



测绘科技专著出版基金资助

CEHUI KEJI ZHUANZHU CHUBAN JIJIN ZIZHU

PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF
GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM

党亚民 秘金钟
成英燕 编著

全球导航卫星系统 原理与应用

测绘出版社

测绘科技专著出版基金资助

全球导航卫星系统原理与应用

PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF
GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM

党亚民 秘金钟 成英燕 编著

测绘出版社

·北京·

内 容 提 要

本书系统介绍了全球导航卫星系统(GNSS)的基本原理和应用,分别简要介绍了卫星导航定位技术的产生、发展以及 GNSS 的系统组成;结合卫星导航定位常用的坐标系统、时间系统介绍了 GNSS 导航定位的时空基准;在介绍卫星轨道基本理论的基础上,分别对卫星广播星历和精密星历,卫星导航电文的格式,卫星导航定位信号以及伪距测量原理和载波相位测量原理作了较为详细的介绍;阐述了 GNSS 静态绝对定位和静态相对定位原理以及定位误差影响;针对 GNSS 导航用户,介绍了单点动态定位的原理,差分定位的原理,实时动态 RTK 定位的原理,尤其对精密单点定位(PPP),网络 RTK,伪卫星定位等 GNSS 新技术作了较为全面的介绍;最后对 GNSS 最新技术进展和在相关领域的应用进行了较为全面的介绍。本书内容系统全面,在内容叙述上力求深入浅出,易于读者掌握和应用。正文后还汇集列出了《本书引用的缩写词》,作为附录。

本书可作为地学领域相关专业科研人员 and 从事测量生产工程技术人员的参考书,也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

©党亚民 秘金钟 成英燕 2007

图书在版编目(CIP)数据

全球导航卫星系统原理与应用/党亚民,秘金钟,成英燕编著.

—北京:测绘出版社,2007.9

ISBN 978-7-5030-1717-9

I. 全… II. ①党…②秘…③成… III. 卫星导航 IV. TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 132145 号

责任编辑 田 力 文湘北

封面设计 李 伟

出版发行 测绘出版社

社 址 北京西城区复外三里河路 50 号

邮政编码 100045

电 话 010-68512386 68531558

网 址 www.sinomaps.com

印 刷 三河市艺苑印刷厂

经 销 新华书店

成品规格 169 mm×239 mm

印 张 17.5

字 数 400 千字

版 次 2007 年 9 月第 1 版

印 次 2007 年 9 月第 1 次印刷

印 数 0001-3000 册

定 价 32.00 元

书 号 978-7-5030-1717-9/P·458

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

序

1957年10月,世界上第一颗人造地球卫星发射成功,使空间科学技术的发展跨入了一个崭新的时代。1958年底,美国詹斯·霍普金斯大学应用物理实验室在美国海军的资助下,研制了多普勒导航卫星系统,称为美国海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System, NNSS),也称为子午卫星(TRANSIT)导航系统。1973年,美国国防部开始研发第二代全球导航卫星系统,即著名的“全球定位系统(GPS)”。

1982年,前苏联国防部开始研发全球导航卫星系统 GLONASS。20世纪90年代开始,我国也开始研发“北斗”导航卫星系统。2005年12月,欧洲的伽利略全球导航卫星系统(GALILEO)的第一颗试验卫星 GIOVE-A 发射升空,标志着 GALILEO 全球导航卫星系统正式进入实施论证阶段。有鉴于此,美国和俄罗斯都在21世纪初分别提出 GPS 和 GLONASS 的现代化,以迎接 GNSS 新的形势、GNSS 新的发展。

20世纪90年代中期,国际民航组织、国际移动卫星组织以及欧洲空间局等倡导发展完全由民间控制的全球导航卫星系统(GNSS),以补充和发展当时存在的军用导航卫星定位系统存在的不足,其目标是建成一套可独立满足更广泛的导航与定位需求的民用全球导航卫星系统。进入21世纪以来,随着全球导航卫星系统呈现多极化的发展趋势,国际大地测量协会(IAG)也将国际 GPS 服务中心(International GPS Service)更名为国际 GNSS 服务中心(International GNSS Service),以适应当前新的形势。

