授、博士生导师 |
| | 郁道银 | 天津大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北京交通大学教授、博士生导师
计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长
国务院学位委员会学科评议组成员 |
| | 张晓林 | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员
中国电子学会常务理事 |
| | 郑宝玉 | 南京邮电大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 朱世华 | 西安交通大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员 |
| | 彭启琮 | 电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员 |
| | 毛军发 | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 赵尔沅 | 北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任 |
| | 钟允若 | 原邮电科学研究院副院长、总工程师 |
| | 刘 彩 | 中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工
信息产业部通信科技委副主任 |
| | 杜振民 | 电子工业出版社原副社长 |
| | 王志功 | 东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长
教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员 |
| | 张中兆 | 哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院长 |
| 范平志 | 西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长 | |

译者序

在国际上的位置服务领域,本书是最新介绍无线定位技术的教学与参考书籍之一。位置服务是计算机科学与技术领域的研究热点,具有非常重要的应用背景。目前定位问题已经开展了诸多研究。在古代,水手在航海时根据星辰来定位。如今人们使用多种手段来实现室内、室外的目标定位。本书从定位理论和应用技术角度,全面和深入地介绍了定位方法等系列问题。本书提供了当前位置计算研究的主要成果,因此我们决定将本书从英文版翻译成中文出版,希望本书中文版的发行能吸引我国更多的科研人员从事相关的理论研究和系统研制,推动我国在位置服务领域取得具有自主知识产权的创新研究成果。

无线定位技术是通过测量无线电波的参数,根据特定的算法来判断被测物体的位置。它包括红外、超声波、蓝牙、射频识别、超宽带、Wi-Fi、ZigBee 等,最初是为了满足远航导航等需要。无线定位分辨率能精确到 0.25 m,在手机用户定位、矿井人员定位、灾难现场人员搜救、集装箱运输跟踪、车辆导航等方面具有广泛应用。在无线传感器网络中,定位信息除了用于报告探测事件发生的地点,还可用于目标跟踪、协助路由和网络拓扑管理等。欧洲电信标准化协会 ETSI 对 GSM 系统的无线定位制订了一系列标准,目前移动定位服务产业已成为最具潜力的移动增值业务之一。学术研究人员通常在现有无线设备和定位系统的限定条件下,努力实现取得最优的和最有效的定位方法。

无线定位技术在工业界已有成熟应用,例如思科无线定位设备、德国 Nanotron 的高精度实时定位测距模块、TI 公司的带硬件定位引擎的 CC2431 芯片、赫立讯 ZigBee 无线定位系统、成都无线龙通讯公司的 ZigBee 无线网络定位开发系统、威德电子公司的无线实时定位系统等。

本书是国际上第一本全面深入介绍不涉及 GPS 的无线定位技术专著。尽管目前已有一些关于定位和跟踪的书籍面世,但主要是介绍 GPS,专门阐述不涉及 GPS 的定位技术书籍尚不多见。该书由地面无线定位技术的国际著名学者撰写,内容主要是地面无线定位与跟踪技术的原理、设计和工程实现。随着位置服务需求的快速增长,对无线定位精度的要求迫使人们不断寻求新的定位技术,本书主要涉及前沿热门的技术,内容包括无线传播理论、信号探测方法、到达时间测量技术、跟踪算法的性能测评、定位系统的基础理论、常见的定位方法、定位精度、传感器网络定位技术、非视距传播技术等。

本书的特点在于内容上既有理论性又有工程实践,不仅阐述无线定位的计算基础理论,而且讲解定位系统的工程实现细节。本书的重点是介绍中短程定位系统,尤其是室内性能计划达到 1~2 m 的精度。这类系统的应用在不久的将来具有极大的应用市场,因而本书内容可作为其中的关键技术。书中还综述了无线定位与跟踪方法的研究现状,如基于锚点和无锚点的无线传感器网络定位问题。作者讨论了现实世界目标定位的一些实质性问题,如多径、非视距传播、精度极限和测量误差。

