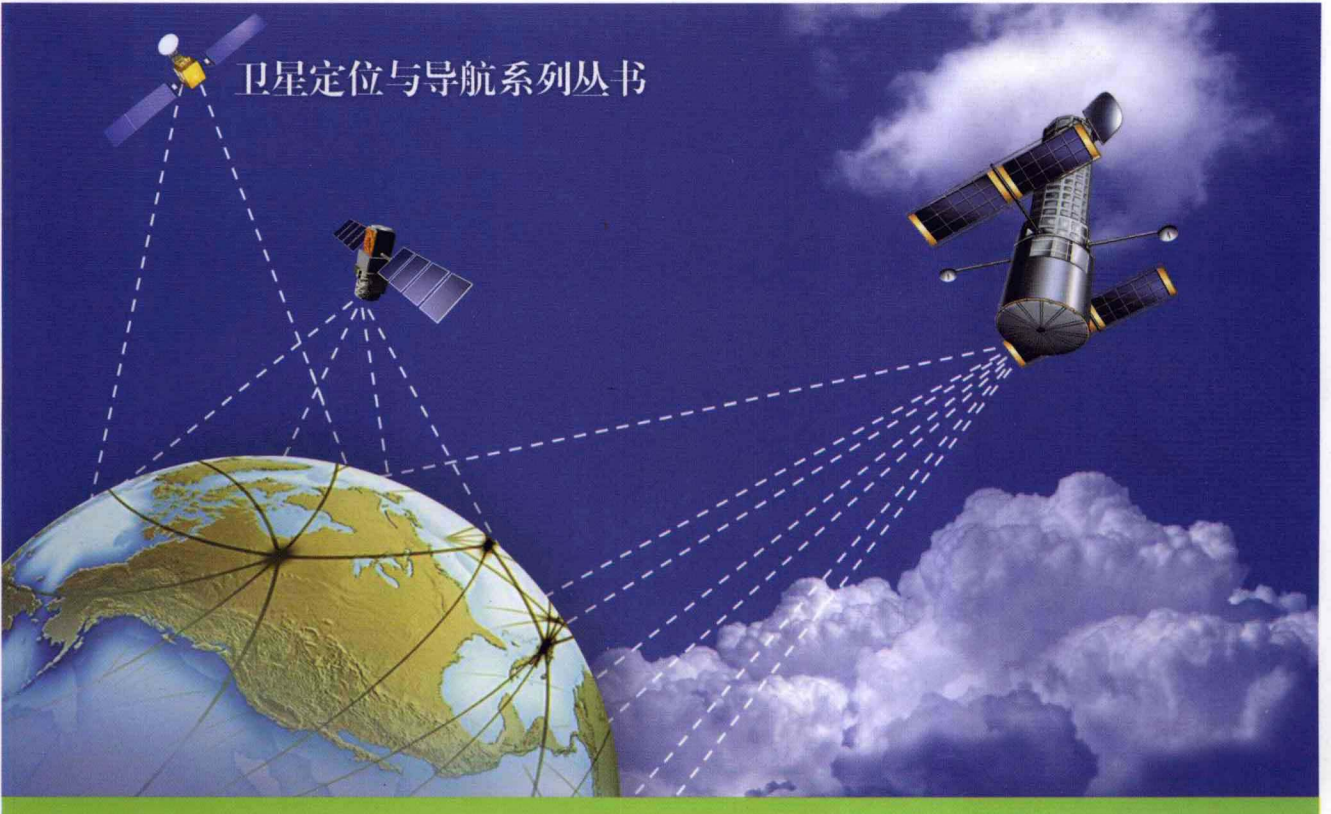




卫星定位与导航系列丛书

GPS 惯性导航组合

(第2版) Global Positioning Systems,
Inertial Navigation, and Integration
Second Edition

- [美] Mohinder S. Grewal
Lawrence R. Weill 著
Augus P. Andrews
- 陈 军 易 翔 梁高波 等译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

卫星定位与导航系列丛书

GPS 惯性导航组合

(第2版)

