



国际信息工程先进技术译丛

WILEY

无线通信系统中的 定位技术与应用

Positioning in Wireless Communications Systems

史蒂芬·山德 (Stephan Sand)

[德]

阿明·达曼 (Armin Dammann)

编著

克里斯汀·门兴 (Christian Mensing)

郎为民 王大鹏 王逢东 等译

Stephan Sand | Armin Dammann | Christian Mensing

POSITIONING
IN WIRELESS
COMMUNICATIONS SYSTEMS



WILEY

- 涵盖无线定位领域前沿发展成果，重点关注城市和室内场景的关键导航环境；
- 研究探讨了基于移动无线通信的定位技术的性能及相关问题的解决方案。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际信息工程先进技术译丛

无线通信系统中的 定位技术与应用

史蒂芬·山德 (Stephan Sand)

[德] 阿明·达曼 (Armin Dammann)

编著

克里斯汀·门兴 (Christian Mensing)

郎为民 王大鹏 王逢东 等译

机械工业出版社

本书从无线定位技术的原理入手,系统地介绍了无线定位技术的推导、算法、模型与应用,具有较强的参考性、专业性。全书内容共分为9章,第1章为绪论,主要介绍了几种典型的定位导航系统。第2章主要介绍了无线定位技术的原理。第3章主要介绍了定位参数测量和提取的过程。第4章主要介绍了四种典型的位置估计算法。第5章主要介绍了移动终端的位置跟踪方法。第6章主要介绍了无线系统定位涉及的场景和估计仿真模型。第7章主要介绍了几种高级定位算法。第8章主要介绍了几种典型通信系统中的无线定位算法。第9章主要介绍了各种基于无线定位技术的应用。本书材料权威丰富,体系科学完整,内容新颖翔实,知识系统全面,兼备系统性、实用性和指导性。

本书可作为电信运营商、技术投资商、服务提供规划者、设备开发工程师、物联网及互联网服务提供商、电信公司,以及无线服务提供商的技术参考书或培训教材,也可作为高等院校通信与信息系统专业的高校本科生、研究生教材。

Copyright © 2014 John Wiley & Sons Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled 〈Positioning in Wireless Communications Systems〉, ISBN 〈978-0-470-77064-1〉, by 〈Stephan Sand, Armin Dammann, Christian Mensing〉, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2014-5111 号。

图书在版编目(CIP)数据

无线通信系统中的定位技术与应用/(德)山德(Sand, S.)等编著;郎为民等译. —北京:机械工业出版社,2015.11

(国际信息工程先进技术译丛)

书名原文:Positioning in Wireless Communications Systems

ISBN 978-7-111-52065-8

I. ①无… II. ①山… ②郎… III. ①无线电定位 IV. ①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第265756号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:林 桢 责任校对:樊钟英

封面设计:马精明 责任印制:李 洋

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2016年2月第1版第1次印刷

169mm×239mm·15.5印张·318千字

标准书号:ISBN 978-7-111-52065-8

定价:79.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务 网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版 教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

近年来,随着无线技术的不断进步,无线定位技术也随之得到了较大的发展。从专用的导航定位系统,如GPS、伽利略等,不断扩展到移动通信领域,如GSM、UMTS、LTE等第2代、第3代乃至第4代移动通信技术,甚至在其他的一些短距离通信技术方面,如Wi-Fi、RFID、ZigBee、NFC等,也涌现出了大量的无线定位算法和应用。尤其是,随着智能终端的不断普及,大量基于无线定位技术的各种LBS应用出现在人们的日常生活中,丰富着人们的生活,绽放出无线定位技术的神奇魔力。

本书从无线定位技术的原理入手,系统地介绍了无线定位技术的推导、算法、模型与应用,具有较强的参考性、专业性。全书内容共分为9章,第1章为绪论,主要介绍了几种典型的定位导航系统,包括地面定位系统、卫星定位系统和GNSS增强系统以及一些与定位相关的术语和知识。第2章主要介绍了无线定位技术的原理以及与定位相关的参数和算法。第3章介绍了定位参数测量和提取的过程以及在无线定位中的推导过程。第4章主要介绍了四种典型的位置估计算法以及位置估计性能与标准。第5章主要介绍了移动终端的位置跟踪方法以及在动态位置估计中使用的各种滤波算法。第6章主要介绍了无线系统定位涉及的场景和估计仿真模型以及测量参数和建模算法。第7章主要介绍了几种高级定位算法,如混合数据融合和协作定位等,还介绍了影响位置估计性能的多径效应和非视距效应的缓解方法。第8章主要介绍了几种典型通信系统中的无线定位算法以及测量参数和位置估计性能标准。第9章主要介绍了多种基于无线定位技术的应用。