本书对计算机科学与技术、电子工程、自动化和测控专业的广大教师、研究生和科研工程人员都具有很高的参考价值,也可供涉及位置服务技术的机构和企业研发、销售和管理人员参考。本书主要针对以下阅读群体:①计算机、通信与测控等专业本科生学习定位技术的入门辅导书;

②普通高校的硕士生、博士生研究不涉及 GPS 无线定位技术的必备书籍;③工程技术开发和管理人员作为手头上的参考书。

无线定位系统在研究、开发和推广应用的每个阶段都将面临空前的机遇和挑战。本书给本领域的高年级本科生和研究生提供了系统而深入的理论讲解,也向工程师和其他相关领域的专家提供了解决问题的方法。如果作为研究生课程的教材,可以选择其中最基础性的内容给学生讲解,对最新研究成果内容的介绍则可以留给学生在今后的科研工作中领会和借鉴。

全书由崔逊学和汪涛共同翻译,全书的译文由崔逊学负责统一术语、格式、一致性检查和统稿。在翻译的过程中,对发现的原著中错误进行了相应更正,对原著叙述不畅的地方进行了适当补充和润色。

感谢原书作者 Kegen Yu 博士对翻译该中文版的大力支持和帮助,并修正了部分术语的翻译。感谢电子工业出版社积极引进本书,以及 John Wiley & Sons 出版公司帮助,使得本书中文版能够尽快与读者见面。本书译者的工作得到了国家自然科学基金项目(No. 61170252)的支持和资助,在此表示谢意!

在本书的翻译过程中,我们尽量力求忠实、准确地把握原著,同时保留原著的写作风格。尽管无线定位技术特别是目标定位技术,是译者从事研究的一个主要内容,但由于水平有限,译文中难免存在一些错误和不当之处,敬请广大读者批评指正。有关意见和建议请发送到 xxcui@tsinghua.org.cn,我们将视具体情况予以采纳和更正。

希望这本译著有助于推动我国在位置服务和定位技术方面的深入研究和广泛应用。在本书翻译完毕之际,我们深深感到定位技术及其原理是如此重要,也深深体会到本书的技术内容介绍非常到位!另外,译者也从事定位技术方面的研究工作,欢迎读者与我们共同探讨与交流相关技术和理论问题。

译者

2012年3月

作者简介

Kegen Yu 博士 1983 年在中国吉林大学获得学士学位,1999 年在澳大利亚国立大学获得硕士学位,2003 年在澳大利亚悉尼大学获得博士学位,1983 年至 1997 年期间先后以助理工程师和讲师身份在中国南昌大学工作,2003 年至 2005 年期间以博士后身份进入芬兰奥卢大学,从事无线定位和通信理论研究,2005 年 11 月开始以研究科学家身份在澳大利亚联邦科学与工业研究组织 ICT 中心任职,从事自组织无线定位系统、无线传感器网络和重配置无线电技术的研究。出版专著 3 部,发表期刊和会议论文 40 多篇。

Ian Sharp 无线定位系统的资深顾问,30 多年无线电系统的工程经历,早期从事航空飞行定位技术,20 世纪 80 年代重点从事内扫描微波着陆系统研制。20 世纪 80 年代末至 90 年代初,负责 Quiktrak 隐蔽车辆跟踪系统的研发,目前该系统已应用于世界各地。20 世纪 90 年代中期至 2007 年,在澳大利亚联邦科学与工业研究组织主要从事无线电系统研究实验,是该组织的体育场精确定位应用系统的发明人和架构设计师,该系统已在澳大利亚和美国试验成功。拥有与定位技术相关的多项专利。

