



装备科技译著出版基金



高新科技译丛

Digital Satellite Navigation and Geophysics
A Practical Guide with GNSS Signal Simulator
and Receiver Laboratory

数字卫星导航与地球物理学
——GNSS信号模拟器与接收机实验室实践指南

【俄】Ivan G. Petrovski 【日】Toshiaki Tsujii 著
王伯昶 王继祥 任翔宇 译

CAMBRIDGE



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

高新科技译丛

数字卫星导航与地球物理学

——GNSS 信号模拟器与接收机实验室实践指南

Digital Satellite Navigation and Geophysics:

A Practical Guide with GNSS Signal Simulator and Receiver Laboratory

[俄] Ivan G. Petrovski 著

[日] Toshiaki Tsujii

王伯昶 王继祥 任翔宇 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2016-047 号

图书在版编目(CIP)数据

数字卫星导航与地球物理学:GNSS 信号模拟器与接收机实验室实践指南/(俄罗斯)伊万·G.彼得罗夫斯基,(日)敏明辻井著;王伯昶,王继祥,任翔宇译. —北京:国防工业出版社,2017.10

书名原文: Digital Satellite Navigation and Geophysics: A Practical Guide with GNSS Signal Simulator and Receiver Laboratory

ISBN 978-7-118-11025-8

I. ①数… II. ①伊… ②敏… ③王… ④王… ⑤任…
III. ①卫星导航-全球定位系统-信号处理-模拟器-实验-指南 ②卫星导航-全球定位系统-信号处理-接收机-实验-指南 IV. ①P228.4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 177649 号

This is a Simplified Chinese translation of the first title published by Cambridge University Press:
Digital Satellite Navigation and Geophysics: A Practical Guide with GNSS Signal Simulator and Receiver Laboratory by Ivan G. Petrovski and Toshiaki Tsujii

ISBN 978-0-521-76054-6

Cambridge University Press 2012

This Simplified Chinese translation for the People's Republic of China(excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and National Defense Industry Press 2017.

This Simplified Chinese translation is authorized for sale in the People's Republic of China(excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorized export of this Simplified Chinese translation is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and National Defense Industry Press.

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 18 字数 332 千字

2017 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

译者序

《数字卫星导航与地球物理学——GNSS 信号模拟器与接收机实验室实践指南》一书在理论学习和实践工作之间架起了一座桥梁,它清晰、实用地介绍了全球导航卫星系统的理论,重点是 GPS、GLONASS、QZSS 等卫星导航系统和日本卫星系统及其在导航和大地测量中的主要应用。

本书的内容是作者 25 年来在全球导航卫星系统领域工作的经验总结,无论您是一位工程师、研究人员还是学生,都将获益匪浅。通过使用与本书捆绑的实时软件接收机和信号模拟器,您可以获得实用性很强的经验,它可以帮助您创建自己的全球导航卫星系统实验室,从而使您能够进一步研究和学习。

本书提供了许多实际工作的例子和设计案例的研究,您可以使用实际的卫星信号或由信号模拟器产生的信号来检验这些实例,同时本书还涵盖了全球导航卫星系统信号在大气传播中的相关问题,以及它们在地球物理学中的应用,包括电离层层图、大气监视、闪烁测量、地震预测等。

译者

2017 年 1 月

序

在我 9 岁的时候,当我完成了第一台晶体管收音机组装后,我便对无线电技术产生了浓厚的兴趣。截止到青年时代,我已经组装了多种收音机,包括短波接收机。通过组装和维修这些无线电设备我学会了接收机的工作原理。后来我了解到著名的美国物理学家理查德·费曼也是在十一二岁时对无线电产生兴趣的,那时他总是喜欢买一些便宜的无线电零部件,然后再把它们组装起来,这也是他学习无线电工作原理的方法,就像他在 *Surely You're Joking Mr. Feynman! —Adventures of a Curious Character* 一书的第 1 章中所描写的那样:“设备简单,电路不复杂,了解内部工作原理,注意一些容易出错的地方,安装过程对我来说并不难”。正如人们知道的那样,费曼用毕生的经历致力于发明,他要解开量子力学理论在自然界中的秘密。

