

移动通信前沿技术丛书

蜂窝网无线定位

范平志 邓平 刘林 著

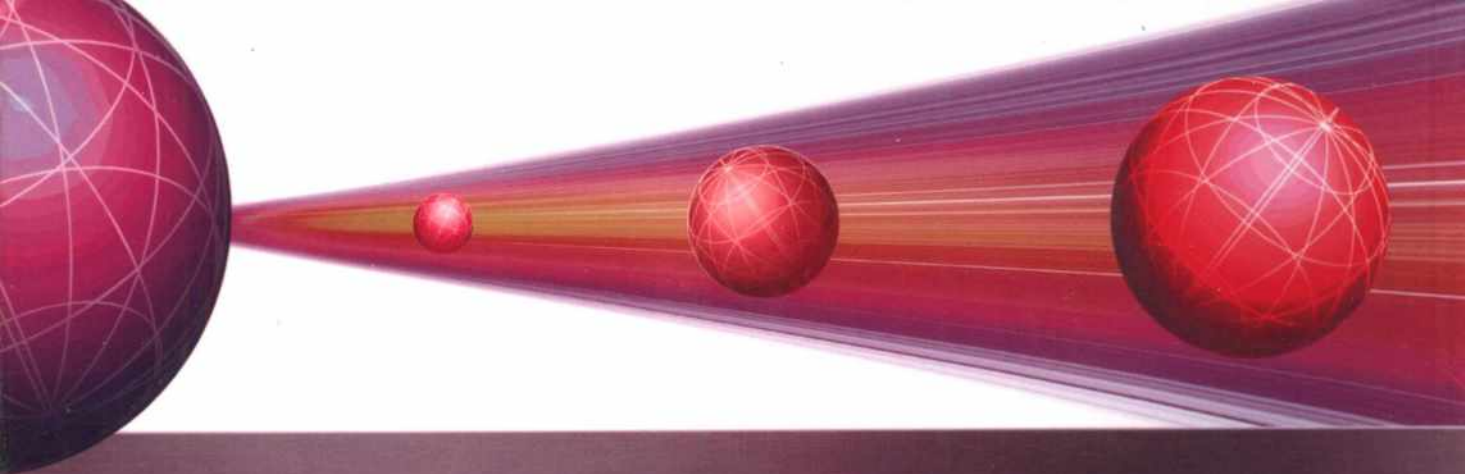
29.53



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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



范平志 工学博士（英国），IEEE 高级会员，英国 Leeds 大学和上海交通大学客座教授，国家级有突出贡献的中青年专家，国家杰出青年科学基金获得者，Journal of WCMC、IEICE Trans. Info. Sys. 等国际学术刊物客座编辑，《电波科学学报》、《计算机应用》等国内刊物编委，IEEE、IEE、IEICE 等国际学术刊物审稿人，IWSDA' 02、PDCAT' 03 等国际会议大会主席，多个国际会议组委和分会主席。现任西南交通大学计算机与通信工程学院院长、移动通信研究所所长、教授、博士生导师。

范平志博士已出版中、英文著作 5 部，在国内外杂志和学术会议发表论文 160 余篇，完成发明专利 9 项，主持多项中日、中英、中德和其他国际合作项目、国家自然科学基金项目和国家八六三计划项目等。范博士的主要研究领域为：码分多址与个人通信、蜂窝无线定位、信息与编码技术、网络与信息安全等。

邓平 工学博士，现为西南交通大学移动通信研究所副教授，同时在西南电子技术研究所从事博士后研究工作。邓博士已在各类学术刊物发表研究论文 10 余篇，主要研究领域为：蜂窝网络无线定位技术，统计信号处理技术，CDMA 蜂窝移动通信技术等。

刘林 工学硕士，现为西南交通大学移动通信研究所讲师，同时在职攻读博士学位。刘林老师曾获西南交通大学优秀硕士论文奖，已在各类刊物发表学术研究论文 6 篇，主要研究领域为：蜂窝网络无线定位技术，专用移动通信技术，CDMA 蜂窝移动通信技术。

ISBN 7-5053-8283-7



9 787505 382831 >



责任编辑：竺南直
封面美编：朱仁平
孙焱津

本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书

ISBN 7-5053-8283-7/TN · 1726 定价：25.00 元

移动通信前沿技术丛书

蜂窝网无线定位

范平志 邓 平 刘 林 著



A1029573

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书内容主要基于作者近年来在蜂窝网络移动台定位方面的研究工作。主要包括:无线定位系统概述、移动通信信道特性与定位误差、测量值估计与基本定位算法、NLOS 误差鉴别、抑制与移动台定位估计、混合定位与数据融合技术、GSM 网络无线定位系统、CDMA 网络无线定位系统等。书中不但包括了对经典算法的描述,也提出了一些改进算法和新型定位方法,还给出了大量作者完成的仿真与分析结果。

本书适合于通信专业高年级学生和研究生学习参考,也可供致力于无线通信研究的高校教师、研究所和公司研发人员以及蜂窝网络运营工程技术人员参考使用。

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

蜂窝网无线定位/范平志,邓平,刘林著. —北京:电子工业出版社,2002.12

(移动通信前沿技术丛书)