Y. Jay Guo 教授 2005 年开始担任澳大利亚联邦科学与工业研究组织无线技术实验室主任兼宽带专项负责人,之前在欧洲无线工业组织担任高级职务,负责 3G 移动通信系统的技术研发。在天线、信号处理和无线网络方面具有 20 多年的工业和学术经历。出版 3 部技术专著,在顶级研究期刊和国际会议发表 100 多篇科技论文,拥有 12 项无线技术方面的专利。担任澳大利亚麦考瑞大学兼职教授、IET Fellow、中国科学院客座教授。

致 谢

感谢澳大利亚联邦科学与工业研究组织 ICT 中心的同事们多年来在无线定位领域的贡献!1995 年至 2009 年期间我们研制的各种无线定位系统和无线传播测量设备,是本书成文的基础。特别感谢 Alija Kajan 在澳大利亚和美国所做的计算机编程、传输测量和系统测试工作,Alex Grancea、John Olip 和 Robert Shaw 在无线设备方面所做的设计和制作工作,Jayasri Joseph 和 Joseph Pathikugara 在数字硬件方面所做的设计和制作工作。我们还要衷心感谢 Mark Hedley 博士、David Humphrey 博士和 Phil Ho 博士所做的多次令人愉快、鼓励性的技术交流和学术讨论!

前 言

随着 20 世纪 90 年代全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 的问世,民用位置服务一直稳步增长。由于 GPS 芯片成本的下降,它已可以实现与移动/蜂窝电话相集成,进一步驱动了消费市场的快速增长。GPS 最先起源于全球范围的军事应用,随着世界人口城市化的增长趋势,主要的位置服务增长领域可能是在城市。另外,由于城市居民的大多数时间是在室内度过的,这时 GPS 不能有效发挥作用,显然定位系统的未来发展趋势可能是在建筑物内提供优良的性能。本书重点介绍中短程定位系统,尤其是室内性能计划达到 1~2 m 的精度。尽管在当前采用廉价的这类系统硬件设备并不可行,但在不久的将来,如果大规模地与模拟无线电及数字信号处理芯片相集成,则性能有望满足需求。中短程定位系统的应用涉及建筑物内的人员跟踪、货物管理、安全应用和无线传感器网络的定位问题。

室内定位系统的本质有些不同于室外系统,如 GPS。GPS 领域的研究重点在于接收器的性能,因为卫星设备由美国国防部负责提供。反过来,室内定位系统必须涉所有方面,包括时间和频率同步、硬件的内部延迟效应和网络节点之间的通信。这些问题都具有高度的挑战性,为了达到 1~2 m 的定位精度,通常需要非常精确的纳秒级的时间度量。

由于室内应用的特点,定位系统可能采用自组织网络,而不是传统远程定位系统的“固定”基站和移动节点。尽管基于传统的双曲线定位原理的位置计算可能仍然比较重要,但我们可以发觉其他定位技术的广泛应用情况,如信号强度、到达角、混合无线电-超声,甚至位置计算仅依靠对网络内邻居节点的探测。由于位置服务和应用的多样性,本书覆盖了当前分散在这一技术领域的各种关键定位技术和处理算法,不局限于具体定位系统。本书介绍的这些技术和算法对于系统设计人员、研究人员和研究生应该具有重要价值。

本书主要分为两部分。第一部分讲解定位性能的背景问题,如室内无线传播和信号处理;第二部分分析各种位置计算算法及其位置精度的性能。

第 1 章介绍室内定位问题,综述各种可能的技术和未来系统的特征。第 2~5 章介绍影响室内定位系统的重要方面。第 2 章综述了室内无线传播的特点,特别是额外传播消耗和延迟这两个重要问题。设计人员根据这些内容可以估计出一个系统可能的工作范围和精度。第 3 章综述了信号处理特别是扩频信号相关内容。扩频调制的焦点是希望获得精确的位置计算,反过来又需要较宽的带宽频谱。远距离的室内覆盖范围要求传输机的功率比较高,但由于工业、科学和医疗频段所能达到的最大带宽限制,因而可以将传输信号进行扩频。第 4 章分析了存在高斯噪声和多径效应情况下的到达时间精度问题。第 5 章讲解室内跟踪系统,概略分析了后续章节将详尽描述的一些重要问题。

