

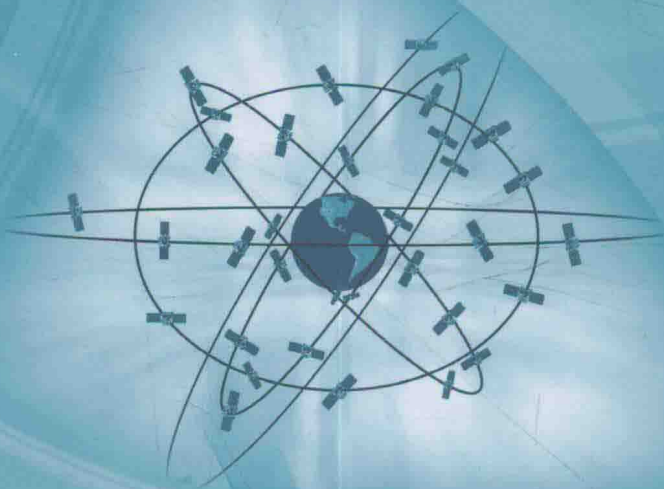


工业和信息化部“十二五”规划教材

高精度卫星导航技术

Gaojingdu Weixing Daohang Jishu

赵 剡 吴发林 刘 杨 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



工业和信息化部“十二五”规划教材

高精度卫星导航技术

赵 剡 吴发林 刘 杨 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书综合分析了全球卫星导航系统(GNSS)的发展历史、现状和地位,提出了高精度卫星导航技术的内容范围;作为基础理论较为系统地介绍了GNSS系统的组成、时空参照系统、信号结构、观测量测量原理以及定位解算方法;详细地阐述了GNSS接收机、GNSS差分、高精度动态定位、GPS/INS组合导航、GNSS姿态测量等高精度卫星导航技术涉及的系统结构、信息处理理论和方法。

本书可以作为研究生和本科高年级学生的教材或教学参考书,也可以作为从事导航专业特别是从事卫星导航技术应用的工程技术人员和科技工作者的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高精度卫星导航技术 / 赵剡, 吴发林, 刘杨编著

—北京:北京航空航天大学出版社,2016.4

ISBN 978-7-5124-2108-0

I. ①高… II. ①赵… ②吴… ③刘… III. ①卫星导航—技术 IV. ①TN967.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第080500号

版权所有,侵权必究。

高精度卫星导航技术

赵 剡 吴发林 刘 杨 编著

责任编辑 刘晓明

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京兴华昌盛印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:14.25 字数:365千字

2016年5月第1版 2016年5月第1次印刷 印数:2000册

ISBN 978-7-5124-2108-0 定价:38.00元

前 言

卫星导航技术的发展已经深刻地影响到人们的日常生活、社会经济和国防建设诸多方面,甚至改变着科学技术研究的方式方法。正是全球卫星导航系统的建设和应用,把传统的、神秘的导航系统设计和导航技术研究从专家的研究室里解放出来,变成了普通人都是可以理解、使用和享受的活动。伴随着我国北斗卫星导航系统开放亚太局域导航服务,欧洲伽利略卫星导航系统进入组网的前期阶段,俄罗斯 GLONASS 有望在不久正式进入全面的运行状态,加上已经长期向全球开放并催生了全球卫星导航应用巨大市场的美国 GPS 的现代化进程,卫星导航技术应用的新领域、新技术、新方法不断涌现和成熟,卫星导航技术将进入一个新的发展阶段。

本书在简单介绍卫星导航系统的基础知识之后,重点阐述高精度卫星导航技术应用系统的组成和相关信息处理基础理论、数学模型和使用方法,使读者可以对高精度卫星导航新技术有一个较为全面的了解。

第 1 章 概论,比较了几种当代主要的导航技术的优缺点,回顾了卫星导航技术发展的历史,介绍了几种主要的卫星导航系统的系统组成、技术特点、发展或运行现状,提出了高精度卫星导航技术涉及的内容。

第 2 章 卫星导航系统基础,较为系统地介绍了 GNSS 时空参照系统、导航卫星轨道描述和轨道计算、GNSS 信号的信号结构、GNSS 观测量与误差分析以及用户位置速度和时间解算方法。

第 3 章 GNSS 接收机,介绍了 GNSS 接收机的发展历程、类型和体系结构,分别从射频信号处理、中频信号捕获、中频信号跟踪、同步与解调几个方面,分析了 GNSS 接收机信号的处理理论和方法,给出了 GNSS 软件接收机的设计思路。

第 4 章 差分 GNSS 技术,在分析 GNSS 伪距观测量主要误差在空间上的相关性的基础上,分别介绍了码伪距差分(包括局域差分 and 广域差分)、载波相位差分的系统组成和基本原理,阐述了单差、双差、三差和多频测量值组合在抑制误差、估计误差分量和确定整周模糊度中的作用。

第 5 章 高精度动态定位技术,围绕基于载波相位观测的动态定位技术,介绍了网络 RTK 技术和精密单点定位 (PPP) 技术,较为详细地分析了两种动态定位技术对观测量误差的处理方法、系统组成和定位精度,重点介绍了整周模糊度的确定算法。



第6章 GNSS/INS 组合导航,在介绍组合导航系统的组成和卡尔曼滤波算法的基础上,分别阐述了 GNSS/INS 松组合、GNSS/INS 紧组合和 GNSS/INS 超紧组合的系统状态方程和观测方程,分析了不同组合方式的优缺点和应用方向。