本书主要由郎为民、王大鹏、王逢东进行翻译,空军预警学院的黄美荣,国防信息学院的陈凯、张国峰、陈红、瞿连政、徐延军、张锋军、毛炳文、邹祥福、余亮琴、张丽红、王昊、李建军、夏白桦、蔡理金、高泳洪、靳焰、任殿龙、孙月光、陈于平、孙少兰也参与了本书部分章节的翻译工作,马同兵、王会涛绘制了本书的全部图表。和湘、李官敏对本书的初稿进行了审校,并更正了不少错误。同时,本书是译者在尽量忠实于原书的基础上翻译而成的,书中的意见和观点并不代表译者本人及所在单位的意见和观点。

由于译者的水平有限,加之时间上的限制,本书的翻译难免存在疏漏之处,敬请广大读者批评指正,译者在此深表谢意。

郎为民

2016年年初于武汉

原 书 前 言

随着智能手机和平板电脑的出现，例如苹果的 iPhone、iPad 和谷歌的 Android 设备，基于位置的服务已经被用户广泛使用。目前，这些服务使用的位置信息主要是由智能设备内置的全球定位系统（Global Positioning System, GPS）接收器提供的。通常，智能设备中的 GPS 只有在晴朗无遮挡的天空视野下，才能很好地工作。除 GPS 之外，智能设备还可以支持很多其他的通信技术，例如 GSM、UMTS、LTE、Wi-Fi、蓝牙和 NFC。这些通信技术在基于位置服务方面对 GPS 的功能进行了补充，尤其是在城市和室内环境中。因此，诸如苹果或谷歌等很多公司，已经开始利用 Wi-Fi 热点和蜂窝基站的 ID，提供一种快速（有时比较粗略）的首次定位。除此之外，监管机构，例如美国联邦通信委员会（FCC），也要求蜂窝通信网络运营商能够保证紧急呼叫及其中所需的测量位置的服务质量（参见 1999 年 FCC 文档）。因此，这种强烈的市场需求和监管法规极大地推动了当前和今后无线通信系统中的定位技术发展。

就个人而言，我们早在 1997 年就在德国航空航天中心（DLR）针对伽利略系统开展早期的信号设计方面的研究工作。2005 年，我们开始关注基于无线通信进行定位，尤其是使用蜂窝通信技术进行定位，以补充 GPS 和未来的伽利略系统。由于我们的背景知识主要是信息、通信和信号处理方面的理论，所以我们不是很熟悉定位及其相应的信号处理方面具体的挑战和要求。例如通信工程师通常使用延时为 0 作为起点的延时线，对无线信道进行建模。他们不会考虑首次到达路径延时。该路径与发射机和接收机之间的距离成正比，对确定移动终端的位置非常重要。因此，本书反映了我们在使用无线通信进行定位上的学习过程，同时通过多个定位项目，也传递了我们的工作经验。

本书分为 9 章。通过第 1 章和第 2 章，读者可以快速了解并熟悉基于无线通信的定位。第 1 章，介绍了过去、现在和未来的卫星与地面无线定位系统，适用于卫星定位系统的应用环境。第 2 章，讨论了基本的定位原则。这些原则是当今各种无线系统定位的理论基础。

第 3~5 章，介绍了通信技术和信号处理方面的知识，以便读者可以更深入地理解基本的定位技术。第 3 章，介绍了无线通信系统中定位相关测量项的参数估计问题及相关公式。第 4 章，介绍了在假设移动终端不移动的情况下，使用测量值估计移动终端位置的算法。第 5 章，将第 4 章的静态定位过程扩展到移动终端动态位置跟踪的应用场景。

第 6~9 章讨论了一些更加高级的有关无线通信定位的主题。首先，第 6 章，

详细讨论了卫星定位和无线通信系统定位工作的场景和环境。同时，还介绍了相应的无线信号传播模型和移动用户运动模型。其次，第7章，介绍了一些高级定位算法，例如卫星导航与无线通信定位混合数据融合、多移动终端协作定位以及多径与非视距效应缓解概念。随后，第8章，调查并统计了当前广泛部署和使用的以及今后将要部署和使用的基于各种无线通信系统的定位。最后，本书在第9章介绍了基于无线通信定位的各种应用。