本书第二部分包括第 6~14 章,重点介绍位置计算算法的细节。第 6 章和第 7 章详细描述了基于传统基站结构和距离测量或到达时间估计的位置计算方法。第 8 章和第 9 章对前两章中位置计算的精度进行统计分析。第 10 章介绍多径干扰抑制技术,这种技术在室内环境特别重要。第 11~13 章着重介绍可适用于自组织网络的方法和低精度的位置计算,譬如无线传感器网络就是这类适用对象。第 14 章介绍接收信号属于视距或非视距的各种辨识技术,因为判定出路径类型对于提高位置精度是非常有益的。

目 录

第 1 章 导论	1
1.1 无线定位概述	2
1.2 中短程无线定位技术	4
1.3 本书内容	8
参考文献	11
第 2 章 无线信号传播	12
2.1 统计多径理论	12
2.2 各种距离规模的无线传播特征	22
2.3 测量结果	30
2.4 无线传播的额外延迟	34
2.5 天线的影响	39
参考文献	42
第 3 章 相关信号检测	43
3.1 发射器信号	43
3.2 接收器信号处理	45
参考文献	58
第 4 章 带限到达时间测量	59
4.1 宽带多径定理	60
4.2 带限相关图的特点	61
4.3 带限相关图的模型	63
4.4 峰值跟踪算法的性能	65
4.5 前沿投影算法	72
4.6 前沿比率算法	77
4.7 多径相位	83
4.8 跟踪算法的性能总结	84
参考文献	86
第 5 章 定位系统的基本原理	88
5.1 导航系统和跟踪系统	88
5.2 系统体系结构	90
5.3 定位方法综述	101
5.4 室内性能问题	106
参考文献	111

第 6 章 非迭代定位方法	112
6.1 基本定位方法	112
6.2 线性化最小二乘法	120
6.3 球形插值法	122
6.4 拟最小二乘法	125
6.5 线性修正最小二乘法	129
参考文献	132
第 7 章 迭代定位	133
7.1 迭代算法	133
7.2 基于滤波的方法	141
7.3 数据平滑	147
参考文献	151
第 8 章 定位精度评估	153
8.1 精度度量	153
8.2 视距条件下的 Cramer-Rao 下界	154
8.3 非视距条件下的 Cramer-Rao 下界推导	160
8.4 线性最小二乘法的近似方差	162
8.5 精度比较	166
附录 8. A 费歇尔信息矩阵的结构	170
参考文献	171
第 9 章 几何精度因子分析	173
9.1 几何误差分析	173
9.2 统计误差分析	175
9.3 几何精度因子的计算	177
9.4 精度概率	178
9.5 具体案例:几何精度因子的解析方案	181
9.6 几何精度因子性能	190
参考文献	193
第 10 章 多径抑制	194
10.1 残差-加权法	194
10.2 滤波法	195
10.3 约束最优化法	197
10.4 散射体法	207
10.5 误差统计分布	210
10.6 传播模型法	214
10.7 模式匹配法	215
10.8 性能分析	218

附录 10. A 连续二次规划法	221
附录 10. B 方程系数	222
参考文献	223
第 11 章 基于锚点的无线传感器网络定位	225
11.1 无线传感器网络的特征	225
11.2 粗略定位方法	226
11.3 综合定位方法	229
11.4 未知内部延迟和时钟偏置的定位	232
参考文献	249
第 12 章 提高锚点的定位精度	250
12.1 锚点位置精度对传感器节点定位的影响	250
12.2 视距和非视距传播模型	252
12.3 锚点定位的边界	254
12.4 基于距离和角度估计的精度改进	257
12.5 基于距离估计的精度改进	261
附录 12. A 视距条件下的矩阵和向量定义	263
附录 12. B 非视距条件下的矩阵和向量定义	265
参考文献	266
第 13 章 无锚点定位	267
13.1 稳健四边形	267
13.2 多维标度法	268
13.3 质点-弹簧模型	271
13.4 杂合方法	272
13.5 图模型	274
13.6 分簇与缝合	274
13.7 构建基准坐标系统	276
13.8 克拉姆-拉奥下界	277
13.9 位置估计的精度	279
13.10 基于距离偏差的精度度量	282
13.11 精度评估	283
参考文献	286
第 14 章 非视距辨识	288
14.1 数据平滑	288
14.2 分布检验	289
14.3 计算电平通过率和衰落延迟	293
14.4 评估莱斯因子	295
14.5 广义似然比检验	295