我对无线电、电子和物理学的热爱使我最终进入了测绘和精确导航的教学与科研领域。在过去的数年中,我已经参加了许多主要的基于无线电的太空探测技术。作为一名博士生,我参加了超长基线干涉测量法(VLBI)和卫星多普勒(美国海军导航卫星系统与发射)的研究,在麻省理工学院中作为博士后,我进行激光测距测量方法研究,并把它应用到第一个民用定位接收机——光学测距仪。当 1981 年我进入新不伦瑞克大学测量工程系时,他们又重新应用卫星多普勒理论解决问题,但是过了一两年后,GPS 采用了我的意见,从此研究 GPS 成了我的唯一兴趣。

当我的大部分有关 GPS 的文章被期刊、一些专业会议和《GPS 世界》杂志发表后,我很幸运地作为第一作者和别人合作编写了 GPS 的教科书:《GPS 定位指南》。该书由加拿大 GPS 联合会在 1986 年出版,这是卖得最好的技术书籍,光英文版本就卖了 12000 册。

自从第一本有关 GPS 的书籍出版后,在 GPS 领域又应用了一些新的技术,事实上,随着俄罗斯的 GLONASS 卫星导航系统,还有欧洲的“伽利略”系统的初始开发,中国的“北斗”系统、日本的 Quasi-Zenith 卫星系统(QZSS)和大量基于卫星的应用系统的同时发展,现在我们需要利用这些“地球卫星导航系统”。GPS 本身也正在利用现代信号处理、新的卫星设计和新的地面接收站技术来发展自己。

大量涉及 GNSS 领域的研究成果及时在期刊和会议上发表,但是对于这些论文来讲,最典型的是专家对专家的讨论,对一些学生来讲是很难领会的,特别是那些刚刚进入此领域的学生,这时需要比较好理解的有关 GPS 和其他 GNSS 的教科

书(当前有几种正在出版之中),这些教科书应简单地介绍 GNSS 的工作原理,但目前几乎没有一本书适合于指导实践活动,因此现在的学生正重复着我以前做过的事,先从最基本的无线电工作原理学起。现在的 GNSS 接收机都是很复杂的设备,且大部分不适合当作教学工具。

和那些新书比较,伊万·G. 彼得罗夫斯基和敏明辻井撰写的《数字卫星导航与地球物理学——GNSS 信号模拟器与接收机实验室实践指南》一书缩小了与那些教科书的差距,此书不仅清楚地描述了 GNSS 信号的产生和接收机接收信号的处理原理,而且还增添了 GNSS 信号的软件仿真和 GNSS 软件接收机的内容。现在通过实践可以学习 GNSS 的工作原理,经过学习信号设计、发射、传播或接收的其中一个方面,学生可以仿真它们,而且可以看到接收机的反应,并能够很快看到仿真的结果。

本书的书名揭示了它的部分特性,作者以数字一词开头,细致清晰地描述了 GNSS 信号的产生、传输和接收,尽管 GNSS 信号被调制到模拟载波上去,但信号形式是数字式的,而且在现代接收机中,接收机的前端都有 A/D 转换器,将模拟信号转换成数字信号,以便于在基带以数字信号形式进行处理。作者讨论了 GNSS 信号在卫星和信号模拟器中产生和接收机前端的处理过程,包括 A/D 转换器、基带处理器,并用 GPS、GLONASS、QZSS 和“伽利略”卫星为例对上述问题进行了讨论。

使用卫星导航和地球物理学的科技人员分为两类:一类是需要导航的人员,他们需要定位服务,可以通过在一个频点上使用伪距测量以获得米级水平的高精度用户,包括大地勘测员、工程师;第二类是那些需要更精确地利用载波相位进行测量的科学家,比较典型的是使用两个频点,获得更精确的厘米级定位是他们的目的。本书作者不仅描述了 GNSS 的各个环节,而且还讨论了更多的内容,包括地球物理学、怎样利用 GNSS 监视电离层闪烁、地球自转和地球板块运动情况等。

