

# 基于导航卫星的载体 姿态测量

JIYU DAOHANG WEIXING DE ZAITI ZITAI CELIANG

茅文深 常传文 夏娜 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 基于导航卫星的载体姿态测量

茅文深 常传文 夏娜 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书系统、深入地讨论了导航定位系统的基础知识,同时研究了利用导航卫星进行载体姿态测量的相关技术。主要内容包括:导航卫星系统的基础知识、定位算法、载体姿态测量原理、双频姿态测量算法、组合测姿、信号获取和数据处理、硬件测姿系统等。

本书可以作为有关院校卫星导航定位与载体姿态测量专业的本科生高年级和研究生的教材,而且是所有有关载体姿态测量的工程技术人员和科技工作者都应该配备的参考书,对于本书中提及但未能充分展开讨论的许多方法、技术,可以作为硕士生、博士生的研究课题。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于导航卫星的载体姿态测量 / 茅文深, 常传文,  
夏娜编著. —北京: 国防工业出版社, 2015. 4

ISBN 978 - 7 - 118 - 09942 - 3

I. ①基... II. ①茅... ②常... ③夏... III. ①导航卫星 - 载体 - 测量 IV. ①V474. 2②TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 071659 号

※

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 11 $\frac{3}{4}$  字数 226 千字  
2015 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 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

# 前 言

全球定位系统(GPS)自问世以来,以其高精度、全天候、全球覆盖和广泛的应用前景吸引了全世界的关注,成为代替传统导航、定位和测量的重要手段。自20世纪70年代开始研制以来,卫星导航系统已经在世界各国的各行各业中得到广泛的应用,如测绘、交通、土建、农林、水利、矿产、地质、海洋、航空航天、土木资源、安全防卫、防灾减灾、环境监测、科学研究等诸多领域。目前,它正带领着人类进入定位、导航的新纪元。

近年来,国内外涌现了大量关于GPS的文献,与这些书籍不同的是,本书一方面更加系统、深入地讨论了导航定位系统的基础知识、定位技术;另一方面还研究了利用导航卫星进行载体姿态测量的相关技术。

全书共7章,分为导航卫星系统的基础知识、定位算法、载体姿态测量原理、双频姿态测量算法、组合测姿、信号获取和数据处理、硬件测姿系统等几部分,本书也是按照这个顺序展开叙述的。大多数读者对导航卫星系统的认识是从了解GPS的定位原理及算法开始的,继而能进一步探索GPS应用的相关技术,因此,这种撰写方式很容易让读者接受和理解,并且也是一种从简到难的叙述顺序。

本书由高级工程师茅文深、高级工程师常传文和夏娜教授统筹策划、编撰和审定;博士研究生杜华争、硕士研究生戴金林、徐顺安和杨鹏程也参与了本书的撰写;同时,还参考了有关的文献资料。在此对四位研究生和文献资料的作者表示感谢!

本书语言平实、简练,内容丰富而又重点突出。不仅可以作为理工科高等院校相关专业本科生高年级和研究生的教学参考书,还可作为有关载体姿态测量的工程技术人员和科技工作者的学习参考书;对于本书中提及但未能充分展开讨论的许多方法、技术,可以作为硕士生、博士生的研究课题。

由于作者水平有限,书中不妥与疏漏之处在所难免,敬请读者不吝指教。

作者

2014年7月31日

# 目 录

第 1 章 概论 .....	1
1.1 导航卫星系统组成 .....	1
1.1.1 空间星座部分 .....	1
1.1.2 地面监控部分 .....	2
1.1.3 用户设备部分 .....	3
1.2 各国卫星导航系统概况 .....	5
1.2.1 全球定位系统 .....	5
1.2.2 欧盟“伽利略”系统 .....	7
1.2.3 俄罗斯“格洛纳斯”系统 .....	8
1.2.4 中国“北斗”卫星导航系统 .....	9
1.3 卫星导航系统的应用 .....	11
1.4 载体姿态测量方法 .....	14
1.4.1 惯性测姿 .....	15
1.4.2 基线矢量测姿 .....	15
1.4.3 导航卫星的测姿 .....	17
1.4.4 组合测姿 .....	18
1.5 基于导航卫星的载体姿态测量应用 .....	19
第 2 章 基于导航卫星的姿态测量基础知识 .....	20
2.1 卫星信号和导航电文 .....	20
2.2 卫星信号误差源分析 .....	23
2.2.1 卫星信号源误差 .....	23
2.2.2 卫星传播途径误差 .....	24
2.2.3 卫星接收机误差 .....	25
2.3 导航卫星观测方程 .....	25
2.3.1 伪距测量的观测方程 .....	26
2.3.2 载波相位测量的观测方程 .....	27