14.6	非参数方法	296
14.7	利用中间位置估计	298
14.8	Neyman-Pearson 检验	299
14.9	基于到达时间与接收信号强度的联合方法	302
14.10	基于到达角的方法	306
附录 14. A	定理及推论的证明	314
附录 14. B	检测概率的推导	315
	参考文献	316
附录 A	双曲线导航	318
A.1	双曲线的解析方程	318
A.2	求解双曲线导航	320
A.3	求解示例问题	321
附录 B	无线传播测量技术	324
B.1	使用网络分析仪的测量	324
B.2	时域测量	326
	索引词	330

第 1 章 导 论

从马可尼首次演示横贯大陆的无线电通信系统到现在,已过去了 100 多年,其间无线技术对现代生活变得日益重要了。本书重点介绍正在涌现的一门无线应用技术,即短程和中程定位技术,特别是室内定位技术。无线通信技术的发展历史表明,早期的应用通常是商业和军事用途,一旦这项技术进入日常生活,就会出现非常迅猛的发展势头。

中短程室内定位技术尚处于发展初期,有趣的是通过回顾 20 世纪采用的无线技术,人们可以大致看出其潜在的发展趋势。早期的无线通信技术主要用在简单报文通信领域,后来模拟调制技术可以用来传输声音和视频。在日常生活中,“无线”(wireless)一词最初用来表示模拟调幅无线电,采用“无线”这一术语是为了区别于采用电话的有线话音通信。随着时代的发展,术语“无线”的这种含义在文献中不再流行,取而代之的是更通用的术语“无线电”(radio),而“无线”再次演变成描述短程无线电系统的流行术语。

第二次世界大战将无线电技术的发展扩展到新的领域,诸如雷达和无线电定位,但没有应用到消费产品。移动电话技术的发展起源于 20 世纪 40 年代末,这项技术的起步比其他消费产品(如电话机、汽车、无线电广播设备和电视)要缓慢得多^[1]。最初蜂窝电话技术的发展对这种状态影响很小。实际上,直到 1987 年美国其他消费品的增长才出现了停滞,随着数字蜂窝电话的问世,无线通信产品的消费人数出现了爆炸趋势^[1]。移动/蜂窝电话技术经历了约 50 年的时间,才达到其目前发展的颠峰期,要远远长于其他消费类电子产品。

无线定位技术的发展可以追溯到 20 世纪 30 年代末雷达的发明,以及第二次世界大战期间飞行导航辅助设备的研制。早期系统包括仪表着陆系统(Instrument Landing System, ILS)和 LORAN 广域导航^[2]。这类定位系统仅限于飞行器和较短距离范围的航运领域。尽管 20 世纪 40 年代出现了双曲线无线定位理论^[2],但当时定位技术的研究进展不大,直到 20 世纪 80 年代末美国国防部全球定位系统(Global Positioning System, GPS)的问世,才使情况有所好转。虽然 GPS 是基于卫星基站而不是陆地台站,但其基本原理与 LORAN 系统是相同的,本书实际上就描述了其中的主要内容。