在最后的实践指南章节中,作者不仅提出了 GNSS 信号在理想条件下的产生和处理过程,而且讨论了接收机怎样适应不同外界环境的影响,如电离层扰动和多径等。这些因素的影响都可以用软件信号模拟器和接收机来仿真。作者提供了几种情况下的研究且在大部分章节的末尾提出了将来的研究计划。本书的实用特点是提出了研究计划、工作流程图和时间节点,在每个章节都讨论了 GNSS 接收机原理和应用之间的关系。

伊万·G. 彼得罗夫斯基和敏明辻井是全球卫星导航系统领域的专家。彼得罗夫斯基在这个领域已经工作了 30 多年,他作为教授在美国航天科技大学工作,并于 1997 年被日本科学和技术协会邀请去航天实验室工作;他在 GNSS 技术领域又是研究和发明的领导者,而且是东京海洋科学技术大学先进卫星定位学院的院长。从 2007 年秋天,他在日本东京基于 iP 开发了卫星导航定位系统软件接收机、信号模拟器和瞬间定位技术。

敏明辻井长时间从事 GNSS 工作,作为日本航空搜救代理处操作和安全技术

领域导航技术部门的领导,他从事卫星导航和定位领域研究的时间超过 20 年,特别是机载 GNSS。他的研究团队主要从事飞船载和直升机载导航系统的应用研究。

撰写文章《GPS 瞬时导航》时,我很荣幸地和彼得罗夫斯基和敏明辻井两位大师都共同工作过。这篇文章发表在期刊《我的 GPS》的创新板块上,它标志着全球卫星导航系统技术的一个重大进步,这篇文章介绍了一种 iPRx 的快照软件接收机,它能够使全球卫星导航系统进行瞬时定位。它讨论了一种利用接收机产生信号的新方法,ReGen 信号发生器是这种接收机的组成部分。

我像理查德·费曼一样,也总是喜欢发明,如天为什么是蓝的或大气层如何影响到 GNSS 信号?并且在介绍新的信号结构的同时也介绍新的截获和跟踪信号的方法。我相信这本书对我将一直从事的 GNSS 接收机的研究工作会有所帮助。

理查德·B. 兰利(Richard B. Langley)教授
加拿大新不伦瑞克大学测绘工程系

前言

本书内容是关于全球导航卫星系统(GNSS),涉及两个主要设备——接收机和模拟器,以及它们的应用。书中的内容都是基于现有的实时软件 GNSS 接收机和 GNSS 信号模拟器,这些工具的学术版随书免费赠送,读者可用于学习与研究。

GNSS 或许不是人类不同技术成就结合的唯一成果。为了更好地了解一个系统,需要从宽广的视野观察它。因此,我们通常试图从不同的方面提出 GNSS 的理论,不仅能让大家更好地了解 GNSS,而且可以让其他领域的专家很好地应用。

本书的章节结构如图 0.1 所示。第 1 章描述了利用 GNSS 的通用方法。第 2 章介绍了 GNSS 卫星和轨道构成。第 3 章讨论了 GNSS 信号及其在卫星、模拟器和伪卫星中如何产生。第 4 章、第 7 章和第 10 章描述了 GNSS 信号传播问题。其中:第 4 章主要讲述 GNSS 信号与其他电磁信号的关系,以及对信号传播的特殊影响;第 7 章主要涉及多径问题;第 10 章专注于信号抖动这一有趣的问题。第 5 章和第 6 章详细描述了 GNSS 软件接收机和基带信号处理器。第 8 章讨论了多种 GNSS 观测的建立和改进问题。第 9 章、第 11 章、第 12 章讨论了这些观测如何应用在导航和地球物理学中。