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 绪论	1
1.1 地面定位系统	3
1.1.1 DECCA	4
1.1.2 LORAN	4
1.1.3 OMEGA	5
1.2 卫星定位系统	6
1.2.1 GPS	8
1.2.2 格洛纳斯	10
1.2.3 伽利略	11
1.3 GNSS 增强系统	13
1.3.1 差分全球导航卫星系统 (DGNSS)	14
1.3.2 广域增强系统 (WAAS)	15
1.3.3 欧洲同步卫星导航覆盖服务 (EGNOS)	16
1.3.4 多功能卫星增强系统 (MSAS)	17
1.3.5 GPS 辅助型静地轨道增强导航 (GAGAN)	17
1.4 关键环境	17
第 2 章 定位原理	21
2.1 传播时间	22
2.1.1 到达时间 (TOA)	22
2.1.2 到达时间差 (TDOA)	25
2.1.3 往返到达时间 (RTTOA)	27
2.1.4 圆形定位与双曲线定位对比	29
2.2 到达角 (AOA)	30
2.2.1 二维	30
2.2.2 三维	31
2.2.3 上行链路中的到达角	32
2.2.4 非视距传播问题	32
2.3 指纹	33
2.3.1 蜂窝小区标识	34
2.3.2 接收信号强度 (RSS)	35
2.3.3 功率时延谱 (PDP)	35
第 3 章 测量和参数提取	38

3.1 参数估计	38
3.1.1 估计问题	38
3.1.2 克拉美罗下限 (CRLB)	40
3.2 传播时间	43
3.2.1 时间估计的克拉美罗下限	43
3.2.2 高斯白噪声中的定时估计	48
3.3 到达角 (AOA)	55
3.3.1 均匀线阵天线	55
3.3.2 加性高斯白噪声中的 AOA 估计	58
3.3.3 AOA 估计中的克拉美罗下限	60
第4章 位置估计	64
4.1 三角测量法	64
4.1.1 理想情况下的三角测量法	64
4.1.2 误差测量下的三角测量法	73
4.2 三边测量法	77
4.2.1 理想测量下的三边测量法	77
4.2.2 误差测量下的三边测量法	78
4.3 多点定位法	82
4.3.1 理想测量下的多点定位法	83
4.3.2 误差测量下的多点定位法	84
4.4 指纹定位法	86
4.5 性能边界及评估标准	87
4.5.1 方均根误差	87
4.5.2 累积分布函数	88
4.5.3 圆概率误差	88
4.5.4 定位克拉美罗下限	88
4.5.5 精度因子	89
4.5.6 复杂度	92
第5章 位置跟踪	93
5.1 卡尔曼滤波	95
5.2 扩展卡尔曼滤波	98
5.3 粒子滤波	101
5.4 其他的扩展算法	106
5.4.1 网格算法	106
5.4.2 二阶扩展卡尔曼滤波算法	107
5.4.3 无迹卡尔曼滤波	107
5.4.4 高斯混合滤波算法	107
5.4.5 Rao-Blackwell 算法	108
5.4.6 地图匹配算法	108

第 6 章 场景与模型	109
6.1 场景	109
6.1.1 乡村环境	110
6.1.2 城市环境	111
6.1.3 室外向室内渡越	115
6.1.4 室内环境	115
6.2 信道特征	116
6.2.1 信道测量	116
6.2.2 射线跟踪	116
6.3 信道模型	118
6.4 移动模型	118
第 7 章 高级定位算法	122
7.1 混合数据融合	122
7.1.1 混合数据融合概述	122
7.1.2 多源衍生算法扩展	122
7.1.3 仿真结果	124
7.2 协作定位	126
7.2.1 协作定位概述	126
7.2.2 集中式协作定位实例	127
7.2.3 仿真结果	130
7.3 多径与非视距效应缓解	131
第 8 章 系统	133
8.1 GSM	133
8.1.1 系统参数	134
8.1.2 测量参数	137
8.1.3 TA	137
8.1.4 增强型观测时间差 (EOTD)	138
8.1.5 上行链路到达时间 (UTOA)	140
8.1.6 AGNSS	140
8.1.7 克拉美罗下限	141
8.2 UMTS	144
8.2.1 系统参量	144
8.2.2 测量项	146
8.2.3 Cell-ID 与增强型 Cell-ID	148
8.2.4 OTDOA	149
8.2.5 UMTS 与 GSM 比较	150
8.2.6 克拉美罗下限	151
8.3 3GPP-LTE	152
8.3.1 系统参数	154