最初 GPS 计划主要供军方使用,不久人们就实现了全球定位的多种用途,在 20 世纪 90 年代民事方面研制出了从勘测到车内导航的系列应用。低成本 GPS 芯片增强了实用性,使得蜂窝/移动电话技术与 GPS 技术可以结合在一起,目前 GPS 正呈现爆炸式的增长。未来的发展趋势是在移动设备中集成位置数据库、因特网、数字无线通信和无线定位功能。或许今天的无线定位技术状况可以用英国数学和物理学家奥利弗·海维赛德爵士在 1891 年所说的话来总结:“三年前到处都没有电磁波,过了没有多久电磁波就无处不在了”^①。

GPS 和其他类似技术(如欧洲伽利略系统)都是主要用于室外定位,很多有潜力的应用是室内方面,包括安全呼救、卫生保健、紧急救援服务和货物管理^[3]。这些室内应用需要的是一个跟踪系统,而不是一个导航系统,因而需要远距离地获取目标的位置信息。另外,室内无线

① 亨利希·鲁道夫·赫兹的网站:chem. ch. huji. ac. il/history/hertz. htm。

传播环境比室外情形要复杂得多,在范围较大区域实现室内精确且廉价的定位系统,目前还不具备商业可行性。这种中短程定位系统具备非常强大的无线功能和数字信号处理芯片,以及更加精密复杂的定位算法,正孕育着大规模的商业应用。

实现中短程无线定位的核心难点是无线传播的复杂性,特别是在室内环境的无线传播。有趣的是从历史来看,最早的无线电波试验是19世纪80年代末亨利希·赫兹所做的室内试验,所用频率竟然接近现代的室内无线定位技术^[4,5]。赫兹完成了著名的无线传输综合研究,包括传播速度、极化、反射、衍射和路径间的相互干扰。赫兹的试验采用了长度为26 cm的调谐偶极天线,并带有一个用于特别增益的抛物线反射器。根据当时试验设备的具体资料,人们推断出试验中无线通信所用的频率大约为500 MHz^①。人们根据瞬间放电激励和天线的本位谐振特征,通过采用类似的接收天线和观察到的微小放电火花,判断出赫兹在他的实验室内获得了视距(Line-Of-Sight, LOS)内测距达20 m的实验结果。

赫兹的早先观察结果在今天仍然是有效的。特别是赫兹观察到无线电波以光速进行传播,即每毫微秒30 cm,且被物体表面尤其是金属所反射,可以穿透其他材料(如墙壁)。室内环境受多径传播的影响,路径长度可能要长于定位所假设的直视路径。深入理解这些传播效应,是设计定位系统的关键。

本书介绍了无线传播和信号处理的内容,重点是定位方面的理论和算法,以及地面(即非GPS)的无线定位和跟踪系统设计。特别是本书涵盖了其他书籍没有讨论过的本领域一些关键主题,如多径环境下的到达时间差测量、定位性能分析和精度极限、无线传感器网络的定位技术、非视距无线传播的辨识、非视距抑制技术和设计无线定位系统的实际问题。

1.1 无线定位概述

广义上无线定位可以定义为根据无线电波的特性来确定无线电设备的地理位置。多年来人们提出了各种无线定位方法,包括飞行时间(Time-Of-Flight, TOF)、信号相位、信号强度和到达角度。传统上定位系统的结构是基于“固定”节点和“移动”节点的理念,必须预先提供它们的位置。采用卫星的全球定位系统也可以看做属于这一类,在任何时候尽管卫星相对地球是运动的,但它的位置是精确已知的。中短程定位的正确发展方向是通过与定位功能相结合,来提升现有的无线局域网(Wireless Local-Area Network, WLAN)的性能。许多其他的技术方案也是可行的,未来似乎最有可能的发展方向是将定位功能融合到小型、廉价的节点,使之构成自组织网络。这种网络不是集中组织的,通过无线方式与邻居节点进行传输,可以完成数据通信和定位计算功能。