ISBN 7-5053-8283-7

I. 蜂... II. ①范... ②邓... ③刘... III. 蜂窝结构—移动通信—通信网 IV. TN929.53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 095503 号

责任编辑:竺南直 特约编辑:皮冬娇

印 刷:北京四季青印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:13 字数:330 千字

版 次:2002 年 12 月第 1 版 2002 年 12 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:25.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077

出版说明

移动通信是当前发展最快、应用最广和最前沿的通信领域之一,有专家预测到 2003 年全球移动用户数将达到 10 亿。移动通信的最终目标是实现任何人可以在任何地点、任何时间与其他任何人进行任何方式的通信。移动通信技术现在已经发展到了以 WCDMA 为代表的第三代,而相互兼容各种移动通信技术的第四代标准目前已经悄然来临。为了促进和推动我国移动通信产业的发展,并不断满足社会各界和广大通信技术人员系统学习和掌握移动通信前沿技术的需求,电子工业出版社特约请国内从事移动通信科研、教学、工程、管理等工作并具有丰富的理论和实践经验的专家、教授亲自编著或翻译国外“金”典著作组成了这套《移动通信前沿技术丛书》,于新世纪之初相继地推出。

该丛书从我国移动通信技术应用现状与发展情况出发,以系统与技术为中心,全面系统地介绍了当今移动通信领域涉及的有关关键技术与热点技术,如软件无线电原理与应用、智能天线原理与应用、蓝牙技术、移动 IP、通用无线分组业务(GPRS)、移动通信网络规划与优化、移动数据通信以及典型的第三代移动通信系统等内容。其特点是力求内容的先进性、实用性和系统性;突出理论性与工程实践性紧密结合;内容组织循序渐进、深入浅出,理论叙述概念清晰、层次清楚,经典实例源于实践。丛书旨在引导读者将移动通信的原理、技术与应用有机结合。

这套丛书的主要读者对象是广大从事通信技术工作的工程技术人员,也适合高等院校通信、计算机等学科各专业在校师生和刚走上工作岗位的毕业生阅读参考。

在编辑出版这套丛书过程中,参与编著、翻译和审定的各位专家都付出了大量心血,对此,我们表示衷心感谢。欢迎广大读者对这套丛书提出宝贵意见和建议,或推荐其他好的选题(Email:david.zhu@phei.com.cn),以便我们今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术图书。

电子工业出版社

2001 年 1 月

前 言

国际上对无线定位技术的研究与应用始于 20 世纪 60 年代的自动车辆定位 (AVL) 系统, 随后该项技术在公共交通管理、货物运输、出租车管理、犯罪跟踪和紧急医疗服务等有限的范围内得到了应用。80 年代以来, 随着人们对智能交通运输系统 (ITS) 的需要及蜂窝移动通信系统的出现, 对无线定位技术有了新的要求, 吸引了更多研究者的兴趣。美国联邦通信委员会 (FCC) 于 1996 年公布了 E-911 (Emergency call '911') 定位需求, 要求在 2001 年 10 月 1 日前, 各种无线蜂窝网络必须能对发出 E-911 紧急呼叫的移动台提供精度在 125m 内的定位服务, 而且满足此定位精度的时间概率应不低于 67%; 在 2001 年以后, 系统必须提供更高的定位精度及三维位置信息。1999 年 12 月, FCC 99-245 对 E-911 需求进一步细化, 对网络设备和手机生产厂商、网络运营商等对定位技术在网络设备和手机中的实施和支持提出了明确要求和日程安排。在定位精度要求方面规定: 基于蜂窝网络的定位方案 (不改动终端), 要求在 67% 的概率下定位精度不低于 150m, 95% 的概率下定位精度不低于 300m; 基于移动台的定位方案 (可以改动移动台), 要求在 67% 的概率下定位精度不低于 50m, 95% 的概率下定位精度不低于 150m。美国 FCC 的这一规定明确了提供 E-911 定位服务将是今后各种蜂窝网络, 特别是 3G 网络必备的基本功能。此外, 欧洲和日本也在计划作相应的要求。

由于政府的强制性要求和市场本身的驱动, 各国主要大公司均就 GSM、IS-95 和第三代移动通信系统等网络开始制订各自的定位实施方案。特别是 3GPP 和 3GPP2 上对定位的要求更具体化, 促使国际上出现了基于蜂窝网络的无线定位技术的研究热潮。从检索的国际最新研究资料来看, 目前虽然出现了一些新的定位方法和技术, 但若仅依赖于蜂窝网络资源 (即不改动移动终端), 要完全满足 E-911 定位需求的要求还有一定差距, 特别是要求在不影响系统其他主要性能指标的前提下, 高效、可靠地提供对移动台的定位功能, 还有许多问题有待深入研究。为了进一步提高定位精度, 综合利用蜂窝网络系统资源和 GPS 卫星定位系统的混合无线定位技术受到了空前的重视, 但必须对移动终端进行改造, 从而增加终端成本。