Global Positioning Systems,
Inertial Navigation, and Integration
Second Edition

[美] Mohinder S. Grewal 著
Lawrence R. Weill
Angus P. Andrews

陈 军 易 翔 梁高波 译
黄静华 赵 杨 魏 勋

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

出版说明

对于定位和导航的需求伴随着人类文明的发展史一直是一个重要的问题,进入 21 世纪以来,人类社会对于这种需求却从未像今天这样迫切。定位和导航技术在国防和军事上的重要性不言而喻,同时在民用领域也已经展现了巨大的应用前景和广阔的商业市场,势必在不远的将来改变我们每一个人的思维方式和生活习惯。随着现代科学技术的发展,尤其是通信、航天和半导体技术的飞速发展,基于卫星的无线电导航系统已经成为目前主流的定位和导航系统的系统架构。目前,全世界已经投入运行的卫星定位和导航系统有美国的 GPS 和俄罗斯的 GLONASS,即将投入运行的有欧盟的 Galileo 和中国的北斗卫星导航系统。从系统构成的角度分析,基于卫星的定位和导航系统主要由空间卫星网络、地面控制中心和用户终端构成;从技术的角度分析,卫星定位和导航系统包括了卫星姿态控制、卫星通信、原子钟技术、控制理论、微电子技术、系统状态参数估计和测绘测量等诸多现代科技分支。总体而言,基于卫星的定位和导航系统是现代科技多分支的有机结合,体现了一个国家的综合技术实力,是当前世界大国和主要利益集团之间竞相发展和竞争的热点科技领域。

在这样的背景下,为了推进祖国卫星定位和导航技术的快速发展,同时共享世界上已经成熟的相关理论和应用,我们携手业界知名专家和相关技术人员,借鉴了在学术界和工业界都已经成熟的卫星定位和导航理论,注重实际经验的总结与提炼,策划出版了这套面向 21 世纪的卫星定位与导航系列丛书。本套丛书中除了有国内专家、学者创作的技术专著外,还包括我们精挑细选从国外引进的一些精品图书。丛书的作、译者都是当今站在卫星定位和导航技术前沿的专家、学者及相关技术人员,丛书凝聚了他们在理论研究和实践工作中的大量经验和体会,以及电子工业出版社编书人的心血和汗水。丛书立足于卫星定位和导航系统中所涉及的最新和成熟技术,以实用性、工具性、可读性强为特色,注重读者在实际工作和学习中关心的问题,涵盖了从初学者到具有一定水平的工程技术人员和学术研究人员不同需求,对卫星定位和导航技术的基本概念、多学科的技术细节和实现,以及未来技术展望进行了深入浅出的翔实论述。其宗旨是将卫星定位和导航技术中最实用的知识、最经典的技术应用奉献给业界的广大读者,使读者通过阅读本套丛书得到某种启示,在日常工作中有所借鉴。

本套丛书的读者定位于卫星定位和导航相关产业的工程技术人员、技术管理人员、高等院校相关专业的高年级学生、研究生,以及所有对卫星定位和导航技术感兴趣的人。

在本套丛书的编辑出版过程中，我们得到了业界许多专家、学者的鼎力相助，丛书的制作、译者们为之付出了大量的心血，对此，我们表示衷心感谢！同时，也热切欢迎广大读者对本套丛书提出宝贵意见和建议，或推荐其他好的选题（E-mail: mariams@phei.com.cn），以帮助我们在未来的日子里，为广大读者及时推出更多、更好的卫星定位和导航技术类优秀图书。

电子工业出版社
2010 年 1 月

译者序

在人类历史中，很早就发明了导航技术。我国早在有历史记载之前，就已经使用指南针进行导航了。郑和能够率领庞大的船队七下西洋，开创了茫茫大海上的远航，很大程度上要归功于成功地利用指南针进行导航。

随着近代牛顿力学的创建，人们对惯性有了正确的认识，并根据惯性原理制造出在运动体内建立人工参考基准的惯性仪器。从 1852 年法国科学家傅科（Foucault）发明了世界上第一台实验用陀螺罗经起，惯性技术经历了 150 多年的发展，目前已发展成为集经典基础理论、近现代物理、自动控制、电子技术、精密工艺、精密测量、微电子及计算机于一体的多学科、综合性的尖端技术，由传统的平台式惯性系统发展为捷联式惯性系统，广泛应用于航空、航天、航海及兵器、测量等领域。