全书章节编排合理,脉络清晰,理论和应用配合适当,叙述通俗易懂。本书几位作者都具有长期从事 GPS 科研生产的经验,这本书也是在他们长期从事科研工作积累的基础上撰写出来的。其中第一作者党亚民研究员长期在国内外从事 GPS 领域相关的科研工作,一直积极跟踪国内外导航卫星的进展,他和其他几位专家一起,编写了这本全球导航卫星系统(GNSS)的专业参考书,非常及时。

本书正是在 GNSS 快速发展、日新月异的形势下产生的,与目前市场上已有的导航卫星系统的专业参考书不同,除了系统地介绍和描述全球导航卫星系统的原理和方法外,本书还着重介绍了导航卫星的最新技术,尤其对高精度卫星导航定位数据处理和相应计算机软件做了阐述,这对从事 GNSS 科研和生产的专业人员非常有用,也对从事导航、定位和定时工作的工程技术人员和相关专业人士有重要的参考价值。

陈凌勇

中国科学院院士

2007年8月

前 言

过去二十多年里,美国的全球卫星定位系统(Global Positioning System, GPS)作为世界唯一保持正常运行的卫星定位系统,为全球提供了全天候的导航定位服务。与此同时,自1982年10月开始,前苏联开始研制第二代卫星导航定位系统——全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)。进入21世纪,世界其他国家和地区也加快了发展自主卫星导航系统的步伐,其中最具代表性的有欧洲的 GALILEO 系统和中国的北斗导航卫星系统等,全球导航卫星系统呈现多极化发展趋势。

20世纪90年代中期,国际民航组织、国际移动卫星组织以及欧洲空间局等倡导发展完全由民间控制的全球导航卫星系统。1994年欧洲民航会议之后,欧洲空间局、欧盟委员会以及欧洲航行安全局,开始了“全球导航卫星系统(GNSS)”的设计与论证,其最终目标是建立一套真正可以独立满足几乎所有导航定位需求的民用全球卫星导航系统。此后不久,国际大地测量协会(International Association of Geodesy, IAG)也适时将国际 GPS 服务中心(International GPS Service, IGS)改为国际 GNSS 服务中心(International GNSS Service)。

本书对全球导航卫星系统(GNSS)进行了较为全面的介绍。全球导航卫星系统和我们熟知的目前正处于运行状态的单一卫星导航定位系统(如 GPS)有所不同,它更强调卫星导航定位技术的综合性能和安全性能。GNSS 系统构成由全球设施、区域设施、外部设施以及用户等四部分组成,其中全球设施是 GNSS 最重要的组成部分。从系统应用角度,更强调了卫星的完备性监测信息和导航安全性告警信息,目前运营的 GPS 和 GLONASS 卫星定位系统,则无法满足这些要求。随着这些卫星导航定位系统升级改造的完成,一方面,它们自身就是一套相对独立的 GNSS 系统;另一方面,它和其他全球和区域卫星导航系统进行系统的优化配置,组成精度和可靠性更高,安全性能更加优越的全球导航卫星系统。

全书共分九章,其中第一章为绪论,简要介绍了卫星导航定位技术的产生和发展,并对 GNSS 的产生和发展现状、GNSS 的系统组成、GNSS 导航定位应用等作了较为系统的概述,使读者对 GNSS 卫星导航定位系统有一个概要了解。第二章主要介绍卫星导航定位定轨常用的坐标系统、时间系统,以及不同坐标系统、不同时间系统之间的相互转换。本章还对 ITRF 框架及时空基准作了较详尽的论述,使读者对坐标系之间的关系有比较清晰的了解。第三章介绍了卫星轨道运动规律,卫星的无摄轨道和受摄轨道,以及卫星广播星历和精密星历的相关内容,说明