8.3.2 测量项	157
8.3.3 同步	159
8.3.4 克拉美罗下限	160
8.3.5 性能结果	164
8.4 其他广域及中程系统	167
8.4.1 WiMAX	167
8.4.2 WLAN	168
8.5 短距离系统	171
8.5.1 蓝牙	171
8.5.2 ZigBee	173
8.5.3 UWB	174
8.5.4 RFID 与 NFC	178
8.6 标准化	179
第9章 应用	182
9.1 宏分集	182
9.1.1 蜂窝分集	182
9.1.2 蜂窝 OFDM 中基于位置的同步	188
9.1.3 位置感知自适应通信系统	193
9.2 无线资源管理	199
9.2.1 基于位置的小区间干扰协调	200
9.2.2 位置辅助中继选择方案	203
9.3 移动性管理	206
9.3.1 Wi-Fi 和 LTE 中位置辅助切换预测算法	207
9.3.2 场景	208
9.3.3 结果总结	209
9.4 紧急呼叫	209
9.5 基于位置服务	211
9.5.1 移动及位置感知广告	211
9.5.2 社交网络	212
9.5.3 导航与路线规划	212
9.5.4 手机游戏	213
9.5.5 其他突破性的应用	213
9.5.6 未来应用	214
参考文献	215
附录 英文缩略语	231

第 1 章 绪 论

位置确定是一门艺术，数个世纪以来，它一直吸引着诸多科学家。几千年前，人们在长途旅行中意识到知晓自身位置的必要性，于是第一种定位方法应运而生。诸如依靠山脉、河流、海岸线等天然地标就是针对定位用途的简单方法。早期的人造地标是围绕贸易往来修建的铁路和道路，如著名的丝绸之路，它大约修建于公元前 500 年，将欧洲和东亚连接起来。

其他人造地标包括灯塔。它们能够在单调环境（甚至是在夜间）中提供方向，但它只可以为相当靠近海岸线的船舶提供航向，而在外海上，这些地标将消失。通过测量方向和速度来跟踪旅程（我们称之为航位推算法），这是早期远洋航海家使用的一种简单方法。天文导航是利用众所周知的物体作为定位基准的另一种方法。

测量北极星与地平线之间的角度能够直接提供纬度。长期以来，困扰人们的一大难题是如何确定由地球自转导致的与时间精确测量值直接相关的经度。由于地球每天旋转 360° ，因而 4s 的守时偏差会导致 $1/60^\circ$ 的位置误差，它相当于赤道处的 1nmile（海里）（或 1.852km）。当时，经度问题非常严重，以至于人们提出若干种更为精确的经度测定方法。

1714 年，在前往西印度群岛的 6 周旅程中，英国政府分别为偏差为 60nmile、40nmile 和 30nmile 的经度确定方法奖励 1 万、1.5 万和 2 万英镑。诸如艾萨克·牛顿和爱德蒙·哈雷提出并推广了天文方法的使用，即用于时间确定的可预测天文事件。

相对于恒星或木星黄道的“月球距离”就是遵循了这一理念。精度足够高的计时器的发明解决了这一问题，并使得天文方法变得无关紧要。1761 年，约翰·哈里森于 1759 年建成的 H.4 航海天文钟，在前往牙买加的 5 周旅程中，时间偏差为 5s。

所有依赖于目测的方法都要求通视。如此一来，就将这些方法的可用性限制在一天的某个时间段或要求有良好的天气条件。19 世纪末，无线电波的发现，开启了无线电导航领域的大门。无线电信标充当了人造地标的角色。无线电频段提供了可见光之外的传播范围。取决于工作频段，无线电波可以穿透云层或雾层，甚至会像地面波那样传播很长一段距离，这解决了传播范围问题，即使对于地面无线电导航系统来说也是如此。如今，卫星导航系统能够覆盖全球，精度变化范围为几米。但是，一些定位原理仍然与传统地标或天文导航原理相同。

特别需要指出的是，存在着一些用于确定无线电波到达角（Angle of Arrival, AOA）的角量法。如今，无线电导航主要基于无线传播时间测量值，通过采用这

种方法，传播速度（光速）的知识提供了与无线电信标相关的距离测度方法。

近年来，针对消费类应用的精确卫星导航以及芯片组和导航接收机的民间可用性形成了导航市场迅猛发展的基础。这个市场增长表明，位置信息的可用性将会在当前和未来的移动信息系统中发挥越来越重要的作用。

