

国防电子信息技术丛书

Global Positioning System
Signals, Measurements, and Performance, Second Edition

全球定位系统

——信号、测量与性能（第二版）

[美] Pratap Misra 著
Per Enge

罗 鸣 曹 冲 肖雄兵 等译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国防电子信息技术丛书

P228.4
13

全球定位系统 ——信号、测量与性能 (第二版)

Global Positioning System
Signals, Measurements, and Performance

Second Edition

[美] Pratap Misra 著
Per Enge

罗 鸣 曹 冲 肖雄兵 等译

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面地介绍了 GPS, 包括系统、信号、接收机、测量, 以及用以估算位置、速度和时间的算法。全书分为四部分: 第一部分介绍全球卫星导航系统的基础框架, 包括坐标系、时基参考和卫星轨道, 并概述 GPS、GLONASS 和 Galileo 系统; 第二部分描述 GPS 的重要技术——位置、速度和时间估算; 第三部分讨论富于创意的 GPS 信号结构; 第四部分阐述从信号中提取有用测量的处理技术, 并探讨射频干扰和信号阻隔所带来的挑战。本书所附光盘包含有在世界各地采集的 GPS 数据, 学生可用此数据进行上机实验。章后提供配套习题, 要求学生通过 MATLAB 编程来分析 GPS 数据。

本书可作为工科专业高年级或研究生的教科书, 也可作为应用工程师的自学教程。

Original English language edition copyright © 2006 by Ganga-Jamuna Press.

Chinese edition Copyright © 2008 by Publishing House of Electronics Industry.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission in writing from the Proprietor.

本书中文简体版专有出版权由 Ganga-Jamuna Press 授予电子工业出版社, 未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2007-1176

图书在版编目(CIP)数据

全球定位系统——信号、测量与性能: 第二版 / (美) 米斯拉 (Misra, P.), (美) 恩格 (Enge, P.) 著; 罗鸣等译.

北京: 电子工业出版社, 2008.4

(国防电子信息技术丛书)

书名原文: Global Positioning System, Signals, Measurements, and Performance, Second Edition

ISBN 978-7-121-06286-5

I. 全… II. ①米…②恩…③罗… III. 全球定位系统(GPS) IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 040901 号

责任编辑: 宋兆武 史鹏举

印 刷: 北京市李史山胶印厂
装 订:

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: 787×1092 1/16 印张: 28.5 字数: 729.6 千字

印 次: 2008 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 59.80 元(含光盘 1 张)

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。

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

服务热线: (010)88258888。

前 言

GPS 在很多方面与互联网类似。二者均为美国国防部带给民用世界的礼物,二者都在不断改变着个人和整个社会的日常生活与行为方式,二者对经济和社会的巨大贡献都远远超出设计者当初的梦想。当然,今天的互联网也在 GPS 的新兴应用中扮演着重要角色。

GPS 的主要发起人、开发者和维护者是美国军方。GPS 对军方的贡献可以用下面的事实例证:GPS 接收机将成为最广泛应用的军用无线电(尽管只是单向的),装备于每一架飞机、每一艘舰船、每一辆坦克、每一辆卡车、每一名士兵、每一枚炸弹,甚至每一发炮弹。在民用方面,也就是本书的重点,GPS 已成为几百万卡车司机、水手、飞行员、运动员和户外活动爱好者不可或缺的工具。即使在不太引人注意的方面,GPS 业已成为通信、银行、电力和互联网等系统的精密时间源。单片 GPS 将很快被嵌入每个手机和 PDA 中。

自 2001 年本书第一版问世以来,得到了广大教师和学生的热烈反响,对此我们深表感激。此次再版,我们订正、更新、修改和扩展了有关 GPS 的信号、测量和性能方面的内容。但是我们的宗旨并未改变:为工程和应用科学的学生提供优秀的教科书,为实践中的工程师们提供自学指南。

本书要求读者了解线性代数、数理统计、信号和系统理论。理想的准备工作是选修上述领域的高等课程。矢量和矩阵将被大量采用,随机变量的均值、标准差、方差和相关性等概念会被大量引用而未做详细解释。不过,在讨论 GPS 信号和接收机之前,本书将介绍信号与系统理论。

本书分为四个部分。第一、二部分有一些改动和扩展,但基本结构同第一版。第一部分安排 4 章,介绍全球卫星导航系统的基本架构,包括 GPS、GLONASS 和 Galileo。第二部分分 3 章讲述测量、误差和对位置、速度、时间的估算,这一部分最大的变化是对信号和接收机的讨论,这两个主题都被显著扩展了。第一版仅有 3 章的第三部分,现在扩展成了第三、四两部分,各由 3 章组成。

有关 GPS 信号和接收机的内容在广度和深度上都有了扩充。信号和系统理论中对我们的讨论有用的结果被放到了单独一章中(第 8 章)。现用整个一章专门阐述 GPS 信号结构,包括二进制偏移载波调制(第 9 章)。各有一章用于集中处理信号捕获和信号跟踪(第 11 章和第 12 章)。另外加入了新的一章来讨论信号阻隔和射频干扰问题(第 13 章)。