了卫星轨道中 GNSS 卫星坐标的计算方法。第四章以 GPS 信号为例详细介绍了卫星导航电文的格式、测距码信号、载波相位信号以及伪距测量原理和载波相位测量原理,讲述了 GLONASS 卫星信号与 GALILEO 卫星信号的结构。第五章主要介绍 GNSS 静态绝对定位和静态相对定位原理,卫星导航定位中的误差影响、影响大小及消除这些误差的有效方法和措施。介绍了利用不同频率电磁波观测值的线性组合消除不同系统误差的参数估计方法。第六章介绍了 GNSS 单点动态定位的原理,差分 GNSS 定位的原理,实时动态 RTK 定位的原理,特别讲述了精密单点 PPP 定位技术,网络 RTK 技术,伪卫星定位技术以及完备性监测技术等新技术。第七章主要介绍了高精度定位的有关数据处理方法,误差方程的组成及精度评定,对目前 GNSS 数据处理采用的高精度数据处理软件作了比较详细的介绍。第八章详细介绍了 GNSS 在大地测量和地球动力学、地震预报和监测、气象预报、陆海空定位导航、大坝形变测量、滑坡和地面沉降监测、精细农林业等领域的应用情况。第九章系统介绍了全球导航卫星系统的最新技术进展,尤其对目前全球相对独立的各全球导航定位系统的技术进展作了较为系统的介绍,使读者对全球导航卫星系统的技术发展趋势有一个较为全面的了解。

作者编写本书的目的,主要在于适应全球卫星导航定位技术的迅猛发展,使广大读者对全球卫星导航定位技术有一个更加全面的认识,而不是仅局限在过去单一的卫星导航定位系统中。鉴于目前一些全球卫星导航定位系统正处于系统构建阶段,本书侧重于对各种单一全球定位系统最新进展的介绍,并对全球导航卫星系统的技术特点作简要介绍,而对于有效地综合全球各种卫星定位系统进行导航定位的具体技术则较少涉及。本书主要由党亚民、秘金钟和成英燕编写。在本书的编写过程中,中国测绘科学研究院薛树强、王军和王孝青在资料的收集、翻译和整理等方面也做了许多卓有成效的工作,在此表示诚挚感谢。由于作者水平有限,书中错误与不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2007年5月于北京

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 卫星导航定位技术概述	1
1.1.1 卫星导航定位技术的产生和发展	1
1.1.2 GNSS 的产生和发展	5
§ 1.2 GNSS 系统组成	7
1.2.1 全球设施	7
1.2.2 区域设施.....	11
1.2.3 用户部分.....	14
1.2.4 外部设施.....	14
§ 1.3 GNSS 导航定位应用	14
1.3.1 GNSS 在交通运输中的应用	14
1.3.2 GNSS 在测绘领域中的应用	16
1.3.3 GNSS 在其他领域中的应用	17
第 2 章 GNSS 导航定位时空基准	19
§ 2.1 GNSS 导航定位坐标系统	19
2.1.1 基本概念.....	19
2.1.2 协议天球坐标系.....	22
2.1.3 协议地球坐标系.....	26
2.1.4 世界大地坐标系统.....	31
2.1.5 国际地球参考框架.....	33
2.1.6 PZ-90 坐标系	36
2.1.7 我国大地坐标系统.....	39
§ 2.2 时间系统.....	43
2.2.1 有关时间的基本概念.....	43
2.2.2 世界时系统.....	44
2.2.3 原子时.....	45
2.2.4 力学时.....	46
2.2.5 协调世界时.....	47