人们能够以多种方式，来利用用户或移动终端（Mobile Terminal, MT）的位置信息。针对消费者和专业市场的导航服务可能是定位系统最知名的应用。人们将此服务划分为如下类型：

1. 定位：仅用于确定人员或物体的位置。
2. 跟踪：监视人员或物体的运动。
3. 导航：从起点到终点的路由和引导。

这些类型是根据辅助信息和相互依存越来越广泛的应用来列举的。作为实例，跟踪不仅需要目标位置的确定信息，而且通常还要结合该目标的运动历史和运动预测信息，以实现对目标轨迹更为精确的估计，而不是根据独立序贯位置测量值来实现跟踪目标。例如，地图可以提供与环境（尤其是交通基础设施）有关的附加信息。

这些信息支持路线规划，它与精确定位以及跟踪一起，是导航应用的核心。移动通信设备具有越来越强大的定位能力，它使得移动设备的信息变得无处不在。将定位和通信功能集成于单一通信设备中，使得位置应用和服务飞速增长。

服务提供商和终端用户不是从定位信息增值服务中受益的唯一群体。即使网络运营商，也能够充分利用移动设备的知识。对于无线通信来说，频谱是一种极其宝贵的资源，其可用性是不可或缺的。移动通信设备的位置信息支持通过资源管理、越区切换或路由过程的优化，来实现对通信资源的高效利用。

通信系统的算法，如将移动终端的位置信息考虑在内，以实现无线资源或位置和上下文感知服务分配的最优化，这是一个用于证明通信系统不同层中精确定位价值的典型实例。图 1.1 给出了一个简单实例，说明了位置信息的增值服务。移动终端穿过宏小区基站 BS_1 以及微微热点小区或毫微微热点小区 BS_2 所覆盖的环境。

热点小区，可能是无线局域网（Wireless Local Area Network, WLAN），它所提供的速率 d_2 比更大宏小区提供的速率 d_1 更高。在运动轨迹的 A 位置上，移动终端知道所处的热点，并启动切换过程。该过程需要花费一些时间，且在此期间，移动终端移至热点小区直到位置 B，但无法获得更高的数据速率 d_2 。在从位置 B 到位置 C 的运动过程中，可以利用数据速率 d_2 ，直到移动终端离开热点覆盖区域。

由于热点的规模较小，这一过程可能会发生得很快，因而对于无缝切换回宏小区的过程来说，时间并不充分。这一切换过程在位置 D 处完成。因切换时延导致的吞吐量浪费程度取决于与移动终端速度相关的热点小区大小。与移动设备和热点区域相关的信息使我们能够预测热点小区的进入和退出，并支持我们提高吞吐量。

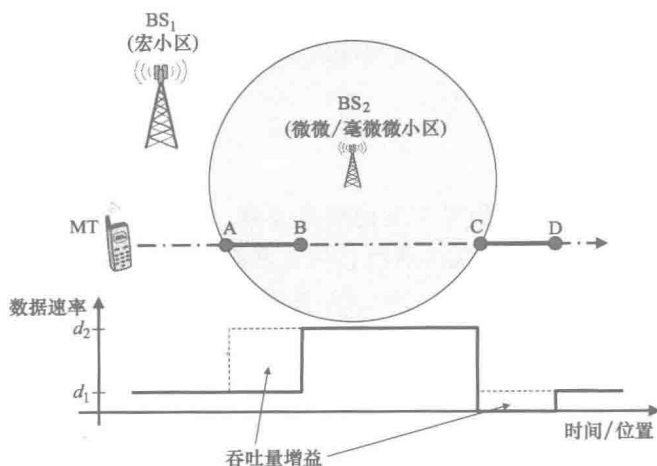


图 1.1 实例：切换过程

虽然地面通信系统不是主要设计用于定位的，但是我们可以使用该系统来获取无线接入网（Radio Access Network, RAN）中移动终端的位置信息。与定位系统相比，接收端传输信号的主要部分是未知的，该信号部分是从发射端到接收端传输的信息。

然而，当前的无线通信系统规定了众所周知的称为导频的信号分量，它可用于接收端，以实现同步和信道估计的目标。与定位系统类似，这些信号分量可用于传播定时测量值和定位信息。如前所述，此类系统主要被设计用于通信。这里，定时精度要求（特别是同步要求）通常比定位精度要求低。