卫星导航是用导航卫星发送的导航定位信号引导运动载体安全到达目的地的一门科学。导航卫星产生于 20 世纪 60 年代早期，由美国研制成功的第一个实用的星基导航系统——海军导航卫星系统（Transit，子午仪）首次显示了卫星用于导航定位的优越性。在历经美国海军、空军先后提出的“Timation”（时间导航）计划和“621B”计划后，1973 年，美国国防部正式批准陆、海、空三军联合研制“Navigation Satellite Timing and Positioning/Global Positioning System”（导航卫星定时和测距/全球定位系统），简称为 GPS（全球定位系统）。GPS 卫星所发送的导航定位信号，是一种可供无数用户共享的空间信息资源，用户只要持有一种能够接收、跟踪、变换和测量 GPS 信号的接收机，就可以全天候测量运动载体的七维状态参数（三维坐标、三维速度、时间）和三维姿态参数，进而引导运动载体准确地驶向预定的后续位置。从 GPS 系统正式投入应用至今的 16 年间，GPS 除了用于军事以外，已日益广泛地进入全球各国人民的的生活，并在航空、航天、海运、车辆等诸多领域发挥着越来越重要的作用。

GNSS 是 Global Navigation Satellite System 的缩写，即全球导航卫星系统。目前，GNSS 包含了美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、我国的 Compass（北斗）、欧盟的 Galileo 系统，可用的卫星数目达到 100 颗以上。

卡尔曼滤波技术充分利用了全球导航卫星系统（GNSS）和惯性导航系统（INS）之间强有力的组合关系。这种组合关系部分是由于 INS 和 GNSS 之间的互补误差特性。INS 的短期位置误差相对较小，但这种误差会随时间而持续增加。另外，GNSS 位置误差的短期误差不如 INS 好，但该误差不随时间而增加。卡尔曼滤波能够利用这些特性，提供一个性能优于 GNSS、INS 中任一系统的共用集成导航工具。通过使用这两个系统中误差的统计信息，就能够将一个定位误差为数十米的系统（GNSS）与另一个定位误差以

米不同等级的定位误差范围。

卡尔曼滤波是一种高效率的递归滤波器（自回归滤波器），它能够从一系列的不完全包含噪声的测量中，估计动态系统的状态。卡尔曼滤波器用于综合多个噪声传感器输出以对不确定动态系统的状态进行估计，是一个极其有效和通用的方法。卡尔曼滤波器的关键作用是利用 GNSS 和 INS 信息的综合统计对 INS 中传感器的漂移参数进行跟踪。其结果是在 GNSS 的信号有可能丢失的阶段中，INS 可以提供较高的导航精度；而当 GNSS 信号再次可用时，来自 INS 的高精度位置和速度估计可以使得 GNSS 信号被更迅速地重新获取。

Mohinder S. Grewal 博士为美国加州大学电子工程系教授，美国导航研究学会(ION)会员，IEEE 高级会员。Mohinder S. Grewal 博士对卡尔曼滤波、GPS、惯性导航系统均有深入的研究，并在将卡尔曼滤波应用于 GPS/惯性导航系统组合方面有着丰富的理论和工程实践经验。在本书中，他在深入讨论 GNSS 基本理论的基础上，详细分析了如何对 GNSS 和 INS 组合实施有效的卡尔曼滤波以更好地进行导航定位，并提供了 INS 运行所必需的数学模型、卡尔曼滤波的 MATLAB 实现算法及 GNSS/INS 组合仿真的 MATLAB 实现。对卡尔曼滤波、GPS、惯性导航系统有兴趣的读者，这些都将是非常有益的内容。

本书由陈军、易翔、梁高波、黄静华、赵杨和魏勋合作翻译。参加翻译的还有刘义、孙吉、张哲峰、王磊、张文俊、唐新强、戴刚、董石磊、袁宗圃、孙胜连、蔡臻祥、王四红、李玮、安新源、彭王奇、王少轩、褚家旭、付海鹏、张先志、李飞、耿志辉、王大明、芦秀伟、姜芳、郭晋、林立东和张耀春。

张晶晶和贺世民等参与了本书第一版翻译的部分工作，安新源、张哲峰和张耀春对本书的校对做了大量工作，国家电子对抗重点实验室主任孟建研究员对译稿进行了仔细审阅并提出了许多宝贵意见，在此谨致深切谢意。

原书所配光盘中的内容，读者可以登录华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）免费注册后进行下载。

