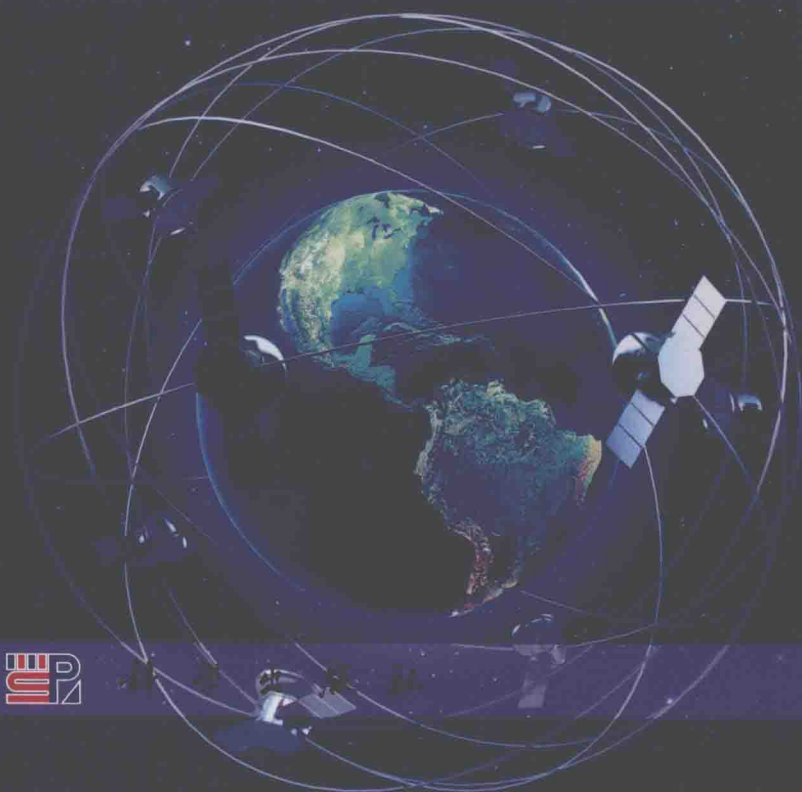


· 空间技术与应用学术著作丛书 ·

导航卫星精密定轨技术

王小亚 胡小工 蒋虎 赵群河 著

The Precise Orbit Determination
Technique of GNSS Satellites



科学出版社

空间技术与应用学术著作丛书

导航卫星精密定轨技术

王小亚 胡小工 蒋 虎 赵群河 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对我国北斗导航系统发展和深化的需要,从全球卫星导航系统(GNSS)和精密定轨现状出发,介绍导航卫星精密定轨的基本理论和方法,结合实测导航数据处理所需考虑的各种观测模型和动力学模型误差,给出最新的误差改正方法和模型,建立观测方程和动力学方程,介绍目前常用的 GNSS 数据处理软件包求解方程所采用的最小二乘和滤波算法,探讨 GNSS 数据处理周跳探测和模糊度解算方法,根据实测导航数据讲述导航卫星精密定轨的过程和处理技巧,包括单星定轨、多星定轨、轨道机动和快速恢复及轨道正确性评定,最后,结合我国卫星导航系统二期的特点,介绍星地/星间联合定轨和导航电文拟合情况,讨论影响导航卫星轨道精度的几大误差源。本书将理论和实测数据处理及误差分析相结合,将常规导航卫星长弧精密定轨和轨道机动与快速恢复短弧定轨相结合,将导航卫星精密定轨和导航电文生成相结合,从北斗导航二代一期星地独立定轨到二期星间链路星地/星间联合定轨都给予系统而翔实的介绍和定轨结果分析,理论和实际应用相结合,各章又有一定的独立性和完整性,便于随时查阅。

本书可供航天、大地测量、天文、地球科学等领域从事 GNSS 研究、各类空间飞行器精密定轨、北斗导航系统研究及应用科技人员参考,也可作为高等院校有关专业师生教学参考书和研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

导航卫星精密定轨技术 / 王小亚等著. —北京:
科学出版社, 2017.9

(空间技术与应用学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-054648-7

I. ①导… II. ①王… III. ①卫星定轨—卫星定轨
IV. ①TN967.1②P123.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 237781 号

责任编辑:王艳丽

责任印制:谭宏宇 / 封面设计:殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

上海叶大印务发展有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 11 月第一次印刷 印张:16 1/2 插页:8