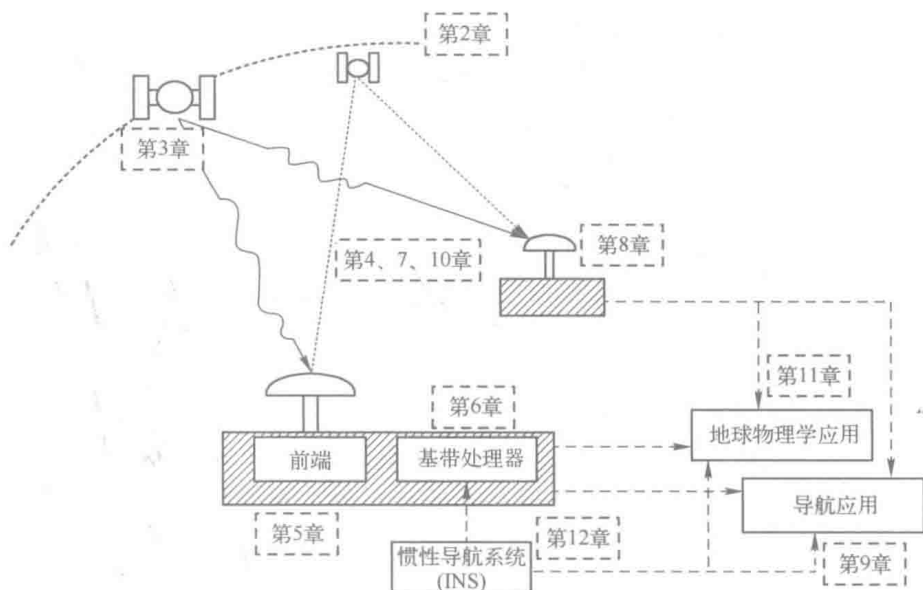


图 0.1 本书的章节结构图

首先要讨论的 GNSS 是美国的 GPS,这是卫星导航和地球物理学的主要工具。我们也要讨论俄罗斯的 GLONASS, GLONASS 在几年后发射了部分卫星,现在已经

进入到了应用状态,不仅可以提供足够的覆盖,而且在 L2 和 L3 频段发射新的信号。即使在 GLONASS 部分可用期间,它也一直应用于大地测量中。目前,GLONASS 已经应用于手机、汽车导航等市场。本书讨论“伽利略”卫星导航系统的篇幅有限,因为我们认为该系统没有完全建成,其信号结构、设计甚至是一些概念,特别是相关的开放性和信号接入限制也许都不会改变。但我们认为本书也为从事“伽利略”系统应用研究的读者提供了足够的 GNSS 信息。

本书的创新主要体现在以下几个方面:

(1) 我们已经尝试在实践和系统设计上更接近于 GNSS 理论和技术,在实验基础上,开发了可使用的软件,研制了应用在航空领域的 GNSS 接收机和信号模拟器。

(2) 本书附带有免费学术版的实时软件接收机和信号模拟器。

(3) 为有兴趣的用户展示了可用的、与赠送软件匹配的硬件。例如,获赠软件的用户可以利用实际卫星实时定位。

(4) 书中网站提供预录的飞行测试数据,包括 GPS 信号记录和相对应的惯性导航系统(INS)原始数据输出,读者按照本书的例子和方案用接收机处理这些数据。

(5) 本书中还给出了 GNSS 信号模拟器的设计,通过介绍 GNSS 模拟器的工作流程,也相应地描述了实时卫星的工作流程。信号模拟器广泛应用于系统研发、测试和制造中。

(6) 我们也尽量提高本书的趣味性,在 GNSS 的哲学和物理背景中隐藏着许多有趣的事实,很少有或根本没有人去讨论这些。

(7) 我们也试图调整本书的结构,使之尽可能对学生和有经验的工程师都一样有用,本书包含了有助于深入理解 GNSS 的必要资料。

(8) 本书针对不同的重要现象尽量给出清晰的物理解释,例如:为什么 GNSS 的码延迟和相位超前的数值相等而符号相反,为什么电离层闪烁的幅度和相位的互相关是负数,等等。

最后,我们要感谢那些帮助过我们的朋友和同事们。首先我们感谢为本书提供资料的朋友和同事们,特别是:

(1) Rakon 公司的 Graham Ockleston 先生,他不断给予了专业性很强的支持,并提供了直观的资料。

(2) 奎介松永先生、北斋藤进博士和许多工作在电子导航研究所(ENRI)的同事,他们为我们提供了电磁闪烁条件下的 GPS 测试数据和一些有用的讨论结果。

(3) 国家信息与通信技术研究所的拓哉津川博士,泰国孟克国王理工学院的 Pornchai Supnithi 教授,泰国朱拉隆功大学(Chulalongkorn University)的 Chalemchon Satirapod 教授。在研究电离层理论时得到了他们的帮助。