本书为教师们提供了几种选择来教授一学期的高年级本科生或研究生课程。两个简单的选择是:用第 1 章至第 7 章教授一门强调定位和导航的课程,或者用第 1 章、第 2 章和第 8 章至第 13 章教授针对信号和接收机的课程。无论哪种情况,我们都希望教师们将基本的导航算法或接收机设计扩展到某一个特别的应用,比如大地测量、航空、陆地导航或辅助 GPS 中。

第二版中附带的 CD 已被更新。作业中需要用到的 GPS 数据集和 MATLAB 工具(M 文件)基本未变。尽管如今互联网提供了大量在世界各地采集的、原始的或处理过的 GPS 数据,我们仍在 CD 中保留了数据以方便使用。GPS 相关文件也已被更新。

本书第一版中流露出对可用性选择(SA)的不满。SA 是美国政府在 20 世纪 90 年代采取的一项故意使民用信号降级的政策。随着 SA 逐渐成为记忆,民事用户已心满意足,似乎不再有必要去比较 GPS 潜在的性能和它在 20 世纪 90 年代为民事用户实际提供的性能。不过,作

为历史性记录,我们还是在第2章和第5章中保留了部分内容,来显示SA的影响,让新人了解来龙去脉。目前有很多对GPS工程师和用户有用的网站,我们在第二版中列举了一些作为参考。但是,既然是网站,它就存在在无事前通知的情况下突然关闭的可能。我们相信本书所列举的网站在本书的使用寿命期内应该都被保持和维护。

感谢在教学中使用过本书第一版并为我们提出改进意见的教师们。特别感谢 Penina Axelrad 教授, Dennis Akos 教授(Colorado University, Boulder), Kai Borre 教授(Aalborg University), Michael Braasch 和 Chris Barton 教授(Ohio University), Elizabeth Cannon 和 Gerard Lachapelle 教授(University of Calgary), Demoz Gebre-Egziabher 教授(University of Minnesota), Richard Langley 教授(University of New Brunswick), Jade Morton 教授(Miami University), Boris Pervan 教授(Illinois Institute of Technology), Marvin May 博士, Albert Paradis 博士(MITRE Corporation), John Racquet 教授(AFIT), Christian Tiberius 教授(TU Delft)。我们也非常感谢 Akio Yasuda 教授和他的研究团队(Tokyo University of Marine Science and Technology)将本书第一版翻译成日文。

感谢 Grace Gao 和 Fiona Walter(Stanford University)对本书手稿的审阅。感谢以下同事审阅本书的部分章节: Frank Bauregger 博士(Novariant), Amy Englehart, Jacob Sauer 和 Jay Sklar 博士(MIT Lincoln Laboratory), David Powell 教授(Stanford University)和 Frank van Diggelen 博士(Global Locate)。斯坦福大学和麻省理工学院的几位研究生也对本书做出了重要贡献。感谢斯坦福大学的 Keith Alter, Alan Chen, Seebany Dutta-barua, Michael Koenig, Guttorm Opshaug, Gang Xie 和 Alan Zorn 博士;感谢麻省理工学院的 Sean Bednarz 和 Tom Temple 博士。

Pratap Misra, Per Enge 2006.3.15

译 者 序

恰逢中国卫星导航事业起飞之时,我们非常荣幸有机会将 Misra 和 Enge 先生所著的“Global Positioning System, Signals, Measurements, and Performance”一书翻译、推荐给国内读者。这部在美国高校和卫星导航业界广为流传的著作全面地介绍了GPS,包括系统、信号、接收机、测量,以及用以估算位置、速度和时间的算法。本书可作为工科专业高年级或研究生的教科书,也可作为应用工程师的自学教程。

本书的翻译工作得以顺利完成,归功于团队内每一个人的辛勤付出。具体分工情况如下:曹冲(北京安华北斗信息技术有限公司,后简称安华北斗)翻译第1~4章;肖雄兵(安华北斗)翻译第5~7章;倪守韵(安华北斗)、梁娜(北京航空航天大学)共同翻译第8章;李辉(安华北斗)、刘学孔(安华北斗)、李冬航(安华北斗)共同翻译第9、10、13章;刘建军(安华北斗)翻译第11~12章。李辉(安华北斗)、刘学孔(安华北斗)翻译章后习题及图示说明。薛瑞(北京航空航天大学)帮助校对修改第7、11章;梁娜(北京航空航天大学)帮助校对修改第8、12章;张淼艳(北京航空航天大学)帮助校对修改第9、10章;李锐(北京航空航天大学)帮助校对修改第13章。罗鸣(斯坦福大学)负责全书的校译、补遗、修订和终审。

限于时间和水平,书中错误疏漏之处在所难免,欢迎和感谢读者指正!