由于译者水平有限，书中难免存在错误和不足之处，恳请读者批评指正。

译 者

第 2 版序

本书是为那些需要将全球导航卫星系统 (GNSS)、惯性导航系统 (INS) 和卡尔曼滤波器结合起来的人所编写的, 目的是使读者在工作时熟悉以上各方面的理论和应用。鉴于此目的, 我们以实践中存在的问题作为例子来阐明。本书也涉及更多的应用问题: 用数学模型来描述问题; 分析模型参数函数的性能; 用数字稳定算法实现机械方程并评定该算法的计算需求; 验证结果的有效性; 及监测 GNSS、INS 传感器数据在实际运用中的性能等。在理论处理上经常被忽略的这些重要属性, 对理论在实际问题中的有效应用是非常必要的。

附带光盘^注包含 MATLAB m 文件, 用以演示卡尔曼滤波器算法是怎样对 GNSS 和 INS 数据组进行处理的, 因此读者可通过观察卡尔曼滤波器对 GNSS 和 INS 的作用来更好地理解卡尔曼滤波器的工作原理。在计算机中, GNSS、INS 和卡尔曼滤波的实现也阐明了有限字长计算的一些实际应用考虑和为了保证结果的精度所需要的交替算法。如果研究人员希望应用所学的东西, 则必须熟悉卡尔曼滤波的可行和不可行之处, 并学会识别其差异。

本书可作为全球导航卫星系统 (GNSS) 技术介绍课程的高级读本, 也可作为 GNSS、INS 和卡尔曼滤波理论及应用方面研究生第一年的课程教材, 还可作为以上领域工程技术人员和科研人员的自学参考书。

第 2 版包括了 2001 年以来 GNSS/INS 技术的一些重要改变, 我们也利用这个机会综合了评论家和读者的一些改进建议。第 2 版中的改变包括以下几方面。

(1) GPS、GLONASS 和 Galileo 的新信号结构。

(2) 卫星导航增强系统的新发展, 包括:

① 广域差分 GPS (WADGPS);

② 局域差分 GPS (LADGPS);

③ 空基增强系统 (SBASs);

④ 地基增强系统 (GBASs)。

(3) 多径消除技术的最近改进, 以及时钟控制的新算法。

(4) 关于卫星系统完好性监测的新章节。

(5) INS 理论的更全面的讲解, 包括误差模型的发展、演示系统性能的 MATLAB 仿真等。

(6) 关于 GNSS/INS 组合的新章节, 包括紧/松组合不同级别的 MATLAB 仿真。

第 2 版所附的光盘使我们有机会收编更多作为文件的背景素材。本书中的章节也进行了改编以加入这些新素材。

本书第 1 章简单介绍了所讨论内容的发展历程及应用; 第 2~7 章讨论了 GNSS 的基本理论, 可作为测绘学、电子工程、系统工程和计算机科学等大学高年级的课程教材。

第 8~10 章讨论了利用卡尔曼滤波的 GNSS 和 INS 组合。这些章节内容可用于电子、计算机及系统工程方面的研究生课程。其中, 第 8 章介绍了卡尔曼滤波的基础理论: 线性最佳滤波器、预测器、扩展卡尔曼滤波的非线性估计和 MATLAB 实现算法等。同时, 第 8 章也以举例的形式给出了应用这些技术进行系统未知参数的确定方法。第 9 章介绍了 INS 运行所必需的数学模型及误差分析。第 10 章则讨论了 GNSS/INS 组合方法, 包括验证其性能的仿真轨迹的 MATLAB 实现。

Mohinder S. Grewal, Ph.D., P.E. (莫欣德 S. 格雷沃尔博士, 专业工程师)

California State University at Fullerton (加利福尼亚州立大学富勒顿分校)

Lawrence R. Weill, Ph.D. (劳伦斯 R. 维尔博士)

California State University at Fullerton (加利福尼亚州立大学富勒顿分校)

Angus P. Andrews, Ph.D. (安格斯 P. 安德鲁斯博士)

Rockwell Science Center (retired) Thousand Oaks, California (加利福尼亚州, 千橡树镇, 罗克韦尔科研中心)

致 谢

M. S. G.: 感谢 Fullerton 加利福尼亚州立大学研究生 Mrs. Laura Cheung 的协助, 她在 MATLAB 程序方面完成了大量专业性的工作。还要感谢波音公司的 Jya-Syin Wu 博士, 她协助完成了对初稿评论的修改。