研制中短程定位系统的主要困难在于室内无线传播的特性和精确定位的需求。由于室内环境的范围小,大多数应用需要1~2 m甚至更高的精度。反过来,像通常的GPS定位精度大约只有10 m。室内无线传播通常是非视距的,在发射器与接收器之间存在信号的多种散射。相对于无线定位所假设的直线路径来说,这种多径传播会引起额外的信号强度损耗和额外的传输时间。理论上我们可以选择高功耗和宽带系统作为室内多径效应的解决方案,由于可获得的频谱和发射器功率的可调整范围具有限制,必须设计更复杂的其他方案。

^① 众所周知,现在赫兹(简写为Hz)是频率的标准术语,表示“每秒钟的周期数”。

无线定位的原理可以是采用无线电波的多种特性,多数精确定位系统是利用了测量飞行时间,或者采用另一个非常类似的概念即到达时间(Time-Of-Arrival, TOA)。理论上,如果已知传输任务的起始时间和接收时间,则根据飞行时间可以估计出发射节点与接收节点之间的距离。假设在直线传播情况下,通过三个或更多的节点实施两次或更多次的测量,则根据简单的几何知识可以计算出二维或三维位置。由于无线电波的传播速度大约为 0.3 m/ns ,假定室内定位系统的精度确定为上述提到的 $1 \sim 2 \text{ m}$,则时间测量必须控制在 1 ns 数量级。特别是当采用小型、廉价的无线设备时,时间测量的精度非常具有挑战性。

根据飞行时间进行位置计算的原理并不复杂,但存在实现上的问题,使得这种方法在大多数场合并不实用。首先,飞行时间方法需要所有节点时钟同步,这对于移动节点尤其困难,在固定节点也需要设计专门的方案。其次,从发射器到接收器所用的时间包括了无线设备的延迟。另外,固定节点可以通过校准过程来确定这些时延值,但移动节点难以做到这一点。

大多数定位系统包括 GPS 是采用到达时间数据来实施定位,不需要移动节点的时间同步。此时接收器有效地测量出伪距值,该值是估计的真实距离加上一个未知的距离偏移量。这种原理也适用于其他的定位方法。例如,如果测量出两个节点之间的往返时间(Round-Trip Time, RTT),且这两个节点是一个固定、一个移动,则移动节点发射器和接收器的无线时延应该看作是一个未知参数。由于这些延迟是概略已知的,延迟要求的亚毫秒级精度意味着即使是设备延迟非常小的变化也不能容忍。实际上短程系统的设备延迟代表了极大多数测量的往返延迟,像温度波动引起的效应会造成小至千分之几的变化量,这也是不能容忍的。如果采用接收信号级别进行距离估计,则传输功耗的不确定性也对伪距测量产生影响。这种情况下,当发射器靠近一个目标时(如地面或人体),导致的不确定性主要是由于天线效应造成的。

上述现象是定位系统采用伪距测量而不是距离测量的共同现象,在若干个固定节点进行伪距测量的定位技术最令人感兴趣。二维情形下位置计算的简单几何解释如下。如果两个固定节点的两个伪距测量值相减,则消除共同偏移量,这些点位置处的不同到达时间(Differential TOA, DTOA)量构成一条双曲线。类似地,另一对固定节点的不同到达时间值也构成另一条双曲线,移动节点的位置就是这些双曲线的交点。由于这种原因,基于伪距测量的定位系统有时称做“双曲线定位”系统。附录 A 分析了双曲线交叉点的定位原理,并总结了双曲线的重要特征。但这种方法仅具有参考价值,因为实际系统通常采用更精密复杂的方法,本书后续章节将给予介绍。

传统的定位系统是基于固定的和移动的节点,中短程系统的一些新型设计技术与自组织网络有关,这种网络的所有节点本质上是相同的。这类系统的节点互相交换携带了数据和定时数据的无线消息。如果一个节点能够与足够多的邻居节点进行通信,实现信息共享,则可以确定出所有节点的相对位置。另外,如果部分这类节点通过一些独立的勘测过程获得绝对的位置数据,则可以采用绝对坐标形式确定出所有节点的位置。