译者 2008.4

目 录

第一部分 基 础

第 1 章 引言	2
1.1 导航简史	2
1.2 无线电导航方法	9
1.3 无线电导航系统	12
1.4 小结	19
习题	19
参考文献	21
第 2 章 GPS 在 2005: 概述	22
2.1 目标、政策和现状	22
2.2 系统总体架构	24
2.3 信号	28
2.4 接收机、测量和性能	33
2.5 差分 GPS (DGPS)	37
2.6 民事应用	40
2.7 GPS 概览	44
2.8 小结	46
习题	47
参考文献	50
第 3 章 未来的全球卫星导航系统	52
3.1 性能特点	53
3.2 频率分配	54
3.3 扩频码和测距信号	55
3.4 GPS 的现代化	57
3.5 GLONASS	61
3.6 Galileo	63
3.7 GPS、GLONASS 和 Galileo 3 个系统的兼容性和互操作性	66
3.8 GPS、GLONASS 和 Galileo 3 个系统联合星座的性能	67
3.9 小结	69
习题	69
参考文献	69

第 4 章 GPS 坐标系、参考时和轨道	71
4.1 全球坐标系	72
4.2 时间参考和 GPS 时	81
4.3 GPS 轨道和卫星位置的确定	89
4.4 GPS 卫星星座及其可见性展示	99
4.5 小结	102
附录 4.A 坐标变换	102
习题	106
参考文献	109

第二部分 位置、速度和时间估算

第 5 章 GPS 测量和误差源	112
5.1 测量模型	113
5.2 控制段误差：卫星时钟和星历	119
5.3 信号传播模化误差	120
5.4 测量误差	134
5.5 用户距离误差 (URE)	136
5.6 测量误差：经验数据	137
5.7 码和载波组合测量	139
5.8 减小误差：差分 GPS (DGPS)	142
5.9 小结	149
习题	149
参考文献	150
第 6 章 PVT 估算	153
6.1 基于伪距的位置估算	154
6.2 由伪距变化率求位置和速度	168
6.3 时间传递	170
6.4 小结	173
附录 6.A 参数计算	173
习题	176
参考文献	178
第 7 章 基于载波相位的精密定位	180
7.1 载波相位和整周模糊度求解：一个简单的模型	181
7.2 载波相位测量与精密定位	184
7.3 多余参数的消除	186
7.4 整周模糊度逐一计算	193
7.5 模糊度成组求解	199
7.6 精密单点定位	210

7.7 小结	213
习题	213
参考文献	215

第三部分 GPS 信号

第 8 章 信号与线性系统	220
8.1 概述	222
8.2 卷积	229
8.3 传递函数和基本函数	232
8.4 傅里叶级数	236
8.5 傅里叶变换	239
8.6 随机信号	251
8.7 拉普拉斯变换	257
8.8 小结	265
习题	265
参考文献	267
第 9 章 GPS 信号	268
9.1 L1 上的民用信号	269
9.2 自相关	275
9.3 互相关和信道共享	281
9.4 最长线性移位寄存序列	282
9.5 长度为 31 位和 1023 位的 Gold 码	284
9.6 功率谱密度	288
9.7 窄带射频干扰	291
9.8 L1 和 L2 上的 P (Y) 码	295
9.9 GPS 新的民用信号	296
9.10 双向偏置载频信号*	300
9.11 小结	304
习题	306
参考文献	306
第 10 章 信噪比和测距精度	308
10.1 信号路径损耗和发射天线增益	309
10.2 接收信号功率和接收机天线增益	312
10.3 噪声	315
10.4 GPS 接收机噪声分析	320
10.5 延迟锁定环和测距精度	323
10.6 有白噪声时的测距精度*	328
10.7 有信号反射 (多径效应) 时的测距精度	330

10.8 小结	335
习题	335
参考文献	336

第四部分 接收机

第 11 章 信号调整和捕捉	338
11.1 信号调整	340
11.2 信号捕捉	347
11.3 信号捕捉的统计分析	353
11.4 小结	359
附录 11.A 相关度量的矩	360
附录 11.B 非相关度量的密度和矩	361
习题	364
参考文献	365
第 12 章 信号的跟踪	366
12.1 信号跟踪器概述	367
12.2 延迟锁定环	373
12.3 锁相环	379
12.4 小结	387
附录 12.A 锁频环	387
习题	390
参考文献	390
第 13 章 应对射频干扰及信号阻塞	391
13.1 概述	393
13.2 地面无线电传播	399
13.3 天线	403
13.4 辅助 GPS	408
13.5 惯性辅助	414
13.6 单频干扰和自适应 A/D 转换器	425
13.7 小结	428
习题	428
参考文献	430
附录 A 光盘上的 GPS 数据集	433
术语索引	443

第一部分 基础

导航是一门从 A 点到 B 点的艺术和科学,它既能画出路线图,又能让你循路前行。这个主题有着悠久的历史。我们勇敢的祖先曾经靠着星星的指引,历尽艰险,漂洋过海;而星星并非时时可见。20 世纪的技术将人造的“星星”放到天空,几乎完全解决了这个问题。这些星星永远闪亮,发射着微弱的无线电信号。尽管强度不高,但这些信号的设计却极其巧妙,它提供的信息远远超过从前的水手在最清晰的夜晚所能看到的星星。

NAVSTAR 全球定位系统(GPS)是第一个开始运作的全球导航卫星系统。购买一个 100 美元的 GPS 接收机和一份地图后,只要天空视线良好,我们就不会迷路。或者,购买两个标价 5000 美元、功能更强的 GPS 接收机后,通过对测量的仔细分析,你能知道脚下的大地是否在你不经意间移动了几毫米。