本书重点关注用于定位的地面无线通信系统应用。在下一章正式讨论这一主题之前，我们对现有无线电定位系统和对定位系统至关重要的工作环境进行简要介绍。

1.1 地面定位系统

在卫星定位系统出现之前，从地面站发送的无线电信号可用于定位用途。地面定位系统面临的一大挑战是在特定约束条件下，如何实现足够高的覆盖率和精度。构建密集的地面无线电信标网络要么成本昂贵，要么根本无法实现（如在公海区域）。特别是对于海上定位来说，显而易见，用于无线电定位的发射机必须覆盖相对广阔的区域。

长波无线电频段内辐射的信号非常适于覆盖较大区域。信号主要依靠地波进行传播，也就是说，电磁波沿着地球表面进行传播。这使我们能够根据传播时间来测量其传播距离、用于测距的重要参数等基础的可测量信号值。这与短波频段形成鲜明对比，在这一频段中，信号在全球范围内以天波形式进行传播。

天波在电离层和地球表面之间被反射多次,这主要取决于电离层特性。然而,这些反射难以预测,且可靠的测距是无法实现的。因此,地面广域无线定位系统工作于长波频段(30~300kHz)。

1.1.1 DECCA

DECCA是由英国Decca公司开发的导航系统,该系统在第二次世界大战期间得以部署,主要部署在沿海地区的北海,用于实现海上导航。盟军需要一种用于精确登陆作战的系统。1944年6月,DECCA首次应用于诺曼底登陆战役。在登陆日的前一天,第一个DECCA站开始工作。二战后的DECCA民事应用主要体现在渔船或航空领域。2000年春,DECCA系统关闭。

DECCA定位系统是由大量站点组成的,这些站点形成了所谓的链。链通常是由1个主站、3个从站(用术语分别表示为“红”、“绿”、“紫”)构成的。在几何学上,从站位于等边三角形的顶点,主站位于该三角形的中心。

主站与从站之间的距离(即基线长度)约为20~60nmile。每个站点能够发送连续波信号。接收机将主、从信号的相位差进行比较。主、从站位置处双曲线的焦距分别描述了等价信号相位差的位置。我们可以将与3个主从对(“红”、“绿”、“紫”)相关的3种双曲线模式画在海图上。由相位差测量值得到的双曲线交点可以提供位置估计值。

对于4个站点(1个主站、3个从站)使用相同频率来发送连续波的情形,这是不可取的。在这种情况下,接收端的信号是不可分离的。因此,对于简单的信号分离,站点使用不同的频率。为了提供波形的简单相位关系,必须合理选择链中各站的工作频率。

为此,每个站点采用相位同步方案,其工作频率是标称频率 f_0 的倍数。人们将标称频率分配给某个链,因而能够提供该链的识别方法。主站和从站所使用的谐波分别是 $6 \times f_0$ (主站)、 $5 \times f_0$ (“紫”从站)、 $8 \times f_0$ (“红”从站)和 $9 \times f_0$ (“绿”从站)。典型工作频率为70~130kHz。这种双曲线定位方法与到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)原理密切相关,我们将在下一章中对其进行介绍。

DECCA系统白天的覆盖半径大约为400nmile(740km),夜间的覆盖半径降低到200~250nmile(460km)。DECCA系统的精度取决于双曲线的交角、仪器误差、传播误差(如因天波传播而导致的传播误差)以及航线宽度。需要注意的是,相位差仅在360°范围内是可测的,原则上这会产生歧义。所谓的航线是指对应于类似相位差的位置距离。白天的误差变化范围从基线的几米到覆盖范围边缘的1nmile。

1.1.2 LORAN

首个LORAN(Long Range Navigation, 远程导航)系统是由美国海军在第二次

世界大战期间发起的。它被称为 LORAN-A, 用于为太平洋和北大西洋区域中的船舶和飞机提供全天候导航服务。其扩展方案——LORAN-B 止步于试验阶段。1957 年, LORAN-C 投入使用。自 1958 年以来, 美国海岸警卫队一直使用 LORAN-C 系统。

1974 年, 美国决定逐步淘汰 LORAN-A 系统, 并将 LORAN-C 用作美国及阿拉斯加沿海水域的主要导航系统。LORAN-C 站点位于世界各地, 覆盖了北太平洋、北大西洋、北海、波罗的海、红海、波斯湾等地。苏联开发了一种名为 Chayka 的类似内陆导航系统。