(4) 中国台湾的陈红跃博士和安藤正孝教授,日本静冈大学的良也生田教授,他们为本书提供了大量资料。

(5) 日本立命馆大学的苏杉本教授和幸宏久保教授提供了大量资料和他们的研究成果。

(6) 思博伦通信研究所的李建新博士和 Andrew Walker 先生,以及日本茨城大学的薰宫下博士(Kaoru Miyashita)提供了直观资料。

(7) 班戈大学(Bangor University)的罗宾·斯蒂文(Robin Spivey)先生提供了自制的室外天线,我们在第6章以这些天线为模型进行了讲解。

我们还要感谢剑桥大学的纳塔利亚·彼得洛卡(Natalia Petrovskaja)女士为本书所做的精美插图。

第一作者(伊万·G. 彼得罗夫斯基)要感谢:

(1) 东京海洋科学与技术大学的春政北条博士一直以来对我们的帮助和支持。

(2) 东京大学的卓尔海老沼博士在 GNSS 接收机设计领域给予的咨询和帮助。

(3) AmTechs 公司的肯佐藤先生和东京海洋科学与技术大学的安田教授在海洋学领域给予的帮助。

还要感谢 GNSS 技术公司的森本先生,在一起工作的多年里,他给予了我很大的帮助。

特别感谢我的妻子谭娅给了我许多好的建议以及对我工作的一贯支持。

第二作者(敏明辻井)要感谢:

(1) 武藤原博士、祥光菅沼先生、久保田先生、富田洋先生、Masatoshi Harigae 博士,以及很多我在日本宇宙航空研究开发机构工作时的同事,他们给予了我大量帮助。

(2) 原日本防卫大学教授正明村田博士,在我开始研究全球导航卫星系统时,他给予了我许多专业上的指导和建议。

(3) 澳大利亚新南威尔士大学的 Chris Rizos 教授,以及我在卫星导航定位(SNAP)研究小组的很多同事,他们在我在研究小组期间和之后给予我许多专业上的建议。

还要衷心地感谢我的妻子和孩子——加代子、保奈美、雪野、苟素科和裕同,他们给了我鼓励和支持。

本书第1~6章由伊万·G. 彼得罗夫斯基撰写,第8、9、12章由敏明辻井撰写,第7、10和11章由我们两个人共同撰写。

虽然我们尽量避免错误,但是有些错误在所难免。我们将不断地加以改正。

伊万·G. 彼得罗夫斯基(Ivan G. Petrovski)

敏明辻井(Toshiaki Tsujii)

本出版物包括从 CorelDRAW® 9 和 X3 获得的图像,这些图像受到美国和加拿大等国版权法的保护,我们的使用已获授权。

艺术插图

本书插图(图1.8、图1.10、图1.11、图2.0和图4.5)都是由 Natalia Petrovskaja 进行精心创作的。Natalia Petrovskaja 获得英国剑桥大学的文学学士和哲学硕士学位。

目 录

第 1 章 导航卫星的定位方法	1
1.1 全球和区域卫星导航系统	1
1.1.1 GPS	1
1.1.2 GLONASS	2
1.1.3 “伽利略”系统	3
1.1.4 区域卫星系统	4
1.1.5 GNSS 的组成	4
1.2 导航和大地测量中的定位任务	5
1.3 参考坐标系	7
1.3.1 地心惯性坐标系	7
1.3.2 地心地固坐标系	8
1.3.3 大地球面坐标系	10
1.3.4 球面坐标系的发展计划	11
1.4 时间基准和守时	13
1.5 准确度、精度和正态分布	13
1.5.1 正态分布的重要性和缺陷	14
1.5.2 准确度的度量	15
1.6 利用卫星和 GNSS 方程定位的原理	16
1.7 泰勒理论和 GNSS 方程的线性化	19
1.8 最小二乘估计	20
1.8.1 最小二乘估计原理	20
1.8.2 协方差的传递和精度因子(DOP)	22
1.8.3 最小二乘估计的实现	23
1.8.4 班克罗夫特的解析解法	24
1.9 完好性监测	25
1.9.1 大地测量和导航任务中的冗余技术	25
1.9.2 接收机自主完好性监测(RAIM)	26
1.10 GNSS 定位的非线性问题	27
1.10.1 实际应用中的非线性问题	27