在第一部分,我们将从学习 GPS 的基本原理入手。第 1 章是对导航历史的简要回顾,从遥望星空到测量无线电信号。第 2 章提供对 GPS 的概览,包括系统、信号、接收机、性能和应用。第 3 章简要描述了发展中的全球卫星导航系统,包括 GPS 的升级。第 4 章研究 GPS 的三个基本内容:坐标系、时间尺度和卫星轨道。

第1章 引言

1.1 导航简史

1.1.1 经度和时间

1.1.2 天文方法

1.1.3 20世纪的发展:惯性导航和无线电

1.2 无线电导航方法

1.2.1 三边测量法

1.2.2 双曲线定位

1.2.3 多普勒定位

1.3 无线电导航系统

1.3.1 地面无线电导航系统:Loran 和 Omega

1.3.2 卫星导航系统:子午仪、GPS 和 GNSS

1.4 小结

习题

参考文献

按照 Bowditch(1802)的说法,麦哲伦在其 1519 年的环球航行中,装备有“海图、地球仪、木制和金属制的测绘仪、木与青铜制的四分仪、指南针、磁针、沙漏和时钟,以及航行日志”。利用这些仪器和出色的个人技能,麦哲伦能估算出航行速度、方向和纬度,但不能估算出经度。250 年之后,海员们才能在海上确定经度。又经过了 200 年,即到了 20 世纪末期,人们已能够即时、连续、便宜、容易地精确估算出位置、速度和时间,这全要感谢 GPS。

GPS 代表着多项成熟于 20 世纪后半期并组合在一起的技术成果。其中,稳定的空间平台、超稳定原子频率标准、扩频信号和微电子技术,是 GPS 实现和成功的关键。这些技术用来实施古老的“三边测量法”定位,即通过测量到已知点的距离进行定位。

本章中,我们试图将 GPS 置于导航系统的历史中来描述。1.1 节将简述跨越千年的导航发展历程,终点是惯性导航和本书关注的无线电导航;1.2 节侧重于无线电导航的基本原理;1.3 节将叙述地面和卫星无线电导航在二战期间及战后的发展。

1.1 导航简史

我们从简要讨论以下 3 个领域开始。虽然这 3 个领域初看起来互不相关,但事实上,无论是在古代还是在现在,它们都是定位和导航系统的核心。

- 大地测量学,研究地球的大小和形状,以及地表测绘。
- 计时(或测时法,测量时间的艺术和科学)。
- 天文学(以及 20 世纪的航天学,太空飞行的科学与技术)。

为了能从 A 点到达 B 点,就必须知道用某种形式描述的每个点的位置,理想的方法是标示在地图上。为了达到这个目的,人类花费了近两千年时间,历经 16 世纪和 17 世纪商业化和殖民化的演进,以及 20 世纪的世界大战和冷战。现在标定地球上一个点的位置能达到毫米级精度,这是在数学、天文学和钟表制造业经历了循序渐进的巨大发展后才得以实现的。这是段迷人的历史,充满了令人难忘的人物和戏剧性故事,正如 Williams(1992)的精彩著述。本章我们只是简单涉猎几个主要概念,然后继续讲述 GPS 的历史。

早期的导航者和制图者依靠天体观测来确定时间和位置。这种依靠促进了对恒星和行星运动规律的研究。有趣的是,导航促进了 17 世纪和 18 世纪精确时钟的开发;而 20 世纪迅速崛起的电信产业推动了计时技术的迅猛发展,使角色最终发生了翻转,导致了以 GPS 为终极代表的新一代无线电导航系统的开发。

为了清楚地描述一个点的位置,我们需要一个参考系统,或坐标系。这并不是一个新的概念。两千年前,希腊人就知道地球是球形的,而且对其大小已有较好的估计。他们理解用南北方向偏离赤道多少度以及东西方向偏离子午线多少度的方法来表示地球上某一个点的位置(见图 1.1)。这个坐标系,经过一些细微修改,一直沿用至今。我们将在 4.1 节中对该坐标系加以讨论。

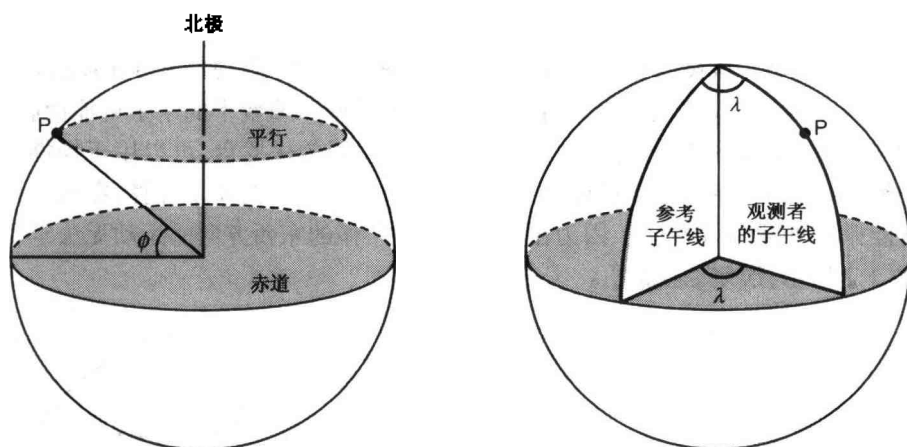


图 1.1 地心纬度(ϕ)和经度(λ)