基于蜂窝网络的无线定位技术研究既可满足移动台定位需求, 也可应用于蜂窝网络系统设计及网络资源管理, 如基于移动台位置的灵活收费策略、预防欺诈行为、车辆管理及智能运输系统等。目前, 基于 GSM 和 CDMA 技术的蜂窝网络定位系统和蜂窝/GPS 混合定位系统已经进入商用, 虽然其定位精度有待于提高, 手机成本也有待于降低, 但用户数仍然在迅速增长 (尤其是在日本和韩国), 这充分说明蜂窝无线定位市场潜力巨大。

实现对移动台定位的基本定位方法有三类: 1) 基于电波场强的定位法; 2) 基于电波到达入射角 (AOA) 的定位法; 3) 基于电波到达时间 (TOA) 或到达时间差 (TDOA) 的定位法。然而, 对移动台精确定位的前提是射频信号能在收发端距 (LOS) 传播。在蜂窝移动通信环境中, 移动台和参与定位的多个基站之间均有视觉距传播路径的可能性很小。电波的非视距 (NLOS) 传播, 多径效应和多址干扰, 基站之间及基站与移动台之间的时间同步误差、测量误差等, 都将影响定位精度。其中, 电波的 NLOS 传播是引起各种基本定位技术产生定位误差的主要原因, 也是蜂窝网络定位精度难以与 GPS 定位相比的根源。

在蜂窝网络中对移动台定位的方案有两类: 基于移动台的定位方案和基于网络的定位方

案。前者是由移动台根据接收到的多个发射台的信号特征信息（如场强、入射角、传播时间或时间差等）确定其与各发射台之间的几何位置关系，再对其自身位置进行定位估计，GPS 系统、罗兰系统即属于这一类；后者则由多个基站接收机同时检测移动台发射的信号，根据信号的特征信息由蜂窝网络对移动台进行定位估计。显然，基于移动台的定位方案必须在移动台集成 GPS 接收机或其他定位设备，还需在移动台和蜂窝网络之间进行定位数据的传送；基于网络的定位方案则不需要对移动台增加额外开销，因而可以保护用户已有投资。目前，在部分 GSM 网络和 CDMA 网络中对移动台的定位研究采用了基于移动台的定位方案，而在新一代蜂窝移动通信系统（如 W-CDMA 系统）中，由于需要为用户提供多种精度的定位服务，在 3GPP 的有关文档资料中对两种方案都提出了需求，而且重点已开始转向基于网络的定位方案和混合定位方案。本书将详细研究各种移动台定位技术，重点放在基于蜂窝网络的无线定位技术。

本书内容主要基于作者近年来在蜂窝网络无线定位方面的研究工作。作者希望通过对已有研究成果的总结，推动国内在这一领域的研究开发工作。本书主要内容包括：无线定位系统概述、移动通信信道特性与定位误差、定位测量估计与基本定位算法、混合定位与数据融合、抗 NLOS 高精度定位、GSM 蜂窝网络无线定位系统、CDMA 蜂窝网络无线定位系统等。书中不但包括了对经典算法的描述，也提出了一些改进算法和新型定位方法，还给出了大量作者完成的仿真与分析结果。

本书适合于大专院校通信专业高年级本科生和研究生学习参考，也可供致力于无线通信研究的高校教师、研究所和公司研发人员以及蜂窝网络运营工程技术人员参考使用。

作者近年来在蜂窝网络无线定位领域的研究工作受到了国家杰出青年科学基金、国家 863 计划项目和华为技术有限公司的支持，特此致谢。作者还由衷地感谢中国科学院院士、西南电子技术研究所朱中梁研究员，朱院士就无线定位误差表示等重要问题同作者进行了卓有成效的讨论，并提出了很好的建议。此外，西南交通大学移动通信研究所已毕业研究生李莉女士参与了部分前期无线定位仿真研究工作，作者特此一并致谢。

作者
2002 年 10 月

目 录

第 1 章 无线定位系统概述	(1)
1.1 无线电定位基本概念、分类和特点	(1)
1.1.1 陆基无线电导航系统	(2)
1.1.2 卫星定位系统	(2)
1.1.3 蜂窝无线定位系统	(6)
1.2 GPS 卫星定位系统	(7)
1.2.1 GPS 系统组成	(7)
1.2.2 GPS 定位原理	(8)
1.2.3 GPS 接收机及其分类	(11)
1.3 双星无线电定位系统	(12)
1.3.1 双星定位系统结构与基本原理	(12)
1.3.2 卫星定轨、信号流程与延时测定	(13)
1.3.3 北斗用户机、综合信息服务系统与应用模式	(16)
1.4 蜂窝网络无线定位系统	(18)
1.4.1 蜂窝网络无线定位研究进展	(18)
1.4.2 蜂窝无线定位系统	(20)
1.4.3 GPS/蜂窝网混合定位系统 (gpsOne)	(21)
1.5 蜂窝网络定位基本原理	(24)
1.5.1 推算定位	(24)
1.5.2 接近式信标定位	(25)
1.5.3 蜂窝网无线电定位 (圆周/双曲线/方位角定位)	(26)
1.5.4 影响蜂窝网无线定位精度的原因与对策	(28)
1.6 本书主要内容与特点	(29)
第 2 章 移动通信信道特性与定位误差	(31)
2.1 移动通信与信道特性	(31)
2.1.1 蜂窝移动通信无线接口特性与定位误差	(31)
2.1.2 移动通信信道特性与研究方法	(32)
2.2 无线电波传播机理与路径损失模型	(33)
2.2.1 无线电频段与电波传播特性及方式	(33)
2.2.2 自由空间传播与移动通信 VHF、UHF 电波传播	(34)
2.2.3 路径损失与经验传播模型	(35)
2.3 移动通信信道衰落统计特性	(37)
2.3.1 幅度衰落、延时扩展、多普勒扩展与多径传播	(37)
2.3.2 信道短期衰落特性与长期衰落特性	(39)