1. 10. 2	求解非线性 GNSS 任务的方法	28
1. 10. 3	解决非线性 GNSS 任务的解析方法	29
参考文献		30
习题		31
第 2 章	GNSS 轨道的分类和应用	32
2. 1	从托勒密到爱因斯坦的天体运动模型发展	32
2. 2	用开普勒参数描述轨道运动	36
2. 2. 1	开普勒参数	36
2. 2. 2	通过开普勒参数计算卫星的位置	37
2. 3	GPS 导航电文中的轨道参数	40
2. 4	GNSS 卫星星历	41
2. 4. 1	密切开普勒参数	41
2. 4. 2	GPS 星历	42
2. 5	轨道参数列表	44
2. 5. 1	广播 GLONASS 星历	45
2. 5. 2	大地测量中表格化的轨道参数	45
2. 5. 3	导航中表格化的轨道参数	46
2. 5. 4	笛卡儿坐标系中开普勒参数的计算	47
2. 6	卫星时钟	47
2. 7	开普勒历书在星座分析中的应用	48
2. 7. 1	GNSS 历书的实现	48
2. 7. 2	案例研究:基于历书的轨道类型和导航卫星星座分析	49
2. 8	外力模型	53
2. 8. 1	地球位势球形谐波	53
2. 8. 2	其他外力的影响	54
2. 9	卫星最终都到哪里去了? 卫星的生命周期和太空垃圾的危害	54
参考文献		55
习题		57
第 3 章	用发射机和模拟器产生 GNSS 信号	58
3. 1	卫星导航中的扩频信号	58
3. 1. 1	扩频的概念与优点	58
3. 1. 2	GNSS 信号的中心频率	59
3. 1. 3	GPS 信号的产生	61
3. 1. 4	GLONASS 开放性接入信号的生成	67

3.1.5	GPS 和 GLONASS 导航电文	68
3.1.6	未来的“伽利略”和现代化的 GPS、GLONASS 信号的新特点	69
3.2	GNSS 信号模拟器	70
3.2.1	为什么需要模拟器	70
3.2.2	GNSS 模拟器主要设计方法	71
3.3	案例研究:机载接收机的场景数据生成	74
3.3.1	GNSS 和惯性导航系统仿真生成飞行轨迹	74
3.3.2	生成模拟场景	77
3.3.3	接收机的 GNSS 观测	80
3.4	用 GNSS 模拟器产生的 DIF 信号	82
3.5	射频信号的产生	84
3.5.1	模拟器中射频信号的产生	84
3.5.2	卫星发射机上射频信号的产生	85
3.5.3	伪卫星	86
3.6	课题设计:利用 ReGen 模拟器产生 GPS 信号	87
	参考文献	89
	习题	90

第 4 章 大气层信号传播 91

4.1	无线电信号传播的几何光学理论	92
4.2	GNSS 在大气层的射线弯曲	94
4.3	GNSS 信号在电离层的相速度和群速度	96
4.4	电离层中 GNSS 传播模型	98
4.4.1	电子总量的模型形式	98
4.4.2	GPS 电离层广播模型	101
4.4.3	GLONASS 接收机电离层误差补偿	103
4.4.4	“伽利略”接收机电离层误差补偿——NeQuick 模型	104
4.4.5	电离层信号衰减	105
4.5	对流层传播	105
4.5.1	原理	105
4.5.2	模型	106
4.6	接收机和模拟器中大气误差建模	107
4.7	课题设计	108
	参考文献	109