2.2.6	GPS 时间系统	47
2.2.7	儒略日	48
§ 2.3	时间框架的建立和维持	49
2.3.1	时间系统框架的建立	49
2.3.2	时间系统框架的维持	49
第 3 章	GNSS 卫星运动和卫星星历	52
§ 3.1	GNSS 卫星的无摄运动	52
3.1.1	二体意义下卫星的运动方程	52
3.1.2	开普勒定律	53
3.1.3	卫星运动的轨道参数	55
3.1.4	真近点角的计算	55
3.1.5	卫星的瞬时位置	57
3.1.6	卫星的运行速度	59
§ 3.2	卫星的受摄运动	61
3.2.1	卫星运动的摄动力及受摄运动方程	61
3.2.2	地球引力场摄动力对卫星轨道的影响	62
3.2.3	日、月引力对卫星轨道的影响	63
3.2.4	太阳光压对卫星轨道的影响	63
3.2.5	地球潮汐摄动力对卫星轨道的影响	64
§ 3.3	GNSS 卫星星历	64
3.3.1	GPS 广播星历	64
3.3.2	GPS 精密星历	66
3.3.3	由卫星广播星历计算 GPS 卫星坐标	70
3.3.4	由卫星精密星历计算 GPS 卫星坐标	72
3.3.5	GLONASS 卫星星历	72
第 4 章	GNSS 卫星信号和定位原理	74
§ 4.1	GPS 卫星导航电文	74
4.1.1	GPS 导航电文及其格式	74
4.1.2	导航电文的内容	75
§ 4.2	GNSS 测距码信号与伪距测量原理	77
4.2.1	码的基本概念	77
4.2.2	伪随机噪声码及其产生	78
4.2.3	GPS 卫星的测距码信号	80

4.2.4 伪距测量原理	82
§ 4.3 GNSS 载波信号与相位测量原理	83
4.3.1 GPS 卫星的载波信号	83
4.3.2 GPS 卫星信号的调制	84
4.3.3 GPS 卫星信号的解调	85
4.3.4 载波相位测量原理	87
§ 4.4 GLONASS 卫星信号和 GALILEO 卫星信号	88
4.4.1 GLONASS 信号	88
4.4.2 GALILEO 信号	93
§ 4.5 卫星定位原理	95
第 5 章 GNSS 静态定位原理	97
§ 5.1 GNSS 静态定位方法	97
§ 5.2 GNSS 导航定位误差来源及影响	98
5.2.1 与卫星有关的误差	99
5.2.2 与卫星信号传播有关的误差	101
5.2.3 多路径效应影响	109
5.2.4 与接收设备有关的误差	110
5.2.5 其他误差来源	111
§ 5.3 GNSS 静态绝对定位原理	113
5.3.1 测码伪距静态绝对定位	113
5.3.2 测相伪距静态绝对定位	114
§ 5.4 GNSS 静态相对定位原理	115
5.4.1 静态相对定位的观测方程	116
5.4.2 相位观测量线性组合的相关性	120
§ 5.5 不同频率电磁波观测值的线性组合	123
§ 5.6 整周未知数的确定与周跳分析	126
5.6.1 整周未知数及其确定方法概述	126
5.6.2 周跳的探测与修复	131
第 6 章 GNSS 动态定位原理	136
§ 6.1 GNSS 动态绝对定位原理	136
6.1.1 测码伪距动态绝对定位	136
6.1.2 测相伪距动态绝对定位	138
§ 6.2 差分 GPS 定位原理	140