2.3.3	信道弥散与选择性衰落特性	(41)
2.4	快衰落随机过程与抽头延时线信道模型	(41)
2.4.1	复高斯过程数学模型分析	(41)
2.4.2	时变信道冲激响应分析	(43)
2.4.3	抽头延时线信道模型	(44)
2.5	T1P1 无线定位信道模型与链路仿真	(45)
2.5.1	T1P1 (COST259) 信道模型	(45)
2.5.2	延时扩展 Greenstein 模型	(46)
2.5.3	蜂窝网络无线链路仿真器	(46)
2.6	定位准确率评价指标	(47)
2.6.1	蜂窝网络的拓扑结构及移动台分布	(47)
2.6.2	均方误差 MSE 与 CRLB	(48)
2.6.3	圆/球误差概率 (CEP/SET)	(49)
2.6.4	几何精度因子 (GDOP)	(49)
2.6.5	累计分布函数 (CDF)	(50)
2.6.6	相对定位误差 (RPE)	(50)
2.7	本章小结	(50)
第 3 章	测量值估计与基本定位算法	(52)
3.1	TOA 测量值估计算法	(52)
3.1.1	MLS-Prony 算法	(52)
3.1.2	Root-MUSIC 算法	(54)
3.2	TDOA 测量值估计算法	(55)
3.2.1	互相关估计方法	(55)
3.2.2	ETDGE 估计方法	(60)
3.3	定位算法的数学模型	(61)
3.3.1	定位问题的最小二乘 (LS) 表示	(61)
3.3.2	TDOA 双曲线模型	(62)
3.4	具有解析表达式解的算法	(62)
3.4.1	Fang 算法	(63)
3.4.2	Chan 算法	(63)
3.4.3	Friedlander 算法	(67)
3.4.4	SX 和 SI 算法	(69)
3.5	递归算法和其他算法	(71)
3.5.1	递归算法	(71)
3.5.2	分类征服 (DAC) 算法	(72)
3.5.3	其他算法	(74)
3.6	算法仿真与性能比较	(74)
3.6.1	算法在高斯噪声环境中的性能比较	(74)
3.6.2	算法在实际信道环境中的性能比较	(76)

3.7 本章小结.....	(78)
第4章 NLOS 误差鉴别、抑制与移动台定位估计	(80)
4.1 蜂窝网络移动台定位的 NLOS 问题.....	(80)
4.2 NLOS 环境 TDOA/TOA 误差分析	(81)
4.3 NLOS 误差鉴别	(82)
4.3.1 Wylie 鉴别方法	(82)
4.3.2 假设检验判决方法	(83)
4.3.3 残差分析判决方法	(85)
4.4 NLOS 误差的抑制与消除	(86)
4.4.1 Wylie 方法	(86)
4.4.2 对 LS 算法的改进	(86)
4.4.3 残差加权算法	(88)
4.5 一种采用平滑和重构的定位精度提高方法	(88)
4.5.1 TDOA/TOA 的平滑与重构	(88)
4.5.2 NLOS 误差抑制算法	(90)
4.5.3 性能仿真与讨论	(92)
4.6 一种基于移动台位置的动态定位算法	(95)
4.6.1 定位算法	(95)
4.6.2 性能仿真与讨论	(97)
4.7 本章小结.....	(100)
第5章 混合定位与数据融合技术.....	(101)
5.1 混合定位问题求解方法	(101)
5.1.1 混合定位的基本方法	(101)
5.1.2 迭代算法	(102)
5.1.3 一种简化的 WLS 算法	(104)
5.2 一种推广的 TDOA/AOA 混合定位算法	(105)
5.2.1 推广的 Chan 算法	(105)
5.2.2 性能仿真与讨论	(108)
5.3 一种改进的 TOA/AOA 混合定位算法	(109)
5.3.1 TOA/AOA 混合定位算法	(109)
5.3.2 算法性能评估	(111)
5.4 数据融合与移动台定位估计	(113)
5.4.1 多传感器数据融合技术	(113)
5.4.2 JDL 数据融合模型	(114)
5.4.3 移动台定位估计数据融合模型	(116)
5.5 数据融合增强模型及其仿真研究	(119)
5.5.1 数据融合增强模型	(119)
5.5.2 定位性能仿真	(120)