L. R. W. : 感谢麦哲伦导航公司的专家们, 他们主动提供了在开发第一个用于消费者市场的手持接收机过程中对全球定位系统的认识。

A. P. A.: 感谢 James Black 上校和美国航空公司的 Irwin Wenzel, 感谢他们在设计商业喷气式飞机起飞和着陆仿真方面的帮助; 感谢 Northrop Grumman 公司的 Randall Corey, 以及 C. S. Draper 实验室的 Michael Ash, 因为他们提供了惯性传感器技术 IEEE 初步标准方面的工作; 还要感谢 GPSoft 有限公司的 Michael Braasch 博士, 感谢他所提供的 GPSoft INS、GPS MATLAB 工具箱的评价副本。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 GNSS/INS 综述	1
1.2 GNSS 概述	2
1.2.1 GPS	2
1.2.2 全球导航卫星系统 (GLONASS)	3
1.2.3 伽利略系统 (Galileo)	4
1.3 差分和增强 GPS	6
1.3.1 差分 GPS	6
1.3.2 局域差分 GPS	6
1.3.3 广域差分 GPS	7
1.3.4 广域增强系统 WAAS	7
1.4 空基增强系统 (SBAS)	7
1.4.1 历史背景	7
1.4.2 广域增强系统 (WAAS)	8
1.4.3 欧洲同步导航覆盖系统 (EGNOS)	9
1.4.4 日本的基于 MTSAT 多功能传输卫星的增强系统 (MSAS)	10
1.4.5 加拿大的广域增强系统 (CWAAS)	10
1.4.6 中国的卫星导航增强系统 (SNAS)	10
1.4.7 印度的 GPS 和 GEO 增强导航系统 (GAGAN)	10
1.4.8 地基增强系统 (GBAS)	11
1.4.9 Inmarsat 民用导航	13
1.4.10 卫星重叠导航服务	13
1.4.11 未来的卫星系统	13
1.5 应用	14
1.5.1 航空	14
1.5.2 航天器引导	14
1.5.3 海运	14
1.5.4 陆地	14
1.5.5 地理信息系统 (GISs)、绘图及农业	15
习题	15

第 2 章 卫星导航和惯性导航的基本原理	16
2.1 导航系统研究	16
2.1.1 不同于 GNSS 的系统	16
2.1.2 比较标准	16
2.2 惯性导航的基本原理	17
2.2.1 惯性导航的基本概念	17
2.2.2 惯性导航系统	19
2.2.3 传感器的信号处理	23
2.2.4 独立 INS 性能	28
2.3 卫星导航	29
2.3.1 卫星轨道	29
2.3.2 导航解算(二维实例)	30
2.3.3 卫星选择和精度因子	32
2.3.4 DOPs 的计算实例	36
2.4 时间与 GPS	37
2.4.1 协调世界时的产生	37
2.4.2 GPS 系统时	38
2.4.3 接收机 UTC 的计算	38
2.5 例子: 无误差的用户定位计算	39
2.5.1 用户的位置计算	39
2.5.2 用户的速率计算	41
习题	41
第 3 章 信号特征及信息提取	45
3.1 信号的数学模型	45
3.2 GPS 信号的组成、用途和特性	46
3.2.1 50bps 的数据码流	46
3.2.2 GPS 卫星位置的计算	51
3.2.3 C/A 码及其性能	54
3.2.4 P 码及其性能	59
3.2.5 L_1 和 L_2 载波	60
3.3 信号功率电平	61
3.3.1 发射功率电平	61
3.3.2 自由空间损耗因子	61
3.3.3 大气损耗因子	61