与 DECCA 类似, LORAN-C 是以“链”的形式进行组织的, 它包含 1 个主站和 2~5 个从站, 这些从站相隔数百公里。与 DECCA 形成鲜明对比, LORAN-C 发送由固定方案调度的脉冲组。对于主站和从站的识别, 来自不同站点的脉冲以固定时延进行发送。可以对这些发射时延以及脉冲组重复间隔进行选择, 以确保信号不会在任何位置上发生重叠。LORAN-C 信号以 100kHz 载波频率进行传输, 覆盖范围可以达到大约 1000km。

图 1.2 给出了 LORAN-C 信号。正如参考文献 [LOR 1994] 所指出的, 在第一个 $65\mu\text{s}$ 内, 100kHz 载波的脉冲幅度迅速增大。其后缘在很大程度上取决于发射站点或设备, 可以对后缘进行控制, 以满足频谱需求。然而, 在 $500\mu\text{s}$ 后, 脉冲幅度分别降至峰值幅度的 0.14% (第 1 类) 和 1.6% (第 2 类)。LORAN-C 接收机能够确定传播时差。

与 DECCA 一样, LORAN-C 是一种双曲线 (TDOA) 方法。地面电磁波的传播速度取决于地球表面的特性。为了实现绝对理想的定位精度, 必须将这些附加二次因子 (Additional Secondary Factor, ASF) 考虑在内。良好接收机的精度可达到 10m 左右。如果不进行 ASF 修正, 则定位精度变化范围为几百米。

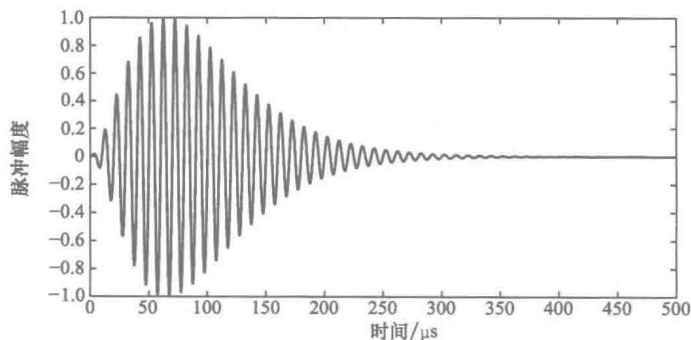


图 1.2 LORAN-C 脉冲

1.1.3 OMEGA

OMEGA 无线电导航系统部署的时候, 此时另一个卫星定位系统——TRANSIT

处于运行状态,且 GPS 计划已经存在。正是由于这个原因,人们将其看作是最后一个地面定位系统,因而以希腊字母表中最后一个字母来命名。在 1968 ~ 1997 年期间,人们使用该系统来实现全球覆盖范围内的船舶和飞机定位。

8 个 OMEGA 站 (A, B, ..., H) 分布于全球各地: (A) 挪威的阿尔拉岛; (B) 利比里亚的蒙罗维亚; (C) 美国夏威夷的俳句; (D) 美国北达科他州的拉穆尔; (E) 印度洋的留尼旺岛; (F) 阿根廷的新湾; (G) 澳大利亚; (H) 日本的对马岛。这些站点在甚低频 (Very Low Frequency, VLF) 频段 (10 ~ 14kHz) 发射信号。VLF 频段内的电磁波能够穿透海水,这意味着 OMEGA 系统也适用于潜艇导航。发射机覆盖半径可达 10000nmile (18500km)。由于覆盖范围广阔,因而站间距离可能会长达 5000 ~ 6000nmile (9300 ~ 1100km)。

8 个 OMEGA 站点采用固定适时的方案提供的频率来传输载波。传输周期为 10s。每个站点依次发送 4 种所谓的常见频率 (10.2kHz、11.05kHz、11.33kHz 和 13.6kHz),此外第 5 种频率是单一站点所特有的。OMEGA 接收机能够对相位差进行测量,因而这是一种双曲线定位方法。通过接收来自 3 个站点的信号,OMEGA 接收机能够将位置确定在 4nmile (7.4km) 的范围内。

1.2 卫星定位系统

每当谈论定位系统时,人们通常首先会想到美国国防部空军负责运作和维护的全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)。全球定位系统可能是目前最知名的、最具代表性的全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS)。