一个点的纬度很容易进行定义和测量。以赤道为中心,南北两极各 90° ,距赤道等距离。纬度可以由北极星的仰角来测量(见图 1.2),或用最高处的太阳来测量。但确定经度要复杂得多,因为地球上不存在一条自然的、固定的线可以用来定义经度。但这并不妨碍人们选择某个方便的子午线作为参考子午线(子午面的定义是包含地心、旋转极和本地垂线的一个平面)。经度测量成为一种挑战,让 17 世纪和 18 世纪一些最伟大的科学家和工匠都投入其中。在陆地上确定经度的实用方法一直到 17 世纪 50 年代才出现,而海上的实用方法则一直到 18 世纪 70 年代才出现。

如同许多早期的航海者那样,哥伦布肯定知道纬度,虽然不一定清楚怎样精确地测量它。当然对他来说,测量经度是一个不可能实现的梦。而早期的探险者怎样跨越重洋?又怎样回到家乡的港口呢?答案是他们大多使用船向推算(DR)和航海技术,以及等量的勇气和运气。发现去新旧大陆的海上航线将获得极大的奖励。香料贸易在 15 世纪的欧洲成为热门,绕过陆

地线路上的中间商可以节省大笔开支。而只要水手们知道在加那利群岛之外如何航行,从非洲西海岸绑架人口贩卖,则更是有巨额暴利的生意。

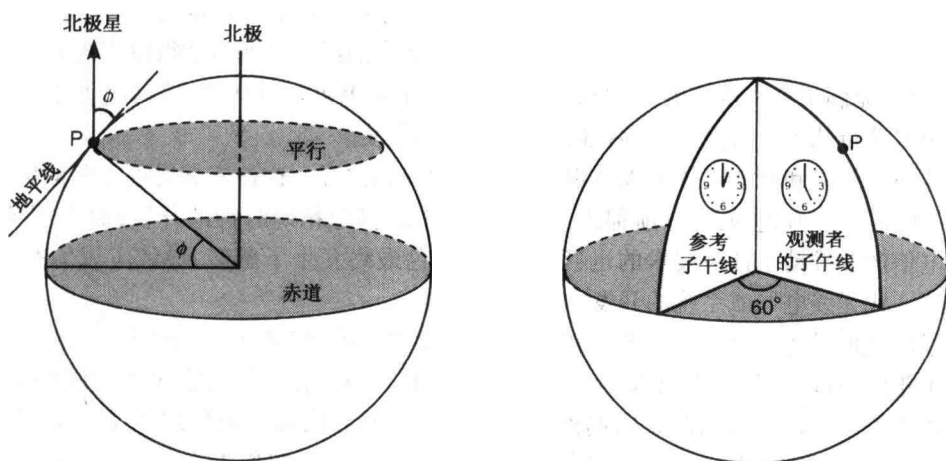


图 1.2 纬度与经度的测量

早期探险者用简单的理论进行导航,位置的估算是相对于出发点,通过记录每一段的航行方向和距离保持航迹。该技术称为航向推算(DR)。这个名字或许曾经是 deduced reckoning(演绎推算)的缩写。也许人们特意造出这个词来,以警告那些莽撞蛮干的水手可能面临的危险。航向推算需要测量方向、速度和时间。12 世纪在中国发明的磁罗盘,可以用于提供方向。距离的测量则是通过估计航行速度和时间。航向推算是矢量相加的简单计算,在球面上做二维(2D)距离推算时,问题就出现了。因为在不同纬度上所做的东西方向的运动无法重复同样的效果,如图 1.3 所示,误差也会累积。

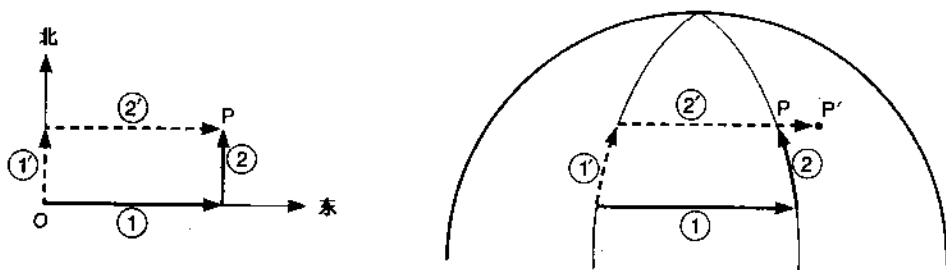


图 1.3 在一个平面和球面上的航向推算。在平面上航行者可以先北向或东向的顺序到达P点。在球面上北向的线会越来越靠近,因此航向推算要复杂一些[Williams(1992)]