字数:384 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

导航卫星精密定轨技术对全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)是至关重要的,GNSS泛指所有的卫星导航系统,包括全球的、区域的和增强的,目前主要包括美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、俄罗斯的格洛纳斯卫星导航系统(GLONASS)、欧洲的伽利略(Galileo)系统、中国的北斗卫星导航系统(BDS)、日本的准天顶卫星系统(QZSS)和印度区域导航卫星系统(IRNSS),以及相关的增强系统,如美国的广域增强系统(WAAS)、欧洲的欧洲静地导航重叠系统(EGNOS)和日本的多功能运输卫星增强系统(MSAS)等,还涵盖在建和以后要建设的其他卫星导航系统。GNSS是个多系统、多层面、多模式的复杂组合系统,它是继美国国防部于1978年开始发展建立的GPS、俄罗斯于1993年开始建立的GLONASS、欧盟于20世纪90年代中期开始建立的EGNOS、欧盟于1999年开始研制的Galileo系统、中国于2000年开始的北斗导航试验系统(第一代系统)和2007年开始建立的第二代中国北斗卫星导航系统等逐渐形成的新概念,随着航天技术与空间科学的不断发展,GNSS目前已发展成为军事、航天航空、科学研究、工程测量、大地测量、数字地球、地理信息、地球物理和环境监测等许多方面监测和研究的工具和手段,而这些应用若要发展得好,首先就要进行这些卫星的精密定轨,卫星的精密定轨精度越高,GNSS性能越好,应用也越广泛和精确。目前GPS和GLONASS星座完整,测站分布较均匀和广泛,数据处理历史也有20多年了,模型相对精确,定轨精度较高,而我国BDS和欧洲的Galileo系统才开始进行全球星座布网,预计2020年全球布网完成,全球建站也刚刚起步,分布不均匀,其导航定位性能紧紧依赖导航卫星精密定轨精度,精密定轨技术面临不断改进和提高的紧迫局面,为此,设立了国家重大专项课题对此进行攻关,作者参加和负责其中多个课题,主要是建立我国导航卫星精密定轨系统,提供卫星广播星历,精化精密定轨所需有关模型等,为了使更多对导航卫星精密定轨技术感兴趣和想了解我国北斗精密定轨过程的读者与科研工作者能够详细地了解这方面的知识以及快速深入地掌握GNSS数据处理,不断提高GNSS精密定轨精度和拓展GNSS应用,作者将10多年从事我国卫星导航系统有关精密定轨工作进行总结和整理,形成此书。本书从GNSS精密定轨原理、方法和数据处理技巧等出发,结合我国卫星导航精密定轨实际和GNSS精密定轨最新

发展理论和模型,以实测数据处理和我国导航系统一、二期的具体部署与应用为依据,论述导航卫星精密定轨技术,有非常实用的理论价值和工程应用价值,对我国卫星导航系统性能的提高具有重要意义。

本书第1章绪论主要介绍目前的几大导航系统和目前精密定轨现状及特点;第2章介绍导航数据处理常用的时间、坐标与常数系统;第3章卫星轨道及其运动方程讲述卫星轨道摄动理论和基本的导航卫星轨道知识;第4章GNSS观测方程讲述GNSS测量原理和常用的几种观测方程的建立;第5章GNSS观测模型讲述GNSS观测中的所有误差源及其模型和改正方法;第6章GNSS动力学模型讲述所有的动力学模型误差及其改正方法;第7章最小二乘批处理和滤波解算介绍常用的两种方程求解算法;第8章讲述GNSS数据处理中周跳探测和模糊度解算的方法及其影响;第9章导航卫星精密定轨数据处理介绍我国导航系统常规精密定轨的过程、方法和处理技巧,包括预处理、轨道监视与倒单点定位、初始轨道确定、单星定轨、多星定轨、轨道正确性评定等;第10章星地/星间联合定轨讲述我国卫星导航系统二期星间链路的引入所实现的自主导航和进行星地/星间联合定轨精度性能的提高情况;第11章导航电文拟合介绍我国导航系统三类卫星GEO/IGSO/MEO在电文拟合中遇到了与GPS不同的情况及其处理方法;第12章导航卫星轨道误差分析讲述导航卫星精密定轨的几大误差源影响情况。

本书的撰写基于作者多年在我国导航卫星精密定轨上的积淀,非常感谢中国科学院上海天文台吴斌研究员、朱文耀研究员,上海微小卫星工程中心沈学民研究员、陈宏宇研究员,解放军定位总站刘利研究员和郭睿高工,总参测绘研究所徐天河高工,中国测绘研究院赵春梅研究员和西安卫星测控中心王家松研究员在科研上的大力支持和帮助。感谢中国科学院上海天文台陈艳玲副研究员和唐成盼博士提供了第11章材料,感谢上海天文台邵璠博士、张晶和李晓波对部分章节的整理,书中的参考文献和排版也由张晶和邵璠博士完成。最后,感谢上海天文台各位领导和同事多年来对作者的大力支持和关心!