第7章 GNSS 组合姿态测量,在介绍 GNSS 单基线姿态测量和多基线姿态测量原理的基础上,分析了天线配置对姿态测量的影响,讨论了影响 GNSS 姿态测量精度的因素,并阐述了双天线姿态测量、多天线姿态测量分别与 INS 姿态测量进行组合的方法。

本书的第3章由刘杨撰写,第6章和第7章由吴发林撰写,赵荆撰写了第1章、第2章、第4章和第5章并负责全书的统稿。

在本书编写的过程中,研究室的博士或硕士研究生司帆、张晓明、杨靖、俞林杰、吴辉、吴振铤、郭凯、刘霞、梁袁、付勇、眭晓虹、王永、张之一、王志龙、张少辰、杨奎、徐雅璠等在资料整理、文字录入和图表设计等方面做了大量的工作,在此表示由衷的感谢!祝已经离校工作的同学工作顺利,生活幸福!祝依然在研究室就读的同学天天进步,学业有成!

感谢王新龙教授和杨东凯教授审阅全书并给予作者宝贵的建议。感谢书后列出的参考文献的各位作者,他们的智慧成就了本书。

— 作者

2016年3月于北京

目 录

第 1 章 概 论	1
1.1 现代主要导航技术	1
1.2 卫星导航技术的发展与现状	5
1.3 高精度卫星导航技术	11
作业思考题	14
第 2 章 卫星导航系统基础	15
2.1 GNSS 时空参照系统和轨道	15
2.1.1 GNSS 坐标系统	15
2.1.2 GNSS 时间系统	19
2.1.3 卫星运动及其轨道参数	22
2.1.4 卫星轨道摄动	24
2.1.5 卫星星历	26
2.1.6 卫星坐标计算	27
2.2 GNSS 信号	31
2.2.1 信号结构	32
2.2.2 导航电文	35
2.2.3 信号扩频与调制	41
2.3 GNSS 观测量与误差分析	43
2.3.1 码伪距测量	43
2.3.2 载波相位伪距测量	45
2.3.3 误差来源及分析	46
2.4 位置、速度和时间解算	49
2.4.1 基于码伪距的解算	49
2.4.2 基于载波相位的解算	52
2.4.3 定位精度的几何评价	54
作业思考题	56
第 3 章 GNSS 接收机	59
3.1 概 述	59
3.1.1 GNSS 接收机的发展历程	59
3.1.2 GNSS 接收机的类型	61
3.1.3 GNSS 接收机的体系结构	61
3.2 天线及射频信号处理	64



3.2.1	天 线	64
3.2.2	射频信号处理	65
3.3	中频信号处理——信号捕获	67
3.3.1	捕获的基本原理	67
3.3.2	常用捕获算法	68
3.3.3	信号检测与判决	72
3.3.4	捕获与跟踪的转换	74
3.3.5	微弱信号捕获	75
3.4	中频信号处理——信号跟踪	77
3.4.1	跟踪的基本原理	77
3.4.2	常用的跟踪算法	77
3.4.3	跟踪环路的数学模型	79
3.4.4	跟踪带宽与滤波器设计	83
3.4.5	跟踪误差下界	84
3.4.6	矢量跟踪环路	86
3.5	基带信号处理——同步与解调	87
3.5.1	信号同步	87
3.5.2	导航电文解调	90
3.5.3	高精度量测值的产生	90
3.5.4	信道干扰对测量精度的影响	94
	作业思考题	96
第4章	差分 GNSS 技术	97
4.1	差分定位原理	97
4.1.1	伪距观测量误差分析	97
4.1.2	卫星轨道参数误差影响分析	99
4.1.3	差分系统分类	100
4.2	码差分定位	101
4.2.1	码伪距差分系统定位方法	101
4.2.2	局域差分系统定位方法	103
4.2.3	广域差分系统定位方法	103
4.3	载波相位观测量差分	106
4.3.1	单 差	107
4.3.2	双 差	109
4.3.3	三 差	111
4.4	多频测量值组合	112
4.4.1	线性组合	112
4.4.2	窄巷、宽巷和超宽巷组合	115
4.5	周跳探测和修复	117



4.5.1	周跳的概念	117
4.5.2	基于观测值变化规律的周跳探测	118
4.5.3	基于多类观测值组合的周跳探测	120
4.5.4	基于观测值估值残差的周跳探测	121
	作业思考题	122
第 5 章 高精度动态定位技术		123
5.1	引 言	123
5.2	整周模糊度求解技术	124
5.2.1	交换天线位置	124
5.2.2	利用伪距的取整估算法	125
5.2.3	LAMBDA 算法	126
5.2.4	逐级模糊度确定法	129
5.3	网络 RTK 技术	131
5.3.1	网络 RTK 关键技术	132
5.3.2	网络 RTK 系统	137
5.3.3	网络 RTK 技术的发展现状和趋势	143
5.4	精密单点定位 (PPP)	144
5.4.1	精密单点定位技术的发展现状	144
5.4.2	精密单点定位的基本原理	145
5.4.3	IGS 精密星历和卫星钟差产品	147
5.4.4	精密单点定位的主要误差源和改正模型	147
5.4.5	精密单点定位的技术优势	152
5.4.6	精密单点定位中的坐标框架	153
	作业思考题	154
第 6 章 GNSS/INS 组合导航		156
6.1	GNSS/INS 组合导航简述	156
6.2	GNSS/INS 组合导航基础	157
6.2.1	GNSS/INS 组合导航方式分类	157
6.2.2	卡尔曼滤波技术	160
6.3	GNSS/INS 松组合	162
6.3.1	松组合概述	162
6.3.2	松组合误差模型	163
6.3.3	松组合状态方程	166
6.3.4	松组合量测方程	171
6.4	GNSS/INS 紧组合	173
6.4.1	紧组合概述	173
6.4.2	紧组合状态方程	173