第 5 章 接收机前端	111
5.1 软件 GNSS 接收机射频前端	111
5.1.1 通用 GNSS 接收机	111
5.1.2 软件 GNSS 接收机	112
5.1.3 前端应用	113
5.1.4 前端带宽	114
5.2 天线	114
5.2.1 天线增益方向图	115
5.2.2 极化	117
5.2.3 天线设计	117
5.2.4 电缆和电缆接头	120
5.3 前端设计	120
5.4 前端时钟	121
5.4.1 前端时钟和接收机时钟	121
5.4.2 OCXO 与 TCXO 比较	122
5.4.3 时钟在模拟器及采集与回放系统中的作用	124
5.5 下变频	125
5.6 模/数变换	126
5.6.1 确定采样频率	126
5.6.2 量化	127
5.7 课题设计:用 PC 实时记录 GNSS 信号	129
参考文献	132
习题	133
第 6 章 基于 PC 的实时基带处理器	134
6.1 我们需要完整的接收机还是只需要基带处理器	134
6.2 一般操作	136
6.3 捕获	137
6.3.1 搜索捕获区	137
6.3.2 循环相关算法	138
6.3.3 相干与非相干积分	141
6.3.4 频率分辨率	142
6.4 软件基带处理器中的跟踪	143
6.5 其他 GNSS 信号的捕获与跟踪	150
6.5.1 GLONASS 信号的捕获与跟踪	150

6.5.2 BOC 信号的捕获与跟踪	151
6.6 锁定检测器	151
6.7 位同步	152
6.8 测量	153
6.9 实时实现	154
6.10 课题设计	156
参考文献	156
习题	157
第 7 章 多径	158
7.1 多径误差及其仿真	158
7.1.1 确定性模型	159
7.1.2 随机模型	159
7.2 案例研究:多径对 BPSK 和 BOC(1,1)信号的影响	160
7.3 多径抑制	165
7.3.1 天线	165
7.3.2 多相关器接收机	166
7.4 课题设计:采用多径仿真研究多径对接收机性能的影响	166
参考文献	167
第 8 章 全球导航卫星系统观测的优化	168
8.1 全球导航卫星系统观测误差估算	168
8.2 形成观测值	170
8.2.1 载波平滑编码相位观测值	170
8.2.2 差分解决方案	171
8.3 多频点观测值	174
8.3.1 宽巷线性组合	174
8.3.2 窄巷线性组合	174
8.3.3 无电离层观测值	175
8.4 利用增强系统改善观测值	176
8.4.1 星基增强系统(SBAS)	177
8.4.2 陆基增强系统(GBAS)	182
8.5 课题设计:LAAS 仿真数据	188
参考文献	189
习题	189

第 9 章 观测值在导航任务中的应用	190
9.1 利用载波相位观测值精确定位	190
9.1.1 解模糊度	191
9.1.2 LAMBDA 方法	196
9.1.3 跳周检测	197
9.2 案例研究:飞机姿态的确定	198
9.2.1 算法	198
9.2.2 飞行试验	202
参考文献	205
第 10 章 GNSS 信号的电磁闪烁	206
10.1 电离层的不规则性	207
10.2 弱散射 Rytov 近似算法	210
10.3 闪烁监测	213
10.3.1 信号强度测量	213
10.3.2 基带处理器中的闪烁测量	214
10.3.3 差分闪烁监控	216
10.4 案例研究:弱电离区的闪烁	216
10.5 试验获得闪烁数据的特性	222
10.6 弱闪烁唯象模型	223
10.7 分波束闪烁模型	225
10.8 课题设计:利用 iPRx 接收机监测电离层闪烁	226
参考文献	227
习题	229
第 11 章 利用 GNSS 信号的地球物理测量	230
11.1 电离层参数估算	231
11.2 无线电掩星技术	233
11.3 地球自转参数估算	235
11.4 GNSS 在地震研究中的应用	238
11.5 案例研究:海底监控系统	240
11.6 电离层中的地震前兆	242
11.6.1 利用电离层前兆预测和预报	242
11.6.2 电离层前兆的形成机理	243
11.6.3 地震光	243

11.6.4	温度变化	244
11.6.5	氦气排放	244
11.6.6	电气变化	244
11.6.7	磁性变化	246
参考文献		246
第 12 章 INS 辅助基带和导航信号处理		250
12.1	集成 GNSS 与 INS 的原则	250
12.2	案例研究:INS 辅助稳健跟踪	251
12.2.1	多普勒辅助 PLL	251
12.2.2	飞行试验	254
12.3	案例研究:闪烁条件下 INS 辅助跟踪	259
12.3.1	多普勒辅助的理论性能	259
12.3.2	利用模拟信号进行测试	261
12.4	动态应用的精确单点定位	265
12.5	设计:利用软件接收机处理飞行数据	268
参考文献		269
下一步计划:射频实验室		271