本书的出版得到国家重大专项课题“导航卫星高精度光压摄动建模研究”(项目编号:GFZX0301020316)、“精密定轨所需卫星关键参数精确标定技术”(项目编号:GFZX0301030114)、“试验星验证信处系统”(项目编号:ZCC2013-Y0013-F-QG)、“星地/星间联合定轨”(项目编号:GFZX0301020201)以及科技部基础性工作专项项目(项目编号:2015FY310200),国家重点研发计划(资助号:2016YFB0501405),国家自然科学基金面上项目(项目编号:11173048,10873029)和上海市空间导航与定位技术重点实验室(项目编号:06DZ22101)的大力资助,在此一并感谢!

王小亚

2017年5月

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 GNSS 概述	2
1.2 GNSS 历史	2
1.3 GNSS 介绍	4
1.3.1 GPS	4
1.3.2 GLONASS	6
1.3.3 Galileo 系统	7
1.3.4 BDS	8
1.4 GNSS 卫星精密定轨现状	10
1.4.1 导航卫星精密定轨	10
1.4.2 MGEX	14
1.4.3 iGMAS	15
1.5 本书结构	18
第 2 章 时间、坐标与常数系统	20
2.1 时间系统	20
2.1.1 太阳系质心动力学时和原时	20
2.1.2 地球动力学时或者地球时	20
2.1.3 世界时和恒星时	21
2.1.4 国际原子时和协调世界时	25
2.1.5 GNSS 时	25
2.2 时间系统的相互转换	26
2.3 坐标系统	29
2.3.1 坐标系的定义	29

2.3.2	常用坐标系	30
2.3.3	GPS 采用的地固坐标系 WGS-84	31
2.3.4	GLONASS 采用的地固坐标系	31
2.3.5	Galileo 系统采用的地固坐标系	32
2.3.6	BDS 采用的地固坐标系 CGCS2000	32
2.4	坐标系统之间相互转换	32
2.4.1	五种常用地心坐标系之间转换	32
2.4.2	地固坐标系到 J2000.0 惯性系的转换	34
2.4.3	星固坐标系到惯性坐标系的转换	35
2.4.4	站心坐标系与 J2000.0 地心天球坐标系、地固坐标系的相互转换	36
2.4.5	地固坐标系与大地坐标系的转换	36
2.4.6	J2000.0 地心天球坐标系与 RTN 地心轨道平面坐标系间的转换	37
2.4.7	直角坐标与轨道根数间的变换	38
2.5	GNSS 数据处理中的常数系统	40
第 3 章	卫星轨道及其运动方程	41
3.1	基本运动学定律	41
3.2	开普勒运动	42
3.3	卫星运动学方程	47
3.3.1	卫星受摄二阶运动方程	47
3.3.2	卫星变分运动方程	48
3.3.3	轨道积分	49
3.3.4	偏导数	55
3.4	GNSS 广播星历	57
3.5	GNSS 卫星导航电文	59
3.5.1	GPS 导航电文及星历	62
3.5.2	GLONASS 卫星导航电文及星历	64
3.5.3	GNSS 导航信号比较分析	66
3.5.4	Galileo 导航电文及星历	68
3.5.5	BDS 导航电文及星历	71
3.6	IGS 精密星历	72
3.6.1	拉格朗日插值法	72
3.6.2	牛顿插值法	73
3.6.3	切比雪夫插值法	73

第 4 章 GNSS 观测方程	75
4.1 GNSS 非差载波相位和伪距观测方程	75
4.2 消除电离层的 LC 组合观测方程	77
4.3 GNSS 差分观测方程	77
4.3.1 GNSS 单差观测方程	78
4.3.2 GNSS 双差观测方程	80
4.3.3 GNSS 三差观测方程	82
第 5 章 GNSS 观测模型	84
5.1 GNSS 卫星有关的误差	84
5.1.1 轨道误差	84
5.1.2 卫星钟差	84
5.1.3 卫星天线相位中心改正	85
5.1.4 卫星硬件延迟	89
5.2 GNSS 测站有关的误差	90
5.2.1 接收机天线相位中心改正	90
5.2.2 接收机钟差	91
5.2.3 固体潮改正	92
5.2.4 海潮负荷改正	92
5.2.5 极潮改正	93
5.2.6 大气潮改正	93
5.2.7 接收机硬件延迟	94
5.2.8 测量误差	96
5.3 GNSS 传播路径误差	96
5.3.1 电离层延迟误差	96
5.3.2 对流层延迟误差	106
5.3.3 相对论效应	111
5.3.4 多路径效应	112
5.3.5 地球自转改正	115
5.3.6 天线相位缠绕	116
第 6 章 GNSS 动力学模型	117
6.1 N 体摄动	117
6.2 地球形状摄动	118