6.4.3 紧组合量测方程	174
6.5 GNSS/INS 超紧组合	177
6.5.1 INS 辅助 GPS 超紧组合模式	177
6.5.2 GPS/INS 深组合模式	178
6.5.3 GNSS/INS 超紧组合的卡尔曼滤波方程	180
作业思考题	181
第 7 章 GNSS 组合姿态测量	182
7.1 GNSS 组合姿态测量概述	182
7.2 GNSS 单基线姿态测量原理	183
7.2.1 单基线单差姿态测量	183
7.2.2 单基线双差姿态测量	187
7.3 GNSS 多基线姿态测量原理	191
7.3.1 双基线姿态测量	191
7.3.2 多基线姿态测量	194
7.4 GNSS 天线配置对姿态测量的影响	196
7.4.1 天线配置方法	196
7.4.2 基线矢量夹角与姿态角精度的关系	198
7.4.3 基线长度与姿态角精度的关系	199
7.4.4 基线长度与姿态解算实时性的关系	200
7.5 GNSS 姿态测量误差分析	202
7.5.1 姿态测量误差源	202
7.5.2 姿态测量方程误差	202
7.5.3 姿态测量精度因子	203
7.6 双天线 GNSS 与 INS 组合姿态测量	206
7.6.1 惯性姿态传感器组合	206
7.6.2 天线 GNSS 与 INS 组合测量	208
7.6.3 INS 辅助快速确定整周模糊度	211
7.7 GNSS 与其他系统的组合姿态测量	215
7.7.1 GNSS 与磁强计的组合姿态测量	215
7.7.2 GNSS 与 AHRS 的组合姿态测量	215
作业思考题	215
参考文献	217

第1章 概 论

1.1 现代主要导航技术

一般意义上讲,导航(Navigation)就是引导行人或飞机、航天器、舰船、车辆等运载体,使之从出发地到达目的地的过程。首先需要依照一个自然或人造的观测参考基准,确定人或运载体在观测参考基准中的当前状态,再根据人或运载体与目的地之间的相对关系,选择后续的行进路线或控制决策。基于此意义的导航发展历史可以追溯到人类新石器时代晚期,人们要离巢去远行、耕种、狩猎,就要利用熟悉的地物、地貌、日月星辰作为观测参考基准,确保能返回。随着人类活动范围越来越大,从平原到山脉,从陆地到海洋,再到空间和宇宙,每一次活动空间的扩展都需要导航技术的发展作为支撑。由于一般意义上的导航概念很宽泛,与制导(Guidance)和控制(Control)的内涵有较大的重叠,所以为了更好地对导航理论和技术进行清晰的描述,定义一个狭义的导航概念:导航是实现运载体某时刻 t 在某参考坐标系中的位置和姿态角的测量和确定的过程,三维位置 (x, y, z) 和三维姿态角 (α, β, γ) 组成导航系统输出的六个基本参数,也称为导航基本解。能实现部分或全部六个参数的测定系统都可以称之为导航系统,建立导航系统获得运载体导航参数输出的有关理论和方法统称为导航技术。这里的导航没有了航路规划、目标引导和制导率设计等功能。导航环节相当于自动控制系统中的测量环节,决定了车辆、导弹、飞机及卫星的运行精度,没有高精度的导航就没有高质量的航空活动、航天活动、航海活动,也没有精确打击武器。

现代导航早已经不是早期的“目视”意义上的导航,而是指基于仪器设备的导航,观测基准有自然基准和人造基准。从指南针开始,仪器导航就开始了。作为一种典型的信息处理技术,导航技术的发展一直是与科学技术的发展交互影响、协同进步的。一方面,很多科学发现和技术发明是由于人类导航的需要而产生的;另一方面,大量科学技术的新进展,如数学、地理学、天文学、气象学、海洋学、制图学、无线电技术、计算机技术、滤波技术、卫星技术、微机电技术等,都率先在导航领域得到成功的应用,极大地促进了导航技术的发展。

现代导航技术主要有天文导航技术、惯性导航技术、无线电导航技术、匹配导航技术(包括景象、地形、重力场、磁场等匹配方式)等多种,不同的导航技术选择或建立不同的参考基准,选择相应的传感器获得导航系统在参考基准中的观测信息,处理观测信息确定导航参数。传感器不同,观测的信息也不同,确定导航参数的理论和方法就会有差异,因而形成了丰富的导航算法。考虑到系统应用的复杂度、精度、连续性和稳定性,被广泛采用的导航系统是天文导航系统、惯性导航系统和无线电导航系统。

1. 天文导航具有无与伦比的自主性

天文导航是一种古老而有效的导航技术,利用宇宙空间的太阳、月亮和其他天体作为导航用观测参考基准,导航系统通过观测星体在运载体坐标中的视轴角度来测定运动载体当前所在的位置或姿态角。天体观测器依据对象的不同,有地球敏感器、太阳敏感器、星敏感器等,由天体在敏感器视场中的方位推出视轴角。由于天文导航参考基准的天然且难以被人为干扰的