还有一个问题是地球表面在平面上的投影。这个问题没有完美的解决方案,因为没有办法能够将曲面上的特征完全复制到平面上,必须放弃某些东西。1569 年, Gerardus Mercator (1512 ~ 1594)找到了地球球面向圆柱面的投影方法。用这种方法,从赤道到极点,经度的子午线和纬度平行线间的间隔用同样的比率展开。结果是,地图特征保持它们的形状,但大小会失真。投影的重要特点是,恒定方向上的航线看起来是一条直线。这个重要进步为导航者提供了一个用以绘制航程图的简单设备[Snyder(1984)]。

1.1.1 经度和时间

两地间的经度差直接与它们的本地时间差有关。地球绕轴旋转 360° , 耗时 24 小时, 或每小时 15° 。因此, 如果两地的本地时间差已知, 则可确定它们的经度差。两地本地时间差 1 小时, 转变为它们的经度差即为 15° (见图 1.2)。白天用太阳位置作为时钟, 晚上用星星位置作为时钟, 通过地球旋转可以测量本地时间。困难的是要在两个地方同一个时刻知道本地时间, 这是个巨大的挑战。两大阵营也因此就两条解决路线展开了一场持续了 200 多年的竞争, 一边是博学多才的知识分子和天文学家, 一边是长于发明的能工巧匠和机械师。

- **机械钟**: 在参考点用精确计时仪设置本地时间, 然后将其运到另一个地方与其本地时间进行比较。对于航海者, 这意味着在航行过程中, 保持其家乡港口的时间。虽然这个问题及其解决方案在理论上很好理解, 但是制图者和导航者不得不等待技术的发展。16 世纪初, 一个好的时钟每天的误差约为 10 分钟。考虑到 4 分钟本地时间差等于 1° 经度差, 经过数周航行, 航海者早已被搁浅在干旱的大陆了。精确计时仪的精度和可靠性必须比 16 世纪所能达到的更高, 这种方法才可实用。
- **天文观测**: 观测天体事件, 并与在参考点观测到同个事件的时间进行比较。在事件后数周和几个月, 制图者可以聚在一起做本地时间的比较, 从而确定经度差。为了将此方法用于导航, 需提前知道即将发生且能够在参考点观测到的天体事件。这意味着依靠过去的观测数据和解读天体运动来预测天体事件的发生时间。

在陆地绘图中两种方法得到组合应用。但海上精确测量天体很困难, 所以海上导航的努力主要集中于研制精确时钟, 后来称为天文钟。

精密计时仪设计中的关键性理论突破(钟摆控制器和平衡发条)由 Christiaan Huygens(1629 ~ 1696)在 1657 年实现, 从而使时钟的误差减小到每天 10 s 左右。显然, 无论怎样与船的运动隔离, 没有一个摆钟能够在巨浪奔涌的海上工作。解决方案是用发条驱动的无摆天文钟。木匠 John Harrison(1693 ~ 1776)在 1726 年建了一个摆钟, 每月的误差约 1 s。他的杰出贡献是于 1761 年海试的航海天文钟 4 号, 在 81 天的航程中仅误差 5 s [Brown (1956)]。英国国会于 1714 年颁布经度法令, 宣布航海天文钟 4 号因“发现海上经度”而获得 2 万英镑的奖金, 这在 18 世纪是个非常大的数目。航海天文钟在欧洲和美国的观象台一直使用到电报的出现。

应该指出的是, 在所有物理量中, 时间的测量精度和准确度最高 [Allan, Ashby and Hodge (1997)]。价值数千美元的时钟才能与 100 美元 GPS 接收机得到的时间精度相媲美。GPS 能将这种时间轻易地分发到全球, 就好像天空中有老祖父的精密时钟在工作一样。

1.1.2 天文方法

包括 Isaac Newton(1642 ~ 1727)和以彗星出名的 Edmond Halley(1656 ~ 1742)在内的科学家们曾力推一个与时钟技术竞争的、与月球轨道联系的方法。这个称为“月球距离法”的概念是通过探索月球相对于固定恒星而迅速变化的位置, 来确定时间和日期的。为了使该方法付诸实际, 需要在已知经度的位置上, 给出月球和某些星体之间的距离与本地时间的对照表。这样, 导航者可以将观测到月球掠过一个星体的时间与参考点上预测这一事件的时间进行比较。问题是未绘制星体的位置, 月球的运动也未被完全了解。为导航用途预测月球轨道是分别在 1667 年和 1675 年成立巴黎观象台和格林尼治观象台的原因。

计算星历表的前提是月球运动理论,即利用充足的观测数据,可以以足够精度预测相对于星星的月球位置。基于两体问题解决方案的牛顿理论(见 4.3.1 节),给出了 5 角分的误差,这个精度是不能被接受的。月球问题是个三体问题:月球围绕地球作旋转运动,地球又在绕太阳运动。Leonhard Euler(1707 ~ 1783)在 1748 年开创的理论解决了这一问题,并成为 18 世纪伟大的数学成就。虽然天文方法在竞争中先是败于天文钟,后来又输给了无线电,但支持者们却长期坚持不懈地努力,可惜它在海上从未得以实施(天文学家 Royal Nevil Maskelyne(1732 ~ 1811),月球距离法的拥护者,因企图夺走 Harrison 的经度奖而被一些人视为恶人)。