3.3.4	天线增益和最低接收信号功率	61
3.4	信号的捕获和跟踪	62
3.4.1	可见卫星的确定	62
3.4.2	信号的多普勒估计	63
3.4.3	在频率和 C/A 码相位范围内搜索信号	63
3.4.4	信号检测和确认	66
3.4.5	码跟踪环	68
3.4.6	载波相位跟踪环	71
3.4.7	位同步	74
3.4.8	数据位解调	74
3.5	导航解算所需信息的提取	75
3.5.1	信号发射时间信息	75
3.5.2	星历数据	75
3.5.3	使用 C/A 码的伪距测量	75
3.5.4	使用载波相位的伪距测量	77
3.5.5	载波的多普勒测量	78
3.5.6	积分的多普勒测量	79
3.6	伪距和频率估计的理论考虑	80
3.6.1	码伪距性能的理论值与实际值	80
3.6.2	载波伪距的理论误差界限	82
3.6.3	频率测量的理论误差界限	83
3.7	GPS 的现代化	83
3.7.1	当前系统的不足	83
3.7.2	现代 GPS 的组成	84
3.7.3	GPS 卫星系列	87
3.7.4	现代化的精度改进	87
3.7.5	现代化改进信号的结构	88
	习题	90
第 4 章	接收机及天线的设计	93
4.1	接收机的结构	93
4.1.1	射频级（前端）	93
4.1.2	下变频及中频放大	94
4.1.3	数字化	95
4.1.4	基带信号处理	96

4.2	接收机设计的选择	97
4.2.1	信道数和序列速率	97
4.2.2	L_2 特性	99
4.2.3	码型选择: C/A 码、P 码或无码	99
4.2.4	SA 信号	100
4.2.5	差分性能	101
4.2.6	伪卫星的兼容性	102
4.2.7	对伪卫星信号的抗扰性	106
4.2.8	辅助输入	107
4.3	高灵敏辅助的 GPS 系统 (室内定位)	107
4.3.1	辅助数据如何改变接收机的性能	108
4.3.2	影响接收机高灵敏度的因素	110
4.4	天线的设计	112
4.4.1	天线形式	112
4.4.2	GPS 信号的圆极化	113
4.4.3	相控阵天线的原理	114
4.4.4	天线相位中心	117
	习题	117
第 5 章	GNSS 数据误差	119
5.1	选择可用性误差	119
5.1.1	时域描述	121
5.1.2	SA 的数据采集	123
5.2	电离层传播误差	124
5.2.1	电离层延迟模型	126
5.2.2	GPS 的电离层算法	127
5.3	对流层传播误差	134
5.4	多径问题	135
5.5	多径如何引起测距误差	135
5.6	多径抑制方法	137
5.6.1	空间处理技术	137
5.6.2	时域处理	139
5.6.3	MMT 技术	142
5.6.4	时域方法的性能	149
5.7	多径消除的理论限制	151

5.7.1	估计理论方法	151
5.7.2	MMSE 估计器	152
5.7.3	多径建模误差	152
5.8	星历数据误差	152
5.9	星载时钟误差	152
5.10	接收机时钟误差	154
5.11	误差预估计	155
5.12	差分 GNSS	156
5.12.1	码差分测量	156
5.12.2	载波相位差分测量	157
5.12.3	利用二次差分测量的定位	159
5.13	GPS 精确点定位服务及产品	160
	习题	162
第 6 章	差分 GNSS	164
6.1	简介	164
6.2	LADGPS、WADGPS 和 SBAS	164
6.2.1	局域差分 GPS (LADGPS)	164
6.2.2	广域差分 GPS (WADGPS)	164
6.2.3	空基增强系统 (SBAS)	165
6.3	地基增强系统 (GBAS)	169
6.3.1	区域增强系统 (LAAS)	169
6.3.2	联合精度进近着陆系统 (JPALS)	169
6.3.3	LORAN-C	170
6.4	GEO 上行链路子系统 (GUS)	170
6.4.1	GUS 算法	170
6.4.2	在轨测试 (IOT)	172
6.4.3	电离层延迟估计	172
6.4.4	码-载波频率的相干性	173
6.4.5	载频稳定性	175
6.5	GUS 的时钟控制算法	175
6.5.1	主 GUS 的时钟控制算法	176
6.5.2	备用 GUS 的时钟控制算法	177
6.5.3	时钟控制测试结果的描述	178
6.6	GEO L ₁ /L ₅ 信号	179