5.6	多算法协同定位	(124)
5.6.1	一种多算法协同定位模型	(124)
5.6.2	简化的多算法协同定位方法	(126)
5.7	本章小结	(129)
第6章	GSM 网络无线定位系统	(130)
6.1	GSM 网络电波特征值的测量	(130)
6.2	具有定位功能的 GSM 网络	(131)
6.2.1	LCS 功能描述	(131)
6.2.2	逻辑结构	(132)
6.2.3	置入结构	(133)
6.3	信令协议和接口	(134)
6.3.1	一般 LCS 信令模型	(134)
6.3.2	信令交换	(135)
6.4	一般网络定位程序	(135)
6.4.1	定位准备程序	(137)
6.4.2	定位测量建立程序	(138)
6.4.3	定位计算和释放程序	(138)
6.5	GSM 网络定位方法	(138)
6.5.1	提前时间 (TA) 定位法	(138)
6.5.2	上行链路 TOA 定位法	(139)
6.5.3	增强观测时间差 (E-OTD) 定位法	(139)
6.6	蜂窝网络多精度定位	(141)
6.6.1	多精度定位的基本思想	(141)
6.6.2	多精度定位服务流程	(142)
6.6.3	多精度定位接口和协议	(142)
6.7	本章小结	(145)
第7章	CDMA 蜂窝网络无线定位系统	(146)
7.1	具有定位功能的 CDMA 网络	(146)
7.1.1	模块功能介绍	(147)
7.1.2	无线接口与通信信令	(148)
7.2	LCS 逻辑功能模型	(152)
7.2.1	LCS 客户功能组	(153)
7.2.2	LCS 服务器功能组	(153)
7.2.3	逻辑功能模块在网络内的分布	(154)
7.3	CDMA 定位过程	(155)
7.3.1	定位过程中核心网和接入网的功能	(155)
7.3.2	CDMA 定位的基本操作	(156)
7.4	CDMA 标准定位方法	(156)

7.4.1 基于蜂窝小区 ID 的定位法	(157)
7.4.2 OTDOA-IPDL 定位法	(157)
7.4.3 网络辅助 GPS 定位法	(165)
7.4.4 三种定位方法的比较	(166)
7.5 CDMA 系统中多址干扰对定位的影响	(167)
7.5.1 CDMA 下行链路中服务基站信号干扰对定位的影响	(167)
7.5.2 干扰消除技术	(168)
7.6 本章小结.....	(169)
缩略语表	(171)
参考文献	(176)
索引	(193)

第1章 无线定位系统概述

无线定位技术是一项古老而又年轻的技术。定位通常是指确定地球表面某种物体在某一参考坐标系中的位置。传统的定位技术和导航密不可分，导航是指引导交通工具或其他物体从一个位置移动到另一个位置的过程，这一过程通常需要定位进行辅助。除了传统应用外，近年来定位技术开始用于蜂窝系统设计、信道分配、切换、小区服务区域确定、E-911 紧急援助、交通监控与管理等^[300,203,141,113,58,87]。目前，可以采用的定位方法通常有三类：推算定位（DR，Dead Reckoning）、接近式定位（Proximity）和无线电定位（Radio Location），其中无线电定位又可分为卫星无线电定位和地面无线电定位^[24,20,58]。推算定位基于一个相对参考点或起始点，借助地图匹配算法来确定移动目标位置，适用于对运动目标的连续定位；接近式定位又叫信标（Signpost 或 Beacon）定位，运动目标的位置通过与之最靠近的固定参考检测点来估计确定；卫星定位利用 GPS、GLONASS、北斗双星等卫星系统的多个卫星实现移动目标的三维定位；地面无线电定位则通过测量无线电波从发射机到接收机的传播时间、时间差、信号场强、相位或入射角等参数来实施目标移动终端的二维定位。

本书将主要研究地面蜂窝无线定位系统，展示该领域的主要关键技术和作者最新研究成果。为了便于理解和比较各种定位技术的特点，本章将首先概述各类无线定位技术的基本概念、国内外研究现状和相关关键技术，然后分析 GPS 和双星定位系统的基本原理和技术特点，最后讨论各类蜂窝无线定位技术的基本原理和关键技术，为以后各章的深入分析奠定基础。

1.1 无线电定位基本概念、分类和特点

无线定位是保障人类交通安全和从事军事活动的必要手段，在现代社会中发挥着越来越大的作用，如大地测量、地震预报、车辆的运输调度、森林防火、地质勘探和国土的开发、航海/航空的安全航行和交通管制、空间飞行器的定位和测控以及授时、移动通信、搜索救援等^[13,23,20,45,56,75,87,175,204,300,303]。经过人们的不懈努力，导航定位技术已经从最早的天文导航发展到全球卫星导航。