6.3	太阳直接辐射压摄动	118
6.4	地球形变摄动	119
6.4.1	固体潮摄动	119
6.4.2	海潮摄动	120
6.4.3	大气潮摄动	121
6.4.4	地球自转形变摄动	122
6.5	广义相对论摄动	122
6.6	地球辐射压摄动	123
6.7	卫星自身热辐射压摄动	125
6.8	卫星天线电磁辐射压摄动	129
6.9	地球扁率间接摄动	130
6.10	月球扁率 J_2' 项摄动	131
6.11	经验力	133
6.12	摄动量级估计和力学模型的选取	133
第 7 章	最小二乘批处理和滤波解算	137
7.1	最小二乘批处理	139
7.2	Kalman 滤波	141
7.3	先验约束条件最小二乘平差	144
7.3.1	先验参数约束	144
7.3.2	先验基准	145
7.3.3	准稳定基准	146
7.4	常用 GNSS 数据处理软件包解算方法简介	148
7.5	方法比较	148
第 8 章	周跳探测和模糊度解算	150
8.1	周跳探测和修正	151
8.1.1	TECR 法与 MW 法周跳探测	151
8.1.2	基于多观测方程融合的周跳探测方法	153
8.1.3	利用载波相位双差观测值探测与修复周跳	154
8.1.4	改进后的 TurboEdit 周跳探测与修复方法	156
8.2	LAMBDA 方法原理	158
8.3	模糊度浮点解	158
8.4	整周模糊度固定	160

第 9 章 导航卫星精密定轨数据处理	164
9.1 导航卫星精密定轨要求	164
9.2 多站、不同类型数据精密定轨方案	165
9.3 精密定轨预处理	168
9.3.1 公共误差修正	168
9.3.2 相位平滑伪距	168
9.3.3 标准点计算	169
9.4 轨道监视与倒单点定位	169
9.5 初始轨道确定	169
9.5.1 非线性化 Bancroft 算法定位原理	170
9.5.2 定轨结果分析	173
9.6 单星定轨	173
9.7 多星定轨	176
9.8 轨道正确性评定	184
9.9 广播星历生成	186
9.10 轨道机动与快速恢复	187
9.10.1 轨道机动和快速恢复策略	187
9.10.2 轨道机动期间定轨	187
9.10.3 轨道快速恢复	188
第 10 章 星地/星间联合定轨	190
10.1 自主导航	190
10.2 星间链路体制设计	192
10.2.1 星间链路研究进展	192
10.2.2 星间链路测量特征分析	192
10.2.3 自主导航运行模式	193
10.3 星地/星间联合定轨	197
10.3.1 星地/星间联合定轨方案	197
10.3.2 参数估计理论与算法研究	198
10.3.3 星地/星间联合定轨仿真试验与精度分析	204
10.3.4 北斗新一代试验卫星星间链路测量对提升空间信号精度的贡献	222
第 11 章 导航电文拟合	225
11.1 BDS 电文拟合	225

11.2	小倾角卫星电文	226
11.3	超限处理及有效性验证	227
第 12 章 导航卫星轨道误差分析		230
12.1	太阳辐射压误差影响	230
12.1.1	太阳辐射压摄动特点	230
12.1.2	太阳辐射压经验模型	231
12.1.3	太阳辐射压物理模型	231
12.1.4	太阳辐射压半经验半物理模型	232
12.2	相位中心改正误差影响	235
12.3	静态参数误差对轨道的影响	237
12.4	EOP 误差对轨道的影响	238
12.5	测站坐标误差对轨道的影响	243
参考文献		244

彩图

导航卫星精密定轨技术从卫星上天那天就已经开始研究,初期由于卫星测量技术、力学模型和数据处理水平限制等,定轨技术和精度都比较差。20世纪70年代,随着这些方面的改善和计算能力的提高以及力学模型的数学化,定轨精度从原来的百公里级提高到百米甚至几十米的水平。20世纪80年代,由于重力场模型、固体潮和海潮等模型的建立和提高以及计算机技术的发展,定轨精度可以达到米级甚至分米级的水平。20世纪90年代,随着海洋测高卫星对定轨精度的高要求和多种测量技术的发展,综合测量及各种系统误差和模型误差的模制,卫星精密定轨得到了很大程度的发展,实现了厘米级定轨的重大突破,目前有些卫星的定轨精度甚至可以达到1 cm左右。随着各种不同卫星计划的实施,定轨的方法也出现了多样化,目前定轨方法主要有动力学法、简化动力学法、运动学法(或几何法)和简化运动学法(或简化几何法)四种,其精度在测量条件良好的情况下基本相当,但具有不同的优缺点,可根据不同情况进行选择(Tseng et al., 2014; Montenbruck et al., 2013; Steigenberger et al., 2011; Dow et al., 2005; Dow et al., 1995)。