月球距离法不是基于天体观测的定位和导航的唯一方法。17 世纪早期望远镜的发展导致了木星的发现。当卫星越过木星后面的阴影时,从地球上可以看到它们的出现和消失。地球上所有观测者在精确的同一时刻见到这些月蚀。如果能精确预报月蚀,木星可作为天体钟用于确定经度。Galileo Galilei(1564 ~ 1642)确定了卫星周期,计算了卫星的运动表,向西班牙国王建议教航海者如何观测木星,从而求得他们所在位置的经度。Galileo 从事此课题直到他生命终结,但用此方法在海上确定经度一直没有实现。到 17 世纪末,木星卫星法成为法兰西王国用于陆地经度确定的官方方法。

17 世纪和 18 世纪,由于天文导航的需求,海上精密测角技术也得以发展。Robert Hook 的反射式四分仪和 Newton 的八分仪均是在 17 世纪后半叶发明的,这些仪器革命性地将星星与地平线放到一起,一个是直接看到的,另一个是通过反射镜看到的。四分仪、八分仪(最终为六分仪)装备有望远镜、反射镜、棱镜和游标尺,作为精密仪器而开发。18 世纪末,天体导航的基本单元已经就位:六分仪测量地平线上天体的仰角,精确的时钟确定观测的时间,历书可以找到预报的天体位置,磁罗盘确定方位角,并保持天体观测间的航线的连续性。

19 世纪,木船已做成铁外壳。由于船的磁性和所装货物对磁罗盘工作造成干扰,需要非磁性罗盘取而代之。这个问题一直到 20 世纪早期发明了陀螺罗盘后才得以解决,后面将做简要讨论。

1.1.3 20 世纪的发展:惯性导航和无线电

20 世纪早期的两大事件预示着技术发展方向。第一个是 1901 年无线电信号以莫尔斯码方式成功发送字母“S”跨越大西洋(从英格兰到达纽芬兰),这一功绩应归功于 Guglielmo Marconi(1874 ~ 1937),20 世纪因此成为无线电世纪。第二个事件是 1903 年美国的怀特兄弟实现了航空飞行,20 世纪于是又成为航空世纪,但是无线电不可或缺。搭载数百名乘客的喷气式飞机依靠无线电导航(nav aids)和惯性导航系统飞越半个世界,并通过无线电信号引导起落于云雾遮蔽的狭窄跑道。核动力潜艇不仅用惯性导航进行导航,而且用它为导弹提供初始位置、速度和方位角。在本节中,我们将简要描述惯性导航和无线电导航。

制导和定位系统分类

下面让我们指导性地对新老导航系统进行分类:

- 航向推算系统,我们已经谈及,下面进一步做简要讨论。
- 制导系统,它能给用户提供了到达目的地的可控航线,但无须预先知道目的地的位置。例如灯塔和无线电信标。在能见度差的情况下,仪表着陆系统(ILS)和微波着陆系统(MLS)可用于飞机着陆,它们均是无线电制导系统[Forsell(1991),Enge et al.(1995)]。用于导引防空导弹的热传感器也是制导系统。上述这些系统本书不予讨论。

- 定位系统,它能确定在定义好的坐标系中的用户位置,如 Loran、Omega 和子午仪,它们在本章中会有简要讨论。作为本书主题的 GPS 也是定位系统,实际上,GPS 比定位系统做得更多,它还提供速度和时间。

惯性导航

陀螺仪是个简单的旋转体,通常安装在万向支架上,所以其旋转轴能自由地转向任何方向。陀螺仪的优点在于,如果它的旋转轴指向某一颗星,在地球旋转、星星视在位置改变的情况下,它能继续指向该星。换言之,旋转轴能保持其空间(或惯性空间)方向。陀螺仪的概念在 19 世纪中期就已形成,但是精密度足以导航的陀螺仪一直到 20 世纪才出现。指北的陀螺仪又称为陀螺罗盘。

陀螺仪能提供一个稳定的平台或惯性平台,能在空间保持其指向,这个特性导致了惯性导航系统(INS)的形成。INS 主要由 3 个加速度计组成,安装在稳定的平台上,相互呈正交。仪器测量旋转和加速度,并保持对其跟踪。测得的运动体的旋转(偏航、俯仰、翻滚)与稳定平台的指向进行比较。系统通过对加速度分量进行实时数字积分得到速度分量,再次积分则得到现在的位置坐标。INS 是个小型的自主系统,对军事用户尤其有吸引力。飞机、潜艇、空间飞行器和导弹全要依靠 INS 进行导航,对这一技术在 20 世纪所起的作用怎么评价也不为过。

INS 是个航向推算系统,存在误差累积。中等精度的 INS 在 1 小时内累积的位置误差为 2 km,需要用通过其他方法得到的精确位置估算对其进行位置更新,例如用星星瞄准,近年来用 GPS。GPS 和 INS 是互补技术,一个的优点,正是另一个的缺点:GPS 抗人为或自然干扰的能力弱,INS 则不受影响;基于 INS 的位置估算存在累积误差,GPS 不存在这种可累积的漂移,INS 可用基于 GPS 的估值进行重置清零。INS 和 GPS 的集成造就了极具吸引力和高可靠性的导航系统,即使 GPS 因信号干扰出现故障或卫星信号短时中断,系统仍能保持正常运行[Farrell and Barth(1999)]。