但是,还有一些正在运行的其他卫星定位系统,如俄罗斯格洛纳斯导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GLONASS) 或中国的北斗系统。目前,已规划或建设的卫星定位系统包括欧洲伽利略系统、中国北斗 (或北斗-2)、印度区域导航卫星系统 (Indian Regional Navigational Satellite System, IRNSS) 和日本准天顶卫星系统 (Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)。第一个基于空间的定位系统是美国交通系统。该系统的开发始于 1958 年,在 1964 ~ 1996 年期间处于工作状态。

卫星定位系统的前身是地面定位系统,如 LORAN、DECCA 或 OMEGA。与空间定位系统类似,这些系统主要设计用于定位用途,并应用了相关的位置确定原理。最基本的原理是无线电信号传输,即接收机可用于提取并估计与其相对于发射机的位置相关的特性。特别是,这些无线电信号的传播时间或时差可用于提取距离和位置。

空间部分 (或者简单称之为卫星) 是卫星导航系统的一个重要组成部分。对于空间导航系统来说,卫星轨道的选择取决于如卫星的能见度、覆盖范围、功率、发射成本等信息。高度小于 2000km 的近地轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 所需的发射成本和发射功率较低。

不过,对于每个轨道来说,大约每过 10min,才能看到一颗 LEO 卫星。因此,要实现全球覆盖,所需的卫星数较多。大气对此类卫星的影响也比较显著,这会导致卫星轨道的扰动现象。另一方面,高度为 36000km 的地球静止轨道 (Geostationary Orbit, GEO) 提供了一种静态卫星能见度,但所需的发射功率和发射成本较高。

由于 GEO 位于地球赤道上方,因而在赤道地区,仅需少量卫星即可实现良好的覆盖。然而,在高纬度地区,覆盖效果差强人意。诸如 GEO 的地球同步轨道 (Geosynchronous Orbit, GSO) 的轨道时间为 24h。根据其倾角和偏心率,他们可以提供区域性足迹,但能够覆盖高海拔地区。

作为一种理想折中,三种主要的卫星导航系统——GPS、格洛纳斯和伽利略的卫星运行于中地球轨道 (Medium Earth Orbit, MEO)。这些系统之间的轨道数目和分布以及各轨道内的卫星数目不尽相同。图 1.3 显示了忠实于原比例的 GPS、格洛纳斯和伽利略的轨道。除了卫星星座,对于 GNSS 可以实现的精度来说,详细的参数发挥着非常重要作用。表 1.1 对 GPS、格洛纳斯和伽利略的基本属性进行了比较。

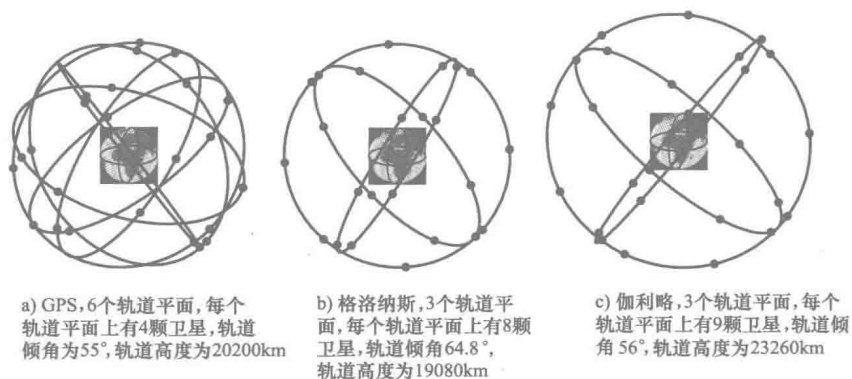


图 1.3 忠实于原比例的 GNSS 卫星轨道

表 1.1 全球导航卫星系统的比较

	GPS	格洛纳斯	伽利略
卫星数	24	24	30
轨道数	6	3	3
轨道半径	26560km	25440km	29620km
轨道时间	11h 58min	11h 55min 40s	14h 5min
倾角	55°	64.8°	56°
复用方式	CDM	FDM	CDM
代码类型	Gold 码 (C/A)	M 序列 (C/A)	分层码
代码长度	1023 (C/A)	511 (C/A)	4092 ~ 10230
码片速率	1.023Mchip/s	0.511Mchip/s	1.023 ~ 10.23Mchip/s
导航消息长度	12min 30s	2min 30s	10 ~ 12 min
调制方式	BPSK	BPSK	BOC、BPSK