动力学法就是基于对作用于卫星上作用力的清晰了解和力学模型的精准模制,建立卫星的动力学和运动学方程,通过解算初始历元轨道参数和动力学模型参数的方法,达到精密定轨的目的。其中力学模型越清楚越精确,定轨精度越高。而对力学模型复杂或难于模拟的动态力学环境(如变轨时机动力),其定轨难度会大大增大,精度也大大降低。几何法定轨就是利用航天器所带接收机得到的导航卫星的观测数据如GPS或北斗数据(导航电文和观测数据),通过同时观测4颗以上卫星进行绝对单点定位,得到航天器的位置来确定卫星轨道。该方法简单,完全独立于作用在卫星上的力的认识和力学模型模制技巧以及计算能力要求,仅依靠卫星测量精度(对卫星导航来说就是伪距(PR)和相位测量精度)和观测到的导航卫星的数目及几何构型,因此其轨道和精度非常不稳定,甚至出现跳变和野值,为此研究人员发展了简化动力学方法和简化运动学方法。简化运动学方法就是利用纯几何法定轨的结果和先验轨道的绝对约束产生的不同历元间的三维相对位置,来减少几何构型差和相位跳变(失锁)等引起的定位结果很差或者异常的情况,达到稳定和平滑定轨的目的,其定轨结果依赖先验轨道的选取。简化动力学方法就是动力学模型采取放松和简化,依靠估计一些经验参数来吸收由力学模型不准确而引起的误差,其中估计的动力学参数和三个方向的经验力(沿迹、法向和径向)可以根据实际定轨情况进行调整。根据以上分析,对于导航卫星,常规情况下拟采

用动力学法进行精密定轨,在复杂摄动力存在的情况下,也可采用简化动力学法进行定轨,在卫星机动情况下,由于未知机动力的存在,拟采用几何法定轨。

目前最具代表性的卫星导航系统是美国的 GPS,其全球覆盖、被动式全天候、高精度、连续实时三维定位等特点,使其成为导航定位定轨最先进、最理想的技术之一。其载波相位的距离测量精度在毫米量级,伪距测量精度在米级左右,可以为空中、海洋和陆地各类用户提供全天候连续导航定位,而这些导航定位都需要已知导航卫星的精密轨道。目前诸多星载研究领域和应用也凭借 GPS 信号实现了实时定轨定位任务,如 1984 年第一个搭载定轨成功的遥感卫星 LANDSAT 5,1992 年的雷达测高卫星 TOPEX/POSEIDON,1995 年的大气掩星探测卫星 GPS/MET 和后来的 CHAMP、GRACE、COSMIC、GOCE 等,大量的近地轨道(low earth orbiters, LEO)利用 GPS 定轨,其设备和定轨策略及方法也越来越成熟和完善,精度也越来越高,对导航卫星精密定轨技术要求也越来越高,为此,本书将进行详细介绍,满足我国广大用户的需要和我国导航系统发展的需要(Melachroinos et al., 2013; Morrison, 2010; Bock et al., 2009; Hwang et al., 2009; Jaggi et al., 2009; Bock et al., 2007)。

1.1 GNSS 概述

GNSS 是全球卫星导航系统(global navigation satellite system)的简称,它泛指所有的卫星导航系统,包括全球的、区域的和增强的,目前主要包括美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 Galileo 系统、中国的 BDS、日本的 QZSS 和印度的 IRNSS,以及相关的增强系统,其基本技术就是基于卫星技术,测量接收机和几个同时观测的卫星之间的距离,其中卫星的位置可通过广播星历被预报,并与 GNSS 测量信号一起被广播,通过几颗(至少 4 颗)已知位置的卫星和测量到的接收机与卫星之间的距离就可以确定接收机的位置,如果接收机的位置变化,那么也可以测量接收机的速度。GNSS 最重要的应用是 PNT (positioning, navigation, timing),即定位、导航和授时,但是这一切的基础是首先要知道卫星的位置,这就是导航卫星精密定轨和广播星历生成的问题。

1.2 GNSS 历史

早在 20 世纪 50 年代,美国便开始进行卫星定位系统的研制。由美国军方研制的子午仪卫星定位系统(transit navigation satellite system),于 1958 年开始研发并于 1964 年正式投入使用。该系统基于五六颗 LEO 极轨卫星组成的星座工作,虽然定位精度不高且无法给出高度信息,然而,子午仪卫星定位系统验证了基于空间技术发展卫星导航系统进行定位的可行性,并且显示出该技术在导航方面的巨大优越性。随着全球军备竞赛的开始和全球科技的迅猛发展,美国军方及民用部门迫切地需要卫星导航技术尽快地成熟起来。