6.6.1	空基增强系统 (SBAS) 的 GEO	179
6.6.2	GEO 上行链路子系统类型 1 (GUST) 控制环	181
6.7	新的 GUS 时钟控制算法	185
6.7.1	接收机时钟误差的确定	187
6.7.2	时钟驱动控制定律	188
6.8	GEO 轨道的确定	190
6.8.1	影响 GEO 信号性能的因素	190
6.8.2	轨道确定协方差分析	190
	习题	195
第 7 章	GNSS、GEO 信号的完好性	196
7.1	接收机自主完好性监测 (RAIM)	196
7.1.1	Lee 距离比较法 ^[121]	196
7.1.2	最小二乘法 ^[151]	196
7.1.3	等价法 ^[182,183]	197
7.2	SBAS 和 GBAS 完好性的设计	198
7.2.1	SBAS 误差源和完好性威胁	199
7.2.2	与 GPS 相关的误差	200
7.2.3	与 GEO 相关的误差	202
7.2.4	接收机和测量处理误差	202
7.2.5	估计误差	204
7.2.6	与完好性界限相关的误差	204
7.2.7	GEO 上行链路误差	205
7.2.8	完好性威胁的消除	205
7.3	SBAS 实例	210
7.4	结束语	212
7.5	GPS 完好性信道 (GIC)	212
第 8 章	卡尔曼滤波	213
8.1	简介	213
8.1.1	什么是卡尔曼滤波器?	213
8.1.2	卡尔曼滤波器的工作原理	214
8.2	卡尔曼增益	215
8.2.1	获取卡尔曼增益的途径	215
8.2.2	高斯概率分布密度函数	216
8.2.3	似然函数的性质	217

8.2.4	组合信息矩阵的求解	219
8.2.5	组合最大值 (argmax) 的求解	219
8.2.6	有噪测量似然	220
8.2.7	高斯最大似然估计	221
8.2.8	用于最大似然估计的卡尔曼增益矩阵	223
8.2.9	利用卡尔曼增益的估计修正	223
8.2.10	用于测量的协方差修正	224
8.3	预测	224
8.3.1	连续时间随机系统	224
8.3.2	离散时间随机系统	229
8.3.3	离散时间状态空间模型	230
8.3.4	动态扰动噪声分布矩阵	231
8.3.5	预测器方程	231
8.4	卡尔曼滤波方程总结	232
8.4.1	基本方程	232
8.4.2	常用术语	232
8.4.3	数据流程图	233
8.5	对时间相关噪声的适应性	234
8.5.1	相关噪声模型	234
8.5.2	传感器噪声的经验模型	236
8.5.3	状态向量增量	238
8.6	非线性和自适应的实现	239
8.6.1	非线性动态	239
8.6.2	非线性传感器	240
8.6.3	线性卡尔曼滤波	241
8.6.4	扩展卡尔曼滤波	242
8.6.5	自适应卡尔曼滤波	243
8.7	卡尔曼—布西滤波器 (KALMAN-BUCY FILTER)	244
8.7.1	实现方程	244
8.7.2	卡尔曼—布西滤波器参数	245
8.8	GPS 接收机实例	246
8.8.1	卫星模型	246
8.8.2	测量模型	247
8.8.3	坐标	247
8.8.4	测量灵敏度矩阵	247

8.8.5	实现的结果	248
8.9	其他的卡尔曼滤波器改进	254
8.9.1	斯密特—卡尔曼次最佳滤波	254
8.9.2	串行测量处理	256
8.9.3	改进数字稳定性	258
8.9.4	卡尔曼滤波器监控	261
习 题		264
第 9 章	惯性导航系统	267
9.1	惯性传感器技术	267
9.1.1	早期的陀螺仪	267
9.1.2	早期的加速度计	270
9.1.3	反馈控制技术	273
9.1.4	旋转科里奥利多传感器	275
9.1.5	激光技术和光学陀螺仪	277
9.1.6	振动科里奥利陀螺仪 (VCG)	278
9.1.7	微机电系统技术	279
9.2	惯性系统技术	280
9.2.1	早期的需求	280
9.2.2	计算机技术	281
9.2.3	早期的捷联系统	282
9.2.4	INS 和 GNSS	282
9.3	惯性传感器模型	284
9.3.1	零均值随机误差	284
9.3.2	系统误差	285
9.3.3	其他校准参数	288
9.3.4	校准参数的不稳定性	289
9.3.5	辅助传感器	290
9.4	系统运行模型	290
9.4.1	一维的实例	290
9.4.2	初始化和校准	292
9.4.3	地球模型	294
9.4.4	平衡环姿态的实现	300
9.4.5	捷联姿态的实现	302
9.4.6	导航计算机和软件的需求	307