2.3.3	观测方程的线性化 .....	29
2.4	导航卫星定位方式 .....	31
2.4.1	导航卫星定位方式分类 .....	31
2.4.2	导航卫星载波相位相对定位 .....	32
2.5	坐标系及其转换 .....	36
2.5.1	常用的坐标系 .....	36
2.5.2	常用坐标系之间的转换 .....	38
2.6	载体姿态测量原理 .....	40
2.6.1	单基线姿态测量原理 .....	41
2.6.2	双基线姿态测量原理 .....	43
2.7	天线配置 .....	43
2.7.1	天线配置方法 .....	44
2.7.2	天线配置方案对姿态的影响 .....	45
2.8	姿态估计误差分析 .....	47
2.8.1	姿态角估计方法分类 .....	47
2.8.2	最小二乘估计偏差分析 .....	47
2.9	基于载波双差方程的直接欧拉角解算方法 .....	49
2.9.1	姿态测量观测方程建立 .....	49
2.9.2	姿态解算模型建立 .....	50
2.9.3	最小二乘估计姿态角 .....	51
2.9.4	解算误差分析 .....	52
<b>第3章</b>	<b>载体姿态测量模糊度求解 .....</b>	<b>54</b>
3.1	整周模糊度求解常用方法 .....	54
3.1.1	基于测量域的整周模糊度求解 .....	55
3.1.2	基于观测域的整周模糊度求解 .....	55
3.1.3	基于位置域的整周模糊度求解 .....	55
3.1.4	基于模糊度空间的整周模糊度搜索 .....	56
3.2	蚁群进化算法的整周模糊度求解 .....	57
3.2.1	蚁群进化算法介绍 .....	57
3.2.2	利用最小二乘估计法求整周模糊度浮点解 .....	58
3.2.3	基于蚁群进化算法的搜索整周模糊度固定解 .....	59
3.2.4	算法伪代码描述及实验结果 .....	61
3.3	粒子群优化算法的整周模糊度逆向求解 .....	65

3.3.1	粒子群优化算法介绍 .....	66
3.3.2	粒子群优化算法搜索基线初始姿态角 .....	66
3.3.3	逆向求解整周模糊度 .....	68
3.3.4	粒子群优化算法描述及实验结果 .....	69
3.4	模糊度检验 .....	73
3.4.1	常用的模糊度检验法 .....	73
3.4.2	基线航向角层次校验法 .....	74
<b>第4章</b>	<b>基于双频接收机的载体姿态测量 .....</b>	<b>76</b>
4.1	多频测量值组合 .....	76
4.2	双频传统组合方式 .....	79
4.3	双频解算方法 .....	81
4.3.1	直接双频解算法 .....	81
4.3.2	多频整周模糊度算法 .....	83
4.3.3	“北斗”双频 MTRC 算法 .....	84
4.3.4	“北斗”双频 BFR-3DS <sup>2</sup> 算法 .....	87
4.3.5	LAMBDA 算法和 TCAR 算法相结合 .....	89
<b>第5章</b>	<b>导航卫星与惯性导航组合的姿态测量 .....</b>	<b>90</b>
5.1	惯性导航系统概述 .....	90
5.1.1	惯性传感器技术 .....	91
5.1.2	惯导系统测姿原理 .....	92
5.1.3	GNSS/INS 姿态融合 .....	93
5.2	捷联式惯导系统 .....	94
5.2.1	捷联式惯导系统基本原理 .....	95
5.2.2	捷联式导航姿态求解 .....	96
5.2.3	系统误差方程建立 .....	99
5.3	GNSS/INS 组合导航数据处理 .....	101
5.3.1	GNSS/INS 松组合系统方法 .....	101
5.3.2	GNSS/INS 紧组合系统方法 .....	103
5.3.3	GNSS/INS 深组合 .....	105
5.4	GNSS/INS 组合导航误差分析及其改进措施 .....	106
5.4.1	GNSS 误差模型 .....	106
5.4.2	INS 误差模型 .....	109