6.2.1	伪距差分原理	140
6.2.2	相位平滑伪距差分	141
§ 6.3	载波相位差分 GPS 定位原理	144
6.3.1	载波相位差分 GPS 定位方法	144
6.3.2	整周未知数的动态求解	146
§ 6.4	GNSS 增强系统	150
6.4.1	差分 GPS	150
6.4.2	局域差分 GPS	151
6.4.3	广域差分 GPS	152
§ 6.5	GNSS 动态导航定位技术	156
6.5.1	精密单点定位	156
6.5.2	网络 RTK 技术	158
6.5.3	伪卫星定位技术	162
6.5.4	完备性监测技术	164
第 7 章	GNSS 定位数据处理	171
§ 7.1	GNSS 观测数据处理	171
7.1.1	观测文件信息	172
7.1.2	GNSS 观测方程的建立	173
§ 7.2	GNSS 网平差	177
§ 7.3	高精度 GNSS 数据处理软件	179
7.3.1	GAMIT/GLOBK 软件	179
7.3.2	BERNESE 软件	189
第 8 章	GNSS 导航定位技术应用	196
§ 8.1	GNSS 在大地测量与地球动力学研究中的应用	196
8.1.1	在大地测量中的应用	196
8.1.2	在地球动力学研究中的应用	199
§ 8.2	GNSS 在地震灾害监测与预报中的应用	200
§ 8.3	GNSS 在气象中的应用	204
8.3.1	气象学简介	204
8.3.2	气象学分类	205
8.3.3	GPS /MET 的实际应用和应用前景	206
§ 8.4	GNSS 在航空中的应用	208
8.4.1	辅助空中三角测量	208

8.4.2 航空导航	210
§ 8.5 GNSS 在海洋测绘中的应用	211
8.5.1 海上定位	211
8.5.2 水下 GPS 定位系统	213
§ 8.6 GNSS 在交通系统中的应用	216
8.6.1 车辆定位系统	216
8.6.2 智能交通中的车辆导航系统	217
§ 8.7 GNSS 在形变监测中的应用	218
8.7.1 大坝外观连续变形监测	218
8.7.2 监测滑坡变形	220
8.7.3 在地面沉降监测中的应用	221
§ 8.8 GNSS 在精细农林、旅游考古中的应用	222
8.8.1 在农业中的应用	222
8.8.2 在林业中的应用	223
8.8.3 在旅游户外运动中的应用	224
§ 8.9 GNSS 在授时中的应用	225
§ 8.10 GNSS 在其他领域中的应用	227
8.10.1 GNSS 在土地资源调查中的应用	227
8.10.2 GNSS 技术在水土流失监测中的应用	228
第 9 章 全球导航卫星系统技术发展	229
§ 9.1 GPS 现代化	229
9.1.1 GPS 现代化项目背景	229
9.1.2 空间部分现代化	230
9.1.3 地面控制部分现代化	231
9.1.4 GPS 信号现代化	231
9.1.5 GPS 现代化实施和信号容量	232
9.1.6 GPS III 系统特点	234
§ 9.2 GALILEO 卫星导航系统	235
9.2.1 GALILEO 计划背景	235
9.2.2 GALILEO 系统服务	236
9.2.3 GALILEO 系统架构	238
9.2.4 系统可协作性和安全性	241
§ 9.3 GLONASS 卫星导航定位系统	241

9.3.1	GLONASS 系统背景	241
9.3.2	GLONASS 系统组成	242
9.3.3	GLONASS 现代化	244
§ 9.4	“北斗”卫星导航定位系统	245
9.4.1	“北斗”卫星导航系统概述	245
9.4.2	“北斗”双星定位系统架构	246
9.4.3	“北斗”双星定位系统的定位原理	247
9.4.4	“北斗”双星导航定位系统的功能和性能	248
9.4.5	“北斗二号”导航计划	249
参考文献		251
附录 本书引用的缩写词		259

Contents

Chapter 1 Introduction	1
§ 1.1 Brief Introduction of Satellite Navigation Techniques	1
1.1.1 Evolution of Satellite Navigation Techniques	1
1.1.2 Evolution of GNSS	5
§ 1.2 GNSS Architecture	7
1.2.1 Global Component	7
1.2.2 Local Components	11
1.2.3 User Segment	14
1.2.4 External Components	14
§ 1.3 GNSS Applications	14
1.3.1 Applications in Transportation	14
1.3.2 Applications in Surveying and Mapping	16
1.3.3 Other Applications	17
Chapter 2 GNSS Spatial and Temporal Datum	19
§ 2.1 GNSS Coordinate Systems	19
2.1.1 Basic Concepts	19
2.1.2 Conventional Celestial Reference System	22
2.1.3 Conventional Terrestrial Reference System	26
2.1.4 World Geodetic System	31
2.1.5 International Terrestrial Reference Frame	33
2.1.6 PZ-90 Coordinate System	36
2.1.7 China Geodetic Coordinate System	39
§ 2.2 Time Systems	43
2.2.1 Basic Concepts	43
2.2.2 Universal Time System	44
2.2.3 Atomic Time	45
2.2.4 Dynamic Time	46
2.2.5 Universal Time Coordinate	47
2.2.6 GPS Time	47