特性,使其成为无与伦比的自主导航系统,相当长时期,天文导航作为唯一的导航方式在使用。

天文导航位置和姿态解算依据两个前提:① 观测时刻天体的位置信息,由天体星历表的参数计算给出,天体星历表是由天文学家通过大量的天文观测拟合所得到的,是一组天体轨道运行拟合参数集;② 天体传感器输出观测角度,每一个传感器都可以获得天体或空域相对于载体坐标系的两个角度观测量,要获得一组导航全解最少需要互成一定角度的三个传感器,观测三个以上星体或空域。如果在地球表面加入地平约束,则由两个星传感器也可以定位,或用单星传感器的多历元观测值联立求解亦可。

天文导航存在的一些问题是:① 对可视星空的天体分布的完全依赖。当某些可视星空没有可见星体时,观测量就会不足,无法保证求解导航解需要的观测量个数,无法定位或定姿,从而导致导航输出不连续。② 严重依赖于天体传感器的观测精度。由于天体传感器的视场大小和成像分辨率有限,特别高的精度难以实现。例如,在地球表面,角度观测误差若为1角秒,带来的定位误差将达30多米;稳定的角秒级的测量,在运动的载体上实现也是很困难的。③ 在地球表面或近地空间使用时,严重受到白天黑夜、晴雨云雾天气的影响,可使用性无法保证。④ 由于传感器内有光学系统,导致体积庞大,加上安装角度和光路裸露的要求,在一些运载器上难以安装,通常只能安装一个或两个传感器。

由于以上原因,天文导航系统主要用于深空探测领域。在浩瀚的宇宙空间,一方面可用于导航的星体众多;另一方面导航精度要求不再是米级,而是十千米、百千米,甚至更远。在地球表面或近地空间,人们利用施加如地平仪、惯导系统等设备提供的约束,运载器上安装一个或两个传感器给出的观测量,也可以求解出运载体的姿态和位置。例如,加入地平仪约束,双传感器观测就可以求解导航全解。对于静态载体单传感器的多历元观测,在地面约束的条件下也可以定位。由于天文导航的自主性和误差非积累的特性,单传感器和双传感器与其他导航系统组合,被大量地应用于卫星和导弹的导航系统中。随着人类对外太空的科学探索活动的加速和深入,尤其是各种更高精度的天体传感器的不断推出,使得具有无与伦比的自主导航特性的天文导航技术焕发出前所未有的生机。

2. 惯性导航促成导航学科的独立与完善

惯性导航技术依据的参考基准是惯性坐标系,依据的力学原理是牛顿惯性定律,采用的传感器是陀螺仪和加速度计。陀螺仪和加速度计被直接或通过框架隔离间接安装在载体上,加速度计测量加速度计轴轴向的加速度,陀螺仪测量陀螺敏感轴方向的角速度,系统对加速度计和陀螺仪输出的信息进行积分处理,并通过基于导航系统理论的算法处理,得到载体的导航参数。如果测得载体三个正交方向的加速度信号和三个转轴的角速度信号,那么就可通过航位推算的方法,得到从某时刻载体初始状态的载体导航全解。惯性导航技术是一种自主式的导航技术,它完全依靠机载设备自主地完成导航任务,不依赖于任何外部信息,不向外辐射能量,因此系统工作不受外界干扰,隐蔽性好。这一独特优点使其成为航天、航空和航海领域中的一种广泛使用的主要导航方法。惯性导航系统输出信号的实时性、连续性,使之成为高机动载体如导弹、飞机、卫星的制导与控制的最佳选择,是高机动装备自动控制的基础。

事实上,惯性导航技术的发展,成就了导航学科的独立与完善。围绕惯性导航系统的研发,众多的科学家和工程技术人员,把动力学、测量学、控制理论、结构学、计算数学融于一体,形成了丰富而又系统的惯性导航原理与技术,其体系的完备是可以与任何一个专业学科的理论体系相媲美的。不论过去、现在还是将来,惯性导航理论与方法都是导航学科的重要支撑,



是导航技术从业人员知识结构中不可或缺的组成部分。

惯性导航技术的主要问题是:①不能逾越的误差积累问题。惯性导航最大的缺陷是输出信息角度和位置不能直接测量,而是由加速度测量和角速度测量通过积分处理,并经过复杂的数学变换计算得到的;由于测量量中的系统误差和随机误差的必然存在,导致积分后的量会出现误差积累,这种误差积累导致惯性导航系统难以长期工作。如何消除积分带来的误差积累是长期以来惯性导航技术工程应用的重要课题,今后依然无法回避。②作为一种从初始状态开始逐步推算的导航技术,惯性导航系统的输出极大地依赖于其初始对准的精度,“差之毫厘,失之千里”。因此,如何实现快速精确的对准是惯性导航技术的另一项重要课题。

3. 陆基无线电导航技术安全可靠

无线电导航技术利用了无线电波传输的基本特性:①在理想的均匀媒质中沿直线传播;②在理想的均匀媒质中传播速度为常数;③在不同媒质的边界面上产生反射。无线电导航的观测参考基准是一种人造的基准,通过建立一组位置已知的发射站,播发无线电波,形成导航的观测参考基准。基本观测量是接收机相对于发射机的方位、时间延迟(或距离,Range)和多普勒频移,利用这些观测量和已知的发射机位置,解算出用户接收机(也称载体接收机,或用户站,或用户)的位置和速度。无线电导航系统通常不输出载体姿态信息,是一种非全解导航系统。