无线电导航定位系统是建立一系列导航无线电信号发射台，用户接收这些无线电导航信号，根据信号的频率、相位等参数的变化，通过特定的方法来计算出自己的位置，从而安全准确地从一地向另一地运动。由于无线电定位设备利用无线电波测量目标的坐标，它的工作与气候条件基本无关，是在复杂气候及能见度不良情况下很有效的一种导航方法，可在近、中、远距离各种条件下顺利完成各项定位任务。

在蜂窝网络中，各种基于移动台位置的服务，如公共安全服务、紧急报警服务、基于移动台位置的计费、车辆和交通管理、导航、城市观光、网络规划与设计、网络 QoS 和无线资源管理等，都需要一种简单、廉价的定位方法^[75,58]。在蜂窝定位系统中，被定位移动终端通常是普通终端（手机等），这在客观上要求多个基站设备通过附加装置测量从移动终端发出的电波信号参数，如传播时间、时间差、信号场强、相位或入射角等，再通过合适的定位算法

推算出移动终端的大致位置。显然, 由于受移动通信信道噪声和多径传播干扰等不良因素的影响, 蜂窝无线电定位系统很难达到较高定位精度, 定位覆盖范围也受到蜂窝移动通信系统场强覆盖范围的限制^[20,57]。

1.1.1 陆基无线电导航系统

20 世纪以来出现的各种地面无线电定位导航系统, 如 Loran-C (罗兰-C)、Omega (奥米加)、Tacan (塔康)、Vor/DME、AVL、仪表着陆系统、微波着陆系统、子午仪、无线电信标等, 通常都是针对快速移动目标, 如飞机、舰船、车辆的定位与导航, 并提供目标的位置、距离、速度、运动方向等信息^[303,300,299,87]。国际民用航空组织 (ICAO) 由于认识到卫星导航系统的巨大优越性, 正在积极倡导各国使用卫星导航系统, 从而导致了地面无线电定位导航系统的逐步淘汰, 如美国已基本停止或开始淘汰罗兰-C、奥米加、无线电信标、子午仪等陆基导航定位系统运行, 塔康系统、仪表着陆系统和微波着陆系统也将从 2006 年开始淘汰^[87]。

各类地面无线电定位导航系统都采用了相同或相似的基本定位技术, 其差别主要在于基于不同用途采用不同的无线电频段和系统结构。此外, 对覆盖范围很大的定位系统, 其导航精度和导航数据更新速率常常较低, 而提供高导航精度的系统往往覆盖范围有限。

典型的陆基无线电导航定位系统是罗兰-C 和奥米加导航系统^[87]。

(1) 罗兰-C 导航系统

罗兰-C 导航系统工作在 100kHz, 采用脉冲相位双曲线定位。该系统一般由三个地面导航台组成, 导航工作区域约为 2000km。其定位精度一般为 200~300m, 且与航行器相对于导航台的距离有关, 距离越远, 其定位误差越大。由于工作频率较高, 电波沿直线传播而且要穿透电离层, 考虑到地球表面的弯曲和地形起伏, 一个导航台只能覆盖很小的区域。要完成大范围覆盖则要毗邻布局大量导航台, 而且在海上和边远地区由于无法或很难建台, 信号仍然覆盖不全。它不适合高动态飞行器 (如战斗机), 也不适合在城市使用, 因为来自交流电源设备的过量干扰会产生低频干扰。

(2) 奥米加导航系统

奥米加导航系统工作在十几千赫, 采用相位双曲线定位。因其工作的波长较长, 电磁波通过大气波导传播, 所以它的导航工作区域比罗兰-C 要大得多, 建 8 个地面导航台就可以提供全球覆盖。然而由于工作在低频, 电波传播受到电离层变动、地表导电性能变动的影响, 因此导航精度难以做得较高, 约为几千米。另外, 工作频率低, 也需要庞大的发射天线和地网。

1.1.2 卫星定位系统

1. 子午仪卫星导航系统 (Transit)

子午仪卫星导航系统, 即美国海军导航卫星系统 (Navy Navigation Satellite System, NNSS)^[303,87]。在这一系统中, 卫星的轨道通过地极, 所以又称为子午仪卫星导航系统 (Transit)。它不采用测距方法, 而是利用卫星运行引起的多普勒频移的方法进行定位。1964 年 1 月用于北极星核潜艇的导航定位获得成功, 并逐步用于各种军舰的导航定位。1967 年 7 月, 经美国政府批准, 对其广播星历解密, 并提供民用, 在远洋船舶导航和海上定位服务等方面获得了广泛的应用。

尽管子午仪卫星导航系统已得到广泛的应用, 并显示出巨大的优越性, 但是这一系统在

实际应用方面却存在着十分严重的缺陷。该系统是由 5 至 6 个卫星组成的导航网，卫星运行高度低（平均约为 1000km），运行周期为 107min，对同一个卫星每天通过次数最多为 13 次，从地面站观测到卫星的时间间隔平均约为 1.5h。由于采用多普勒定位原理，一台接收机一般需要观测 15 次合格卫星通过信号，才能达到±10m 的单点定位精度。在全球范围内，它给出的定位信息只能是全天候的连续二维坐标（经度和纬度），不能给出高程。这种系统，一方面由于所需的观测时间较长，不能给用户，尤其是高动态用户（如飞机、车辆等）提供实时定位和导航服务；另一方面，由于卫星轨道较低，受大气影响严重，定位精度的提高受到限制，因而限制了高动态用户和高精度用户的使用。对舰船而言，利用这一系统只能对惯性导航系统和其他无线电导航系统进行连续的精确修正，它的作用远不能满足全球定时定位的要求。