为此,美国海军研究实验室(Naval Research Lab, NRL)提出了名为“Timation”的全球

定位网计划,该计划最初设想由12~18颗10 000 km高度的中轨道(MEO)卫星组成,于1967年、1969年和1974年各发射了一颗试验卫星,在这些卫星上,初步试验了原子钟授时系统,这是现在成熟的卫星导航系统实现精确定位的一个重要基础。“Timation”计划开展的同时,美国空军则提出了名为“621-B”的以每星座四五颗卫星组成三四个星座的计划,这些卫星中除1颗采用地球静止轨道(GEO)卫星外,其余的都使用倾斜同步轨道(IGSO)卫星,该计划以伪随机码(PRN)为基础,调制卫星测距信号,PRN的成功运用是卫星导航系统得以最终实现的另一个重要基石。

由于“Timation”与“621-B”两个计划都是为提供全球定位而设计的,所以为节省开支,美国国防部(U. S. Department of Defense, DoD)于1973年将其合二为一,命名为卫星导航防御系统(DNSS),随后不久正式更名为众所周知的GPS。GPS运行之初,最高质量的信号被保留用于军事用途,可用于民用的信号根据选择可用性(selective availability, SA)政策,人为添加了误差,降低了用户定位精度,这限制了一些对定位精度要求较高的民用行业,例如,民航业单独使用GPS信号无法达到美国联邦航空管理局(FAA)针对精确飞行导航所设定的要求,为此美国联邦航空管理局及美国交通部为提升飞行精确度发展了广域增强系统(WAAS),通过广域差分技术提高全球定位系统的精度和可用性。随着广域差分技术的不断发展,GPS民用定位精度也得到了大幅度提升。目前,GPS定位服务已覆盖全球,在世界范围内深入人们的生产生活,成为现代生产生活中不可或缺的一部分。

在美国卫星定位系统迅猛发展的同时,其他科技强国同样在为争取卫星导航的控制权而努力。事实上,早在GPS之前,苏联GLONASS便开始正式组网,这也是美国加快GPS建设的重要原因之一。不过苏联的解体让格洛纳斯受到很大影响,正常运行卫星数量大减,甚至无法为俄罗斯本土提供全面导航服务,更无法和GPS竞争。到了21世纪初,随着俄罗斯经济的好转,俄罗斯政府填补了该系统所需的必要卫星数目,GLONASS得到了长足的发展。到2010年,GLONASS已实现100%覆盖俄罗斯领土,并于2011年10月,全面恢复24颗卫星星座,成为了覆盖全球的卫星导航系统。

与此同时,欧盟于1994年6月召开欧洲民航会议,决定建立一个真正可以独立满足几乎所有导航定位需求的民用GNSS,于是欧洲空间局(ESA)、欧盟委员会以及欧洲航行安全局,启动了“全球导航定位卫星系统”的设计与论证,Galileo系统应运而生,并于2001年4月5日在欧盟交通部长会议上获得批准。随着2005年12月和2008年4月两颗试验卫星GIOVE-A和GIOVE-B的成功发射,伽利略计划进入实验测试阶段,截至2016年9月14日,已经有14颗Galileo卫星在轨运行,初步具备了地面精确定位功能,预计2020年前实现全球卫星组网和提供全球PNT服务。

出于战略考虑,中国也一直致力于发展自主的卫星导航定位系统,从1983年开始命名为北斗导航系统(BDS),2003年“北斗一代”系统构建完成,可在区域范围内全天候、全天时提供导航、授时服务,并具短报文通信能力,已经初步具备区域导航、定位和授时能力,定位精度优于20 m,授时精度优于100 ns。2012年底,14颗北斗卫星正式运行,北斗系统空间信号接口控制文件正式版正式公布,标志着“北斗二代一期”系统正式投入运行,北斗导航业务开始对亚太地区提供无源定位、导航、授时服务。预计在2020年,北斗系统卫星星座将组网