2. 2. 7 Julian Date	48
§ 2. 3 Establishment and Maintenance of Time System Frames	49
2. 3. 1 Establishment of Time System Frames	49
2. 3. 2 Maintenance of Time System Frames	49
Chapter 3 GNSS Satellite Motion and Ephemerides	52
§ 3. 1 Non-perturbation Motions of GNSS Satellites	52
3. 1. 1 The Satellite Motion Equations of Two-body Problem	52
3. 1. 2 Kepler's Three Laws	53
3. 1. 3 The Satellite Orbit Parameters	55
3. 1. 4 Calculation of True Anomaly	55
3. 1. 5 The Satellite Instantaneous Position	57
3. 1. 6 The Satellite Velocity	59
§ 3. 2 Perturbation Motions of GNSS Satellites	61
3. 2. 1 Perturbation Forces and Equation of Satellite Motions	61
3. 2. 2 The Effect of Non-spherical Gravitational Potential on Satellite Orbits	62
3. 2. 3 The Effect of Solar and Lunar Gravitation on Satellite Orbits	63
3. 2. 4 The Effect of Sunlight Pressure on Satellite Orbits	63
3. 2. 5 The Effect of Earth Tide Perturbation Force on Satellite Orbits	64
§ 3. 3 GNSS Satellite Ephemerides	64
3. 3. 1 GPS Broadcast Ephemerides	64
3. 3. 2 GPS Precise Ephemerides	66
3. 3. 3 Calculate GPS Satellite Coordinates from Broadcast Ephemerides	70
3. 3. 4 Calculate GPS Satellite Coordinates from Precise Ephemerides	72
3. 3. 5 GLONASS Satellite Ephemerides	72
Chapter 4 GNSS Satellite Signals and Principle of Positioning	74
§ 4. 1 GPS Navigation Message	74
4. 1. 1 GPS Navigation Message Format	74
4. 1. 2 GPS Navigation Message Content	75

§ 4.2 GNSS Ranging Code Signals and Pseudorange Measuring Principle	77
4.2.1 Codes	77
4.2.2 Pseudo-Random Noise Code	78
4.2.3 GPS Satellite Ranging Code Signals	80
4.2.4 Pseudorange Measuring Principle	82
§ 4.3 GNSS Carrier Phase and Carrier Phase Measuring Principle	83
4.3.1 GPS Carrier Phase Signals	83
4.3.2 Modulation of GPS Signals	84
4.3.3 Demodulation of GPS Signals	85
4.3.4 Carrier Phase Measuring Principle	87
§ 4.4 GLONASS Satellite Signal and GALILEO Satellite Signal	88
4.4.1 GLONASS Satellite Signals	88
4.4.2 GALILEO Satellite Signals	93
§ 4.5 Satellite Positioning Principle	95
Chapter 5 GNSS Static Positioning Principles	97
§ 5.1 Classification of Static Positioning	97
§ 5.2 The Errors and Effects in GNSS Positioning	98
5.2.1 Satellite Biases	99
5.2.2 Signal Propagation Effects	101
5.2.3 Multipath	109
5.2.4 Receiver Errors	110
5.2.5 Other Errors	111
§ 5.3 GNSS Static Absolute Positioning Principles	113
5.3.1 Code Pseudorange Static Absolute Positioning	113
5.3.2 Phase Pseudorange Static Absolute Positioning	114
§ 5.4 GNSS Static Relative Positioning Principle	115
5.4.1 The Observation Equation of Static Relative Positioning	116
5.4.2 Relativity of Phase Observation Linear Combination	120
§ 5.5 The Linear Combination of Different Frequency Signals	123
§ 5.6 Ambiguity Resolution and Cycle Slips Detection	126
5.6.1 Ambiguity Resolution	126
5.6.2 Cycle Slips Detection and Reparation	131