典型的陆基无线电导航系统包括:伏尔(VHF Omnidirectional Range, VOR)、测距器(Distance Measuring Equipment, DME)、塔康(Tactical Air Navigation, TACAN)、无线电定向机(Radio Direction Finder, RDF)、仪表着陆系统(Instrument Landing System, ILS)、罗兰系统(Long-range Navigation, Loran)、欧米伽系统(Omega)等。时间延迟的测量要求接收机和发射机时间同步精度达到测距要求的水平,若要求测距误差小于3 m,则同步精度就要求达到10 ns。在地面导航系统中,雷达的发射机和接收机是一体,从而自行解决;DME等设备通过接收机和发射机通信应答,配合解决此问题。罗兰系统和欧米伽系统是一种双曲线导航方式,导航用观测量是不同位置的两个基站发射的无线电波信号达到接收机天线的的时间差,只要各个基站相互之间时间实现同步,就可以得到需要的导航精度,罗兰系统和欧米伽系统的维护者可在基站采用高精度时钟和站际通信获得较高精度的系统时间。由于接收机不往基站发送信号,只需要接收基站发出的导航电文,进行距离差测量,就可以在基站信号覆盖的范围内独立进行导航,因此接收机数量不受限制,从用户角度看有了点“自主导航”的味道。

目前,在飞机飞行和着陆、舰船航行和进港的过程中,为了保证导航和引导的精度和安全性,陆基无线电导航依然是主角。

4. 卫星导航技术迅猛发展

卫星导航(Satellite Navigation)主要指全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS),是一种特殊的无线电导航方式——发射基站挂在天上。卫星导航系统的参考基准是以星座形式出现的带有无线电波发射机的一组卫星,卫星发射信号以一定的重数覆盖地球表面和近地空间,处于覆盖范围的接收机接收卫星信号,从中解析出卫星轨道信息和测得星站观测量,实现载体的位置和速度的解算。

卫星导航系统的基本观测量是伪距(Pseudorange)和多普勒频移。伪距不同于前面讲到的距离(Range),用户与卫星无应答通信,伪距观测量是卫星播发信号到达接收机时刻相对于

卫星发射时刻的时间差,由于接收机时间与卫星导航系统的时间没有同步,所以观测量中包含了用户接收机的时钟相对于卫星导航系统的时钟的差,称之为用户钟延迟。 t 时刻观测到的 i 号用户接收机与 j 号卫星之间的伪距 $\rho(t)$ 可用下式表示,即

$$\rho_i^j(t) = \sqrt{[x^j(t) - x_i(t)]^2 + [y^j(t) - y_i(t)]^2 + [z^j(t) - z_i(t)]^2} + c\delta t_i(t) - c\delta t^j(t) + I_i^j(t) + T_i^j(t) + \epsilon_i^j(t) \quad (1.1)$$

多普勒频移 $f_i^j(t)$ 可用下式表示,即

$$f_i^j(t) = \left\{ \sqrt{[\dot{x}^j(t) - \dot{x}_i(t)]^2 + [\dot{y}^j(t) - \dot{y}_i(t)]^2 + [\dot{z}^j(t) - \dot{z}_i(t)]^2} + c\dot{\delta}t_i(t) - c\dot{\delta}t^j(t) + \dot{I}_i^j(t) + \dot{T}_i^j(t) + \epsilon_i^j(t) \right\} / \lambda \quad (1.2)$$

式(1.1)和式(1.2)中, $[x^j(t), y^j(t), z^j(t)]$ 和 $[\dot{x}^j(t), \dot{y}^j(t), \dot{z}^j(t)]$ 为 j 号卫星的位置和速度, $[x_i(t), y_i(t), z_i(t)]$ 和 $[\dot{x}_i(t), \dot{y}_i(t), \dot{z}_i(t)]$ 为待求的用户的位置和速度, $\delta t_i(t)$ 和 $\dot{\delta}t_i(t)$ 为用户钟的延迟及其变化率, $\delta t^j(t)$ 和 $\dot{\delta}t^j(t)$ 为卫星钟的延迟及其变化率, $I_i^j(t)$ 和 $\dot{I}_i^j(t)$ 为电离层延迟及其变化率, $T_i^j(t)$ 和 $\dot{T}_i^j(t)$ 为对流层延迟及其变化率, $\epsilon_i^j(t)$ 、 $\dot{\epsilon}_i^j(t)$ 为发射机发射和接收机接收的热噪声等观测误差, λ 为载波波长。后续叙述中,在不引起歧义的情况下,不特别说明时,自变量 t 予以省略。当仅讨论单个接收机或单颗卫星时,下标和上标亦可以略去。多普勒频移主要用于对卫星和用户之间的相对速度的观测,常常以下式的形式出现,称之为伪距变化率 $\dot{\rho}_i^j(t)$ 。

$$\dot{\rho}_i^j(t) = f_i^j(t)\lambda = \sqrt{[\dot{x}^j(t) - \dot{x}_i(t)]^2 + [\dot{y}^j(t) - \dot{y}_i(t)]^2 + [\dot{z}^j(t) - \dot{z}_i(t)]^2} + c\dot{\delta}t_i(t) - c\dot{\delta}t^j(t) + \dot{I}_i^j(t) + \dot{T}_i^j(t) + \dot{\epsilon}_i^j(t) \quad (1.3)$$