30 余颗卫星(5GEO+3IGSO+27MEO),形成全球覆盖能力,并提供高精度的定位、导航和授时服务。

1.3 GNSS 介绍

1.3.1 GPS

GPS 是以全球 24 颗人造卫星为基础,可向全球各地全天候近实时地提供三维位置、三维速度等信息的一种无线电卫星导航定位系统。该系统由空间部分、地面监控部分和用户部分组成。空间部分由 24 颗均匀分布于 6 个轨道面的卫星组成,卫星轨道倾角约为 55° ,轨道高度约 20 000 km,卫星运动周期约为 12 h。卫星型号主要包括:BLOCK I、BLOCK II、BLOCK IIA、BLOCK IIR、BLOCK IIR - M 和 BLOCK IIF,预计 2017 年 5 月开始发射 BLOCK III 卫星。GPS 卫星信号采用频分多址(CDMA),即每颗卫星信号采用不同的 PRN,用于捕获识别卫星。在 BLOCK IIF 之前,GPS 卫星提供两个频率测距信号,两个频率 L1 和 L2 分别为 1 575.42 MHz 和 1 227.60 MHz。BLOCK IIF 开始,GPS 卫星开始提供第三个频率的测距信号 L5,其频率为 1 176.45 MHz。表 1.1 列出了不同型号卫星发射时间段、发射数量及在轨情况。

表 1.1 GPS 卫星类型

卫星型号	发射时间	卫星发射			在轨情况
		成功	失败	计划	
BLOCK I	1978~1985	10	1	0	0
BLOCK II	1989~1990	9	0	0	0
BLOCK IIA	1990~1997	19	0	0	0
BLOCK IIR	1997~2004	12	1	0	12
BLOCK IIR - M	2005~2009	8	0	0	7
BLOCK IIF	2010~?	12	0	0	12
BLOCK IIIA	2017~?	0	0	12	0
BLOCK IIIB	计划中	0	0	8	0
BLOCK IIIC	计划中	0	0	16	0
总计		70	2	36	31

地面监控部分由主控站(master control station)、注入站(ground antenna)和监测站(monitor station)三部分组成。主控站位于美国科罗拉多州春田市(Colorado. Springfield)科罗拉多空间中心,负责协调和管理所有地面监控系统,具体任务是根据所有地面监测站的观测资料推算编制各卫星的广播星历、卫星钟差和电离层改正数等,并把这些数据生成导航电文传送给注入站,同时提供 GPS 的时间基准,调整卫星状态和启用备用卫星,并兼有监测

站功能等。注入站现有3个,分别设在印度洋的迭哥伽西亚、南太平洋的卡瓦加兰和南大西洋的阿松森群岛,其主要任务是将来自主控站的卫星星历、钟差、电离层改正数和其他控制指令注入相应卫星的存储系统,并监测注入信息的正确性,且具有监测站功能。监测站有5个,除了上面的4个监测站,还有一个在夏威夷,2004年起,增加美国国家大地测量局(NGA)的6个跟踪站作为系统运控的地面监测站,2006年又增加了NGA的其余5个站作为GPS运控地面监测站。主要任务是连续观测和接收所有GPS卫星发出的信号并监测卫星的工作状况,将采集到的数据连同当地气象观测资料和时间信息经初步处理后传送到主控站。整个地面监控系统由主控站控制,地面站之间的通信系统无须人工操作,实现了高度自动化和标准化(Park, 2012)。

用户部分即GPS信号接收机,GPS信号接收机由天线、主机和电源三部分组成。GPS信号接收机天线由天线单元和前置放大器两部分组成,天线单元的作用是将GPS卫星信号的微弱电磁波能量转化为相应电流,前置放大器将接收的GPS信号放大。为减少信号损失,一般将天线和前置放大器封装成一体。主机由变频器、信号通道、微处理器、存储器和显示器组成,主要作用是对天线接收到的信号进行数据处理、记录、存储、状态及结果显示等。电源主要有内置电源(一般为锂电池)和外接电源两种,为接收机提供工作时必要的能源。GPS信号接收机主要功能是捕获到按一定卫星截止角所选择的待测卫星,并跟踪这些卫星的运行。当接收机捕获到跟踪的卫星信号后,就可测量出接收天线至卫星的伪距、相位和距离变化率,解调出卫星轨道参数等导航电文数据。根据这些数据,接收机中的微处理计算机就可按定位解算方法进行定位计算,计算出用户所在地理位置的经纬度、高度、速度、时间等信息。