Chapter 6 GNSS Kinematic Positioning Principles	136
§ 6.1 GNSS Kinematic Absolute Positioning Principles	136
6.1.1 Code Pseudorange Kinematic Absolute Positioning	136
6.1.2 Phase Pseudorange Kinematic Absolute Positioning	138
§ 6.2 Differential GPS Positioning Principles	140
6.2.1 Pseudorange Differential Principles	140
6.2.2 Code Pseudorange Smoothing	141
§ 6.3 Carrier Phase Differential GPS Principles	144
6.3.1 Carrier Phase DGPS	144
6.3.2 Kinematic Ambiguity Resolution	146
§ 6.4 GNSS Augmentation Systems	150
6.4.1 DGPS	150
6.4.2 LADGPS	151
6.4.3 WADGPS	152
§ 6.5 GNSS Kinematic Navigation Positioning	156
6.5.1 Precise Point Positioning	156
6.5.2 Network RTK	158
6.5.3 Pseudo-satellite Positioning	162
6.5.4 Integrity Monitoring	164
Chapter 7 GNSS Data Processing	171
§ 7.1 Data Preprocessing	171
7.1.1 GNSS Observation Files	172
7.1.2 GNSS Observation Equations	173
§ 7.2 Network Adjustment	177
§ 7.3 High Precise GNSS Softwares	179
7.3.1 GAMIT/GLOBK Software	179
7.3.2 BERNESE Software	189
Chapter 8 Applications of GNSS	196
§ 8.1 Applications in Geodesy and Geodynamics	196
8.1.1 Applications in Geodesy	196
8.1.2 Applications in Geodynamics	199
§ 8.2 Applications in Seismology	200
§ 8.3 Applications in Meteorology	204

8.3.1	Introduction of Meteorology	204
8.3.2	Categories of Meteorology	205
8.3.3	GPS/MET	206
§ 8.4	Applications in Aviation	208
8.4.1	GPS-supported Photogrammetry	208
8.4.2	Air Navigation	210
§ 8.5	Applications in Oceanography	211
8.5.1	Positioning Application	211
8.5.2	Underwater GPS Positioning System	213
§ 8.6	Applications in Transportation	216
8.6.1	Vehicle Navigation	216
8.6.2	Intelligent Transportation	217
§ 8.7	Applications in Deformation Monitoring	218
8.7.1	Application in Dam Deformation	218
8.7.2	Application in Landslide Deformation	220
8.7.3	Application in Land Subsidence Monitoring	221
§ 8.8	Applications in Precise Agriculture, Forestry, Traveling and Archeology	222
8.8.1	Applications in Agriculture	222
8.8.2	Applications in Forestry	223
8.8.3	Applications in Outdoor Sports and Tourism	224
§ 8.9	Timing Application	225
§ 8.10	Other Applications	227
8.10.1	Applications in Land Resource Investigation	227
8.10.2	Applications in Soil and Water Loss Monitoring	228
Chapter 9	New Development of GNSS	229
§ 9.1	GPS Modernization	229
9.1.1	Background of GPS Modernization Program	229
9.1.2	Space Segment Modernization	230
9.1.3	Control Segment Modernization	231
9.1.4	GPS Modernization Signals	231
9.1.5	GPS Modernization Performance and Signal Capabilities ...	232
9.1.6	GPS III Features	234
9.2	GALILEO	235