一些简单网络,如无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN),或许仅能获得非常粗略的位置信息,此时可采用简单的定位策略。例如,最简单的方法是根据邻居节点的位置信息来估计坐标,即定义为邻居节点的质心位置。这里已知的邻居节点位置可以来自具有精确位置信息的“锚”节点,或者来自以前已被定位的其他节点。即使最简单的无线接收器也存在信号强度的数据,这些数据可以用来估计距离,能获得更精确的位置。更复杂的自组织网络的固定接收节点可以采用类似双曲线的方法,借助到达时间的数据,可以形成更精确的位置计算结果。

上述无线定位的简略介绍仅涉及定位系统的少数问题和方法。由于无线定位具有广泛的应用和需求,没有一种方法是最好的,本书希望尽量覆盖大多数技术。1.3节中列出的提纲可以作为本书的阅读指南。在概述本书的各章内容之前,有必要回顾一下应用的各类中短程无线定位技术,展望其未来发展趋势。

1.2 中短程无线定位技术

本书的大多数理论和方法主要用于无线定位系统,重点是地面短程(即小于100 m)和中程(即100~2000 m)的系统,尤其适合室内定位问题。在这种距离定义下,目前已有多种无线通信系统可以解决数据传输问题,这些系统也可以用于定位。中短程定位问题还没有一项技术能适合所有的应用场合,我们有必要回顾一下各项技术的优缺点。从技术性能的角度来看,有两项值得关注的主要特征,即定位精度和无线链接的距离。对实际实现来说,其他因素也很重要,如移动设备的代价和体积、固定设备(如基站)的相应成本、基础设施布设和安装的花费。

目前没有一项技术全部具备所有期望的功能,而远程精确系统可能需要精密复杂且昂贵的硬件。随着时间的推移,模拟无线和数字信号处理部分的集成电路功能正在提高,它们的成本却同时在下降。在本书撰写之际可能还不能提供理想的室内定位系统(即2009年),但人们可以分析这类系统的原理,并提供一些性能评估方法。定位技术的发展受到硬件和其他条件的限制,如可用的无线电频谱,使得定位系统的性能发展受到束缚,且这些限制性条件并不随着时间的推移而发生变化。本书不针对某个特定的定位技术和系统,重点是介绍下一代中短程定位系统,因为这类定位系统相对廉价且具有良好的定位精度与作用距离。

当前定位技术是未来定位系统的发展起点。下列内容虽然不是很详尽,但代表了目前定位技术的主流。

1. WLAN

目前WLAN技术几乎专门是基于IEEE 802.11标准^①,它定义了数据传输操作的各种物理层内容,所属频率为2.4 GHz的工业、科学和医疗(ISM)频段^②以及5.2 GHz频段^③。定位不是该标准硬件的一部分功能,但由于数据传输是基于带宽为1~20 MHz的扩频调制,这取决于具体的802.11版本,因而可以添加定位功能。当前最简单的实现是基于信号强度测量,也可以实现到达时间测量技术。目前无线局域网的典型距离通常限于室内约50 m,人们可以指望的定位应用类似距离也在这一范围内。当硬件特别是移动设备的价格适宜时,该系统可利用安装在大楼内的固定基站,采取与有线局域网(Local-Area Network, LAN)连接的典型形式。定位系统需要的基站越多,则所采用基础设施的费用就越高。

2. 超宽带(Ultra-wideband, UWB)

超宽带技术用于解决可用频谱受限的问题,受限的频谱对数据传输的速率和定位系统的

① 参见 <http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html>。

② 工业、科学和医疗频段是免许可证的,但所有用户必须共同使用这种频段。避免无线传输相互干扰的措施是采用跳频或直接序列扩频通信,因为这些类型的无线传输能承受干扰。

③ 802.11a WLAN运行在指定分配的5.2 GHz频段,但应用受限于室内的数据传输。目前5.8 GHz ISM频段不用于802.11 WLAN系统,该频段会成为定位系统的理想选择。