2. 全球定位系统（GPS）

GPS 是英文 Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System 的字头缩写词 NAVSTAR/GPS 的简称，它的含义是，利用卫星的测时和测距进行导航，以构成全球卫星定位系统^[13,87,195,204,217,303,303]。GPS 系统是目前技术上最成熟且已实用的一种卫星导航和定位系统，能够廉价便捷地在全世界任何地方任何时候提供高精度和连续位置、速度、航向、姿态和时间信息。它具有如下特点：

- 全球及全天候导航定位；
- 定位精度高；
- 实时定位速度快；
- 抗干扰性能好，保密性强。

GPS 方案是由 24 颗卫星组成的实用系统。这些卫星分布在互成 120° 的三个轨道平面上，每个轨道平面平均分布 8 颗卫星。这样，对于地球任何位置，均能同时观测到 6~9 颗卫星。设计粗码定位精度为 100 m 左右，精码定位精度为 10 m 左右。24 颗卫星分布在互成 60° 的 6 个轨道面上，轨道倾角为 55°，由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成。

GPS 定位是“测时-测距”体制，因此 GPS 卫星必须具有高度精确的时钟（频标）。GPS 工作卫星只须启用一台原子钟，其余作为备用。

世界上许多公司都在进行高精度 GPS 设备的研制，并出现了许多高性能的产品。美国的高通和加拿大的 NovAtel 等公司的高动态、高数据输出率 GPS 接收机的单机定位精度可达 10m，差分精度最高可达 1 cm 左右，若进行数据后处理精度可达 5 mm。

当前，GPS 用户设备发展的主要趋势如下。

① 集成化、小型化：由于电子技术和微处理技术的发展，GPS 接收机的集成化程度越来越高，使整机尺寸和重量大大减少，价格也迅速下降；

② 高动态、多通道：研制、生产高动态、多通道接收机，可跟踪 8~12 颗卫星，不会因移动而丢失个别卫星的信号，中断导航定位；

③ 差分 GPS 接收机：这种接收机可进行实时差分导航定位，以消除定位误差，提高定位精度；

④ 以 GPS 为中心的组网导航系统：如 GPS / INS（惯导）、GPS / GLONASS 等组合式导航系统，具有广阔的应用前景；

⑤ 高精度动态接收机：当前动态 GPS 接收机大多是伪码测量的接收机。而非特许用户

只能用粗码 C/A 码接收机,其实时定位精度较低,最好可达米级精度,不能满足高精度要求的用户需要。为此,许多国家在研制动态高精度载波相位测量 GPS 接收机,如 Trimble 公司的 Trimble4000-SSE,可用于极高精度航空摄影测量定位,但需事后进行数据处理。

此外, GPS 与移动通信设备的结合已成为重要趋势,如 Trimble 公司已建成采用 Inmarsat 和 GPS 的 GglaXy 流动地面站,可完成全球范围的双向报文通信和定位报道。

3. GLONASS 系统

GLONASS 系统是由前苏联开始研制,后由俄罗斯继续完善的全球卫星导航系统^[13,87,217,228]。1995 年 12 月 14 日,俄罗斯成功地发射了一箭三星,标志着 GLONASS 星座的在轨卫星已经布满,经过数据加载、调整和检验,1996 年 1 月 18 日,24 颗工作卫星正常发射信号,健康有效地正式工作。

GLONASS 比 GPS 起步晚 9 年,全星座正常运行比 GPS 晚近 3 年时间。从前苏联 1982 年 10 月 12 日发射第一颗 GLONASS 卫星以来,历经 13 年,总共发射了 73 颗卫星。

GLONASS 星座的轨道为 3 个等间隔近圆轨道,每个轨道面上均匀分布 8 颗卫星。3 个轨道面升交点经度之差为 120° ,按地球自转方向将其编号为 1、2、3。同一轨道面上的卫星编号按卫星运动方向的反方向递增,第 1 轨道面上的卫星为 1~8,第 2 个轨道面上为 9~16,第 3 轨道面上为 17~24。同一轨道面上相邻卫星纬度幅角相差 45° ,相邻轨道面上相邻卫星纬度幅角相差 15° 。

4. GPS+GLONASS 双系统导航定位

由于可靠性和定位精度等原因,近年来 GPS+GLONASS 双系统导航定位系统得到了快速发展^[13,87,121,195,204,217,228]。一般而言, GPS 和 GLONASS 两个卫星导航系统同时被美国和俄罗斯关闭的可能性很小,因而双系统接收机在军事和民用上都有重要应用价值。