GPS的基本原理是测量出已知位置的卫星到用户接收机之间的距离,然后综合多颗卫星数据(至少4颗卫星)就可解算接收机的具体位置和接收机钟差。要达到这一目的,卫星的位置可以根据所获取的导航电文计算得到,而用户到卫星的距离则通过观测获得的伪距和相位值获得,由于相位值里包含相位模糊度,因此利用相位值定位还存在相位模糊度解算问题,同时,由于大气对流层和电离层的影响,这里得到的距离并不是用户与卫星之间的真实距离,而是伪距,在PNT服务时需要改正其影响。GPS使用的伪码一共有两种,分别是民用的C/A码和军用的P(Y)码。C/A码频率1.023 MHz,重复周期1 ms,码间距1 μ s,相当于300 m;P码频率10.23 MHz,重复周期266.4天,码间距0.1 μ s,相当于30 m;而Y码是在P码的基础上形成的,保密性能更佳。导航电文包括卫星星历、工作状态、钟差改正数、电离层时延改正数等信息。当用户接收到导航电文时,利用导航电文中的广播星历、电离层改正、卫星钟差信息等数据就可推算出卫星发射电文时所处位置和距离改正值,从而根据最小二乘算法解算出用户所在的位置速度和钟差等信息。GPS监测站扩充后,显著改善了Kalman滤波器的性能,估计的卫星轨道和钟差更加精确和稳健,并且地面跟踪站的增加可以实现对GPS卫星100%弧段可见,增强了GPS完备性监测能力。GPS采用轨道根数和相应的一些摄动系数来发布星历,目前GPS广播每小时更新,外推时间为2 h,用户距离精度(URE)优于1 m(图1.1)。利用外部事后精密星历比较法对比分析2012年GPS和BDS卫星广播星历的轨道和钟差精度,也发现GPS卫星广播星历轨道URE的平均误差在1 m左

右,钟差的平均误差在 6 ns 左右(Barr, 2013; Barchesky, 2011; Cohenour, 2009; Beutler et al., 1996)。

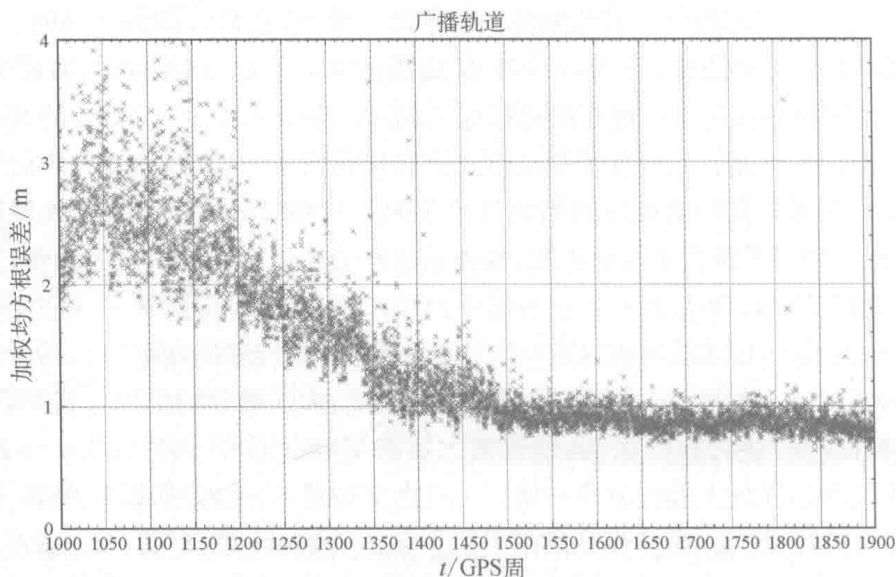


图 1.1 GPS 广播星历精度

与 IGS^① 快速轨道产品比较, http://acc.igs.org/media/Gmt_sum_BRDC_all_orb_ALL.gif

GPS 实现的空间基准采用 WGS84 坐标系,该坐标系通过分布在世界各地的卫星观测站坐标建立,其初次精度为 1~2 m。在 1994 年 1 月 2 日,通过 10 个观测站在 GPS 测量方法上的改正,得到了 WGS84(G730),G 表示由 GPS 测量得到,730 表示为 GPS 时间第 730 周。1996 年美国测绘局(National Imagery and Mapping Agency, NIMA)为美国国防部重新进行了测定,实现了新的 WGS 基准 WGS(G873),由于加入了美国海军天文台(USNO)站和北京站的改正,其东部方向加入了 31~39 cm 的改正,其他测站坐标也有不超过 1 dm 的修正。GPS 的时间基准采用 USNO 维持的 GPS 时(GPST),该时间系统起点为 1980 年 1 月 6 日 UTC^② 零时,时长与原子时相同。

美国 GPS 的建成与使用,显示了卫星导航定位巨大的优势和应用潜力,充分体现了其应用的广泛性、成熟性和无与伦比的卓越性能。然而由于该系统至今仍然完全受军方控制,其他国家不敢依赖于此单一军事系统,因此都致力于发展自身的卫星导航定位系统。

1.3.2 GLONASS

GLONASS 是俄语中“全球卫星导航系统”的缩写,该系统最早开发于苏联时期,后由俄罗斯继续该计划。事实上,GLONASS 正式组网比 GPS 还早,这也是美国加快 GPS 建设的重要原因之一。不过苏联的解体使 GLONASS 受到很大影响,正常运行的卫星数量大减,

① IGS 是国际 GNSS 服务组织的简称。

② UTC 为协调世界时简称。