式(1.1)是卫星导航技术的基本关系式,如果卫星位置已知,则有用户位置和用户钟延迟等4个未知数,因此卫星导航系统定位解算,必须同时可视星不少于4颗,获得4个或4个以上的观测方程,才能解出4个未知数。 (x_i, y_i, z_i) 给出用户位置,而 Δt_i 给出授时信息,以用于用户与卫星导航系统时间进行同步。式(1.2)可以用于用户速度求解。

同时,从式(1.1)可以看出观测量伪距与待求参数处于同一量纲,瞬时位置是由瞬时观测量解出的,不会有误差积累;位置求解精度排除观测星几何精度因子的影响,基本由卫星位置误差和观测量误差决定。从用户的角度需要完成:①从导航系统(卫星)获得计算卫星的位置的信息;②进行伪距的测量;③尽可能利用模型修正观测量中的误差,进行定位解算。

通常卫星位置是卫星以广播星历参数播发给用户并由用户计算出来的,广播星历参数是由卫星导航星座控制机构通过地面监测站对卫星持续监测数据中拟合出来的,其精度涉及卫星轨道和姿态的控制精度、地面监测网络分布状态和参数拟合方法、用户计算时相距拟合计算用数据时间段的长短(用有效龄期给出)。

卫星导航技术涉及的主要技术领域有:空间卫星轨道与姿态控制技术,全系统卫星时钟同步与稳定控制技术,无线电信号的编码、扩频、调制和播发技术,传播路径延迟误差建模与补偿技术,接收机跟踪、解码、测距和解算技术。经过60余年的发展,卫星导航系统的定位精度、可用性、稳定性达到了一个很高的高度,由于其全天候、高精度、实时近似连续的特点,尤其是接收机操作上的便利性,把导航技术从导航专家的研究室解放出来,变成了普通人员能够使用的技术,迅速在工业、农业、测绘、交通、航空、航天、航海及国防装备上得到广泛应用,给科学技术发展、国民经济建设及人类日常生活带来了巨大的变化。



1.2 卫星导航技术的发展与现状

1957年10月4日苏联成功发射了世界上第一颗名为Sputnik的人造地球卫星,由此人类进入利用卫星进行科学研究、资源探测、军事侦察、卫星通信的航天时代,也拉开了卫星导航系统建设的序幕。20世纪60年代,美国海军研究开发了基于多普勒频移观测定位的海军导航卫星系统(NNSS),又称为子午(Transit)卫星系统。几乎同期,苏联也建立了西克林(Tsiklon)卫星导航系统。Transit和Tsiklon星座卫星少,多普勒频移观测定位不能实现实时性。70年代,微电子技术、计算机技术、新材料科学与技术迅速进步,航天活动的实践经验积累日益丰富,促进了卫星系统技术、卫星组网与控制技术及现代通信技术的快速发展。为了满足军方和民用领域对连续、实时、精确导航的需求,更先进的能实现实时导航定位与授时的卫星导航系统建设提上日程。

GNSS建设包括3个部分——空间卫星星座部分、地面监控部分和用户设备部分(GNSS接收机)。空间卫星星座分布要求保证在地球各处能同时观测一定高度角(通常 15°)以上,可见星不少于4颗卫星。导航卫星的主要功能是播发无线电波。地面监控部分有主控站、监测站和注入站三种,综合功能是:①对卫星进行持续的监测、跟踪测量,据此拟合确定卫星星历、大气修正模型以及星钟误差模型的参数,推算编制导航电文。②给出精确的GNSS系统时间基准。③向卫星注入卫星星历、钟差信息、导航电文和其他控制指令。空间卫星星座部分和地面监控部分是GNSS的基础设施,也是GNSS建设的主要内容,只有一个国家或国家集团才有能力承担,一旦建好开放,就是一种公共资源。用户只有使用GNSS接收机才能实现其定位、导航的目的。GNSS接收机随着用户的使用目的不同而有各种各样的型号。与用户接收机有关的是卫星星座和卫星播发的无线电波。

卫星发送的卫星导航系统定位信号,是一种可供无数用户共享的信息资源,能实现保密通信,具有抗干扰能力;能对各卫星发射的信号进行区分选择(即寻址);能实现精密定位和实时导航。对于陆地、海洋和空间的广大用户,只要拥有能够捕获、跟踪、解调和测量GNSS信号的GNSS信号接收机,就可以在任何时候用GNSS信号进行导航定位测量。天上信号的编码、扩频、调制方式,决定GNSS用户接收机的接收、解调、跟踪及解算的工作模式。卫星信号包括导航电文、测距码和载波三部分内容,导航电文和测距码以一定的方式调制到载波上。在用户对卫星个体进行识别时,目前有码分寻址(CDMA)和频分寻址(FDMA)两种寻址方式。CDMA采用不同的伪随机码序列区分不同的卫星,系统内所有的星都可以采用一个载波频道播发各自卫星的导航电文和测距码。FDMA则要求每颗卫星要用一个载波频道。除了GLO-NASS采用了FDMA的方式外,GPS、Galileo和BDS均采用CDMA,最新的GLONASS-K也增加了CDMA信号。载波频道是稀有资源,几乎所有的GNSS都选择了L波段作为载波,从而CDMA可以节约更多的资源。在本书中如果不特殊声明,所介绍的内容均以CDMA为主。

导航电文是指包含导航信息并以一定的编码规则编制的数字码序列(D码,表示为 $D(t)$),导航信息是指卫星星历、卫星工作状态、卫星历书、时间系统、星钟改正参数、轨道摄动改正参数、大气折射改正参数及遥测码等; $D(t)$ 是数字信号,是用户利用GNSS进行导航定位的数据基础,通常为50 Hz,称之为基带信号。测距码也称为伪随机码,也是数字信号,GNSS