双系统卫星导航定位有如下明显优势。

① 可见卫星数增加一倍: GLONASS 卫星星座组网完成后,可用于导航定位的卫星总数将增加一倍。在地平线以上的可见卫星数对纯 GPS 系统一般为 7~11 颗,对 GPS+GLONASS 系统则可达 14~20 颗。在山区或城市中,有时因障碍物遮挡,纯 GPS 可能无法工作, GPS+GLONASS 则可以工作。

② 提高生产效率:在测量应用中, GPS 测量所需要的观测时间取决于求解载波相位整周模糊度所需的时间。观测时间越长或可观测到的卫星数越多,用于求解载波相位整周模糊度的数据也就越多,求解结果的可靠性越好。为了提高生产效率,常使用快速定位、实时动态测量(RTK)或后处理动态测量等方法,但要满足一定的精度要求,必须正确求解载波相位整周模糊度。可观测到的卫星数增加得越多,求解载波相位整周模糊度所需的观测时间就可缩短得越多,因此 GPS+GLONASS 可以提高生产效率。

③ 提高观测结果的可靠性:用卫星系统进行测量定位的观测结果的可靠性主要决定于用于定位计算的卫星颗数。因此 GPS+GLONASS 将大大提高观测结果的可靠性。

④ 提高观测结果的精度:观测卫星相对于测站的几何分布(DOP 值)直接影响观测结果的精度。可观测到的卫星多,就可以大大改善观测卫星相对于测站的几何分布,从而提高观测结果的精度。

5. 双星定位系统

目前只有美国和俄罗斯有自己的卫星导航定位系统,日本和欧洲也正在加紧研制自己的卫星导航定位系统。由于卫星定位技术在国防和国民经济中的作用越来越大,为了保证国防和国民经济的安全,我国也在“九五”列项提出双星定位导航系统,其工程代号取名为“北斗一号”,该系统为我国自己独立研制开发的第一代卫星导航定位通信系统。我国的双星定位系统用两颗地球同步卫星进行双向测距外加数字高程地图定位,可双向数据报文通信,系统内含差分定位功能,卫星至中心站链路使用标准 C 频段,其服务范围包括我国大陆和东南海域,属于区域性导航系统^[89,87,97,122,233,282]。

北斗卫星导航系统是由两颗地球同步卫星、地面中心站、用户终端三部分组成的。定位可以由用户终端向中心站发出请求,中心站对其进行定位后将位置信息广播出去由该用户获取,也可以由中心站主动进行指定用户的定位。定位后不将位置信息发送给用户,而由中心站保存。在双星定位系统中,结合数字地面高程,可得知目标位置的大地高程,且已知目标在赤道平面北侧。由于是地球同步卫星,两颗卫星和中心站的地心坐标都是已知。具体的定位过程是:首先由中心发出信号,分别经两颗卫星反射传至接收部分,再由接收部分经两颗卫星反射分别传回中心站,中心站计算出两种途径所需时间,再经过计算即可确定接收机的二维位置,定位精度为 15m 左右。

北斗卫星导航系统有如下三大功能。

- ① 快速定位:北斗导航系统可为服务区域内用户提供全天候、高精度、快速实时定位服务。
- ② 简短通信:北斗系统用户终端具有双向数字报文通信能力,注册用户利用连续传送方式可以传送多达 120 个汉字的信息。相比之下, GPS、GLONASS 系统均无此功能。
- ③ 精密授时:北斗导航系统具有单向和双向两种授时功能。根据不同的精度要求,利用授时终端,完成与北斗导航系统之间的时间和频率同步,提供 100ns(单向授时)和 20ns(双向授时)的时间同步精度。

6. 伽利略(Galileo)卫星导航定位系统

2002 年初,欧盟(EU)首脑会议最终批准实施“伽利略(Galileo)”卫星导航系统计划,并要求 2002 年 3 月 26 日召开的欧盟 15 国交通部长会议为之采取“一切必要措施”以及提供财政支持^[98]。几经波折之后,欧洲自己研制的卫星导航系统终于启动。按照“伽利略”计划,欧洲计划预算投入为 34 亿欧元,计划于 2008 年建成并投入使用,关键设备均由欧洲人自己设计制造。伽利略计划是由欧盟提出,由民用部门控制的卫星导航系统,这是继已有的 EGNOS(欧洲静止轨道导航重叠服务)之后,欧洲朝着发展自己的卫星导航技术方向迈出的重要一步。

在欧盟最初提出要实施伽利略计划时,前美国总统克林顿就曾作出保证说,将改善提供给普通用户的信号精确度,并且美国不打算以任何形式限制使用 GPS 系统。但事实上,科索沃战争以及阿富汗战争期间,欧洲使用 GPS 系统都受到了一定的限制。法国是“伽利略”计划的积极倡导者。法国总统希拉克说,实施“伽利略”计划将使欧洲拥有自己独立的卫星定位和导航系统,并赢得建立欧洲共同安全防务体系的条件。

“伽利略”卫星导航系统设计功能强大,具有 GPS 系统所没有的技术优势和服务范围。