惯性技术最近激动人心的发展是实现了微机械和硅基惯性传感器的制造(通过集成电路制造方法)。微加速度表已经成百万数地生产,目前尚未用于导航,其主要市场是汽车安全系统,特别是安全气囊装置。微机械陀螺仪用于测量旋转角和角速度,已应用于汽车市场(如驾驶稳定性和翻滚检测器)和消费设备(如视频照相稳定性、轮椅平衡和机器人),但目前的精度还不足以导航。在未来几年里,微机电系统(MEMS)很有可能与 GPS 集成而被应用于民用和军用的广阔领域。

无线电导航

无线电导航系统利用了无线电波传播的基本原理,对此本节将加以概述。无线电波对应的电磁波频率为 10 kHz ~ 300 GHz,其中 Hz(Hertz)是频率的单位(每秒周期数),前缀 k 表示 kilo(10^3),M 表示 mega(10^6),G 表示 giga(10^9)。无线电频率为了方便命名又分为频段/带(见表 1.1)。电磁波在自由空间中的速度 c 近似为 3×10^8 m/s,波长以米表示,为 c/f ,其中 f 为频率,单位为 Hz。波长在 0.1 ~ 10 cm 范围的无线电波称为微波。

电磁频谱是宝贵且有限的资源,对其使用有许多不同应用间的竞争。它还是一种脆弱的资源,人们在 20 世纪早期已认识到对这一资源的利用需要合作与规划,并于 1934 年成立了国际电信联盟(ITU),现在已成为联合国的专门机构。ITU 的使命是在分配无线电频率给不同用户群时达成国际一致意见,以免互相干扰。

表 1.1 无线电频率分类

频带	频率	波长
甚低频(VLF)	< 30 kHz	> 10 km
低频(LF)	30 ~ 300 kHz	1 ~ 10 km
中频(MF)	300 kHz ~ 3 MHz	100 m ~ 1 km
高频(HF)	3 ~ 30 MHz	10 ~ 100 m
甚高频(VHF)	30 ~ 300 MHz	1 ~ 10 m
特高频(UHF)	300 MHz ~ 3 GHz	10 cm ~ 1 m
超高频(SHF)	3 ~ 30 GHz	1 ~ 10 cm

ITU 将电磁频谱分为频段,赋予各个频段不同的无线电服务。竞争频率分配的无线电服务包括导航、电话、电报、雷达、TV、调幅(AM)、调频(FM)、移动通信和各种卫星通信(卫星对卫星、卫星对地面和地面对卫星),以及其他服务。关键是要在没有互相干扰的情况下达到其最大应用价值,这并非易事。随着移动通信爆炸式的发展,这些服务的潜在供应商们正为得到大部分的频谱而激烈竞争。在美国,国家电信与信息部(NTIA)负责颁布与政府用户相关的频谱政策、规划和技术标准。联邦通信委员会(FCC)负责管理非政府用户的频谱应用。

无线电信号在自由空间中以直线方式光速传播。所谓自由空间是指没有电磁场、没有障碍物的理想空间。太空满足这些条件,而地球大气层却不满足。取决于信号频率及环境,信号在地球大气层中的传播可能非常复杂。

就像光一样,无线电信号在地球环境中传播时会被地表、建筑物、水面等反射,穿过密度不同的媒质时会被折射,它也能像光一样衍射和干涉,信号穿过地球大气层时会被减弱。

甚高频(VHF)及以上频率的无线电信号以直线传播,无法传到地平线以外。高频(HF)以下频率的无线电信号在大地上以地球的曲率传播,这称为地波。HF 及其以下频率的无线电波也会被称为电离层的电离大气层反射(见 5.3.2 节),这称为天波。这些信号波束投射到天空,反射之后回到地球,有时会到达很远的距离。卫星通信之前,地波与天波无线电提供超地平传播应用(见图 1.4)。

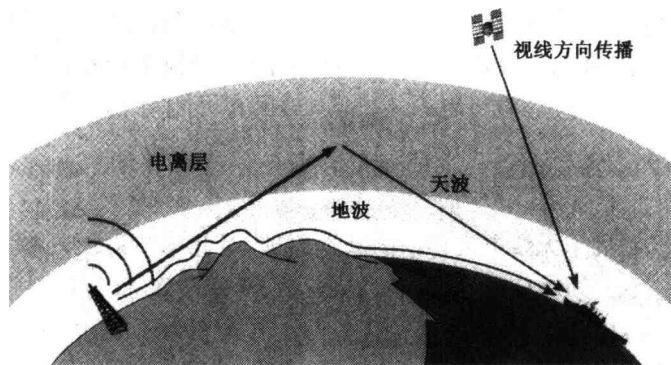


图 1.4 无线电波的传播

我们知道,为了用于导航,信号的传播时间和传播条件,必须是可预测和可重复的。在地波模式中,信号受到地面的影响:山脉、沙漠、雪、咸水、湖泊和农田,均具有明显的特性,其传播速度基本稳定,传播损耗适度。天波可以在很远处收到,但电离层的反射高度并不是恒定的,因此给信号传播时间带来了不确定性。