给每一颗卫星赋予一个伪随机码,对于以码分寻址(CDMA)为寻址方式的 GNSS,测距码是用户区分卫星、捕获、跟踪和伪距观测的基本依据;测距码有粗捕获码(C/A 码,记为 $C(t)$)和精密测距码(P 码,记为 $P(t)$)等。载波是特定频率的正弦无线电波,将数字信号调制到载波上,然后再在空中发射和接收。GNSS 卫星发送的信号采用组合码调制技术, $D(t)$ 先调制到伪随机码 $C(t)$ 或 $P(t)$,即经过伪随机码扩频成为组合码,再对 L 波段的载波进行调制,常用调制方式有 BPSK、MBOC 等,然后由卫星天线发射出去。

卫星发送信号的调制方式直接关系到卫星导航系统的定位功能和定位精度。各导航系统在其发展的过程中均经历过实验卫星→工作卫星→改进工作星的过程。在不同阶段,星上的信号是不一样的,反映了不同阶段卫星的技术水平。美国 GPS 建设历程最长,也是最完善的 GNSS,其各阶段卫星最能代表 GNSS 卫星的过去、现在和未来。

1. GPS 及其现代化

美国国防部(DoD)于 1973 年 4 月提出了研究、创建新一代卫星导航与定位系统的计划,1973 年 12 月提出了一个可以让美国军方接受的方案。这个方案就是授时与测距导航系统(NAVSTAR/GPS),通常简称为全球定位系统(GPS),它是一个基于人造卫星的面向全球的全天候无线电定位、定时系统。1993 年底实用的 GPS 星座(即 21+3)建成。1995 年美国宣告 GPS 正式进入全面的运行状态。为了减小其他国家使用 GPS 信号对美国带来的威胁,选择可用性技术(Selective Availability, SA)于 1991 年 7 月 1 日开始实施,民用 C/A 码单点定位精度由 25 m 降低到 100 m(2σ)。鉴于 GLONASS 宣布不施加 SA 技术,为了不丢失 GPS 带来的巨大的商业利益,美国已于 2000 年 5 月宣布取消 SA 技术。目前 GPS 仍然是运行最稳定的 GNSS。在不施加选择可用性技术的条件下,GPS 单机单频民用定位精度约为 10 m。

GPS 是第一个建设、第一个投入全面运行并向全球开放的全球卫星导航系统,也是产生了最大影响的 GNSS,直接催生了全球卫星导航技术应用的巨大市场;尤其是 GPS 在海湾战争、科索沃战争以及阿富汗战争中的成功应用,刺激了 GLONASS 的建设进度,并成为欧洲 Galileo 卫星导航系统和中国北斗卫星导航系统建设计划的直接推动力。

GPS 设计的空间星座部分由 21 颗工作卫星和 3 颗备用卫星构成(目前正常运行状态的实际卫星数目为 30 颗左右)。这 24 颗卫星分布在 6 个轨道上,每个轨道上分布着 4 颗卫星。每个轨道面与地球赤道面的夹角约为 55° ,相邻两个轨道面的升交点经度相差 60° ,而在相邻轨道上邻近卫星的升交点角距又相差约 30° 。GPS 卫星属于地球中轨卫星,卫星轨道的平均高度约为 20 200 km,运行轨道是一个很接近于正圆的椭圆,运行周期为 11 h 58 min。考虑到周期为 24 h 的地球自转,那么相对于地面上的一个固定观测点来讲,卫星的运行和分布状况大约每隔 23 h 56 min 重复一次。

GPS 星座最早发射的是试验星 Block I,Block II 为正式工作卫星,其后有改进型 Block II A 和加有自主导航功能的 Block II R。工作卫星上对用户的载波分别是频率为 1 575.42 MHz 的 L1 载波和频率为 1 227.6 MHz 的 L2 载波,在 L1 上加载了 C/A 码和 P 码,L2 上加载了 P 码,P 码不对非特许用户开放,所以期间一般民用用户只能享受到 L1 单频 C/A 码的定位服务。单频接收机定位精度低,并且不能像双频接收机那样通过双频接收消除电离层延迟。从 2005 年开始,GPS 进入现代化进程,发射的 Block II R(M)在 L2 上也加载了第二代民用信号 C/A 码,使得民用接收机也能消除电离层延迟对定位精度的影响。从 2010 年以后,发射的是未来型工作星 Block II F,其上又增加了第三代民用导航信号 L5。正在建设中的 GPS III 进一



步在 L1 上增加了第四代民用信号 L1(C), 进一步增强了导航的可靠性、精确性和完整性, 为民用用户提供服务。每一次卫星信号的改进都伴随着卫星的寿命、导航功能和精度的提高。目前 GPS 是一个包括旧卫星与新卫星的混合星座。GPS 星座目前工作卫星如表 1.1 所列。GPS 星座示意图如图 1.1 所示。

表 1.1 GPS 星座目前工作卫星

类别	传统卫星		现代卫星	
型号	Block II R	Block II R(M)	Block II F	GPS III
数量/颗	12	10	12	建设中
信号	L1:C/A,P(Y) L2:P(Y)	L1:C/A,P(Y),M L2:C/A,P(Y),L2C,M	L1:C/A,P(Y),M L2:C/A,P(Y),L2C,M L5:民用	L1:C/A,P(Y),M,L1C L2:C/A,P(Y),L2C,M L5:民用
寿命/年	7.5	7.5	12	15
发射时间	1997—2004 年	2005—2009 年	2010—今	2016 年

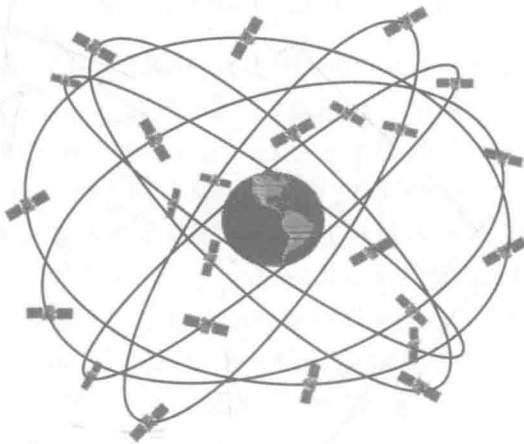


图 1.1 GPS 星座示意图

2. GLONASS 的卫星信号制式

GLONASS 的起步比 GPS 晚 9 年, 苏联从 1982 年 10 月 12 日发射第一颗 GLONASS 卫星开始, 经过 13 年时间, 历经周折, 虽然遭遇了苏联解体, 由俄罗斯接替部署, 但是始终没有终止或中断 GLONASS 卫星的发射。GLONASS 星座卫星由中轨道的 24 颗卫星组成, 包括 21 颗工作星和 3 颗备份星, 分布于 3 个等间隔的椭圆轨道上。轨道的偏心率为 0.01, 高度为 19100 km, 倾角为 64.8° , 绕地运行周期约 11 h 15 min, 地迹重复周期为 8 天。由于 GLONASS 卫星的轨道倾角大于 GPS 卫星的轨道倾角, 所以在高纬度 (50° 以上) 地区的可视性较好。GLONASS 于 1995 年完成了 24 颗工作卫星加 1 颗备用卫星的布局, 经过数据加载、调整和检验, 于 1996 年 1 月 18 日整个系统正常运行, 后来因各种原因, 星座一度没能保证全星座持续工作。虽然 GLONASS 没能持续地提供定位服务, 但是 GLONASS 投入导航运行也是卫星导航技术发展的重要的里程碑, 打破了美国对卫星导航独家经营的局面, 直接导致美国

于2000年5月2日取消了烦人的选择可用性政策,使得普通用户也可以享受到10 m精度的单机定位服务。近几年GLONASS建设重新发力,建设速度加快,于2007年开放俄罗斯境内卫星定位及导航服务,到2009年其服务范围已经拓展到全球,有望不久GLONASS将正式进入全面的运行状态。GLONASS卫星星座示意图如图1.2所示。

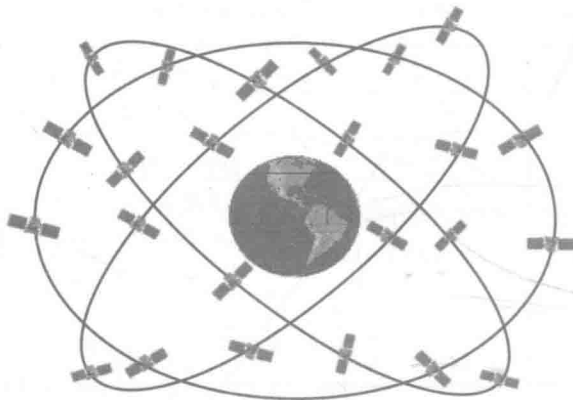


图 1.2 GLONASS 卫星星座示意图

GLONASS使用频分多址(FDMA)的调频方式,通过FDMA区分卫星信号。每颗GLONASS卫星广播两种信号:L1和L2。具体地说,频率分别为 $L1=(1602+0.5625\times k)$ MHz和 $L2=(1246+0.4375\times k)$ MHz。其中 k 为1~24,为每颗卫星的频率编号,同一颗卫星满足 $L1/L2=9/7$ 。每颗GLONASS卫星都在L波段上发射两个载波信号L1和L2,民用码C/A码仅调制在L1上,而军用码P码调制在L1和L2双频上。由于采用了FDMA制式,占用了较多的频点资源,在国际社会的建议下,GLONASS让出了高端频带,并且在新一代的卫星上也增加了CDMA信号,有利于与其他GNSS兼容接收。GLONASS卫星有多种类型,GLONASS-M I和GLONASS-M II采用L1和L2的FDMA。GLONASS-K1从2011年起发射,附加的L3上加入了CDMA信号,下一代GLONASS-K2的L1和L3上均加入了CDMA信号。GLONASS星座目前工作卫星如表1.2所列。

表 1.2 GLONASS 星座目前工作卫星

型号	GLONASS-M	GLONASS-K1	GLONASS-K2, KM
数量/颗	24	2	
信号	L1, L2 FDMA	L1, L2 FDMA L3 CDMA	L1, L2 FDMA L1, L3 CDMA
寿命/年	7	10	10
发射时间	2005—2014年	2011—今	研究中

3. Galileo 卫星导航系统的先进性

伽利略卫星导航系统(Galileo Satellite Navigation System),是由欧盟研制和建立的全局卫星导航定位系统,计划于1999年2月由欧洲委员会公布,欧洲委员会和欧空局共同负责,2002年3月正式启动。系统由轨道高度为23616 km的30颗卫星组成,其中27颗工作卫星、