5.4.3	GNSS/INS 接收机位置误差模型 .....	113
5.4.4	利用 INS 加速度辅助 GNSS 信号跟踪 .....	113
5.4.5	实时 INS 校准 .....	115
<b>第 6 章</b>	<b>卫星信号的获取及预处理 .....</b>	<b>118</b>
6.1	接收机数据格式 .....	118
6.2	载体姿态测量所需的数据 .....	119
6.3	数据预处理 .....	124
6.3.1	数据粗差的剔除 .....	124
6.3.2	基于小波变换的数据去噪 .....	126
6.4	周跳探测与修复 .....	128
6.4.1	周跳概述 .....	128
6.4.2	常用周跳探测和修复法 .....	132
6.4.3	基于序列学习的周跳探测与修复 .....	136
<b>第 7 章</b>	<b>嵌入式载体姿态测量系统的设计 .....</b>	<b>141</b>
7.1	系统总体设计 .....	141
7.2	嵌入式硬件设计 .....	142
7.2.1	惯性测姿模块 .....	142
7.2.2	GPS 测姿模块 .....	143
7.2.3	处理器模块 .....	144
7.2.4	数字倾角仪模块 .....	147
7.2.5	串口通信模块 .....	147
7.2.6	人机接口模块 .....	149
7.2.7	电源模块 .....	149
7.3	嵌入式软件设计 .....	151
<b>附录</b>	<b>GPS 术语及定义 .....</b>	<b>155</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>176</b>



# 第 1 章 概 论

## 1.1 导航卫星系统组成

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)是卫星导航系统的总称,它起源于无线电导航,是一种空间无线电导航定位系统,通过测量 4 颗或 4 颗以上星历已知的卫星至接收机天线之间的信号延时,确定用户的位置信息。目前,已经投入应用和正在建设的全球四大卫星导航系统有美国全球定位系统(Global Positioning System, GPS),俄罗斯“格洛纳斯”系统(Глобальная навигационная спутниковая система, Global Navigation Satellite System, GLO-NASS),欧盟“伽利略”卫星导航系统(Galileo Satellite Navigation System,简称 Galileo 系统)和中国“北斗”卫星导航系统(BeiDou Satellite Navigation System, BDS)。

由于全球卫星导航系统的构成基本相同,而 GPS 由来已久,因此本节只重点介绍 GPS 的基本构成,其他卫星导航系统的基本构成大同小异,将在各国卫星导航系统概况的相应内容中作简单描述,这里不再赘述。

历时 20 年、耗资 200 亿美元的 GPS 由如图 1.1 所示的三个独立部分组成:空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分。

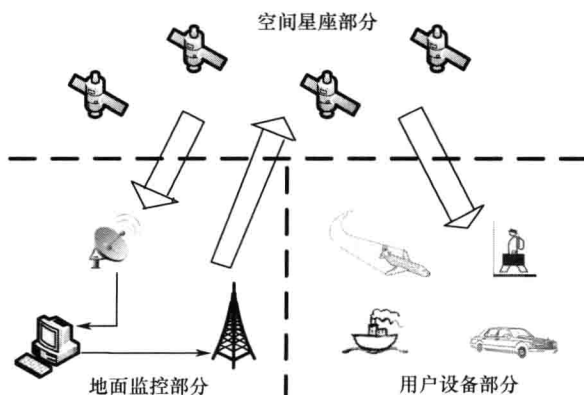


图 1.1 GPS 的基本构成

### 1.1.1 空间星座部分

GPS 的空间星座部分是由 24 颗 GPS 卫星所组成,其中 21 颗工作卫星可用于

导航,3颗为活动的备用卫星。这24颗卫星分布在6个轨道上,每个轨道上不均匀地分布着4颗卫星。每个轨道面与地球赤道面的夹角约为 $55^\circ$ ,相邻两个轨道面的升交点经度相差 $60^\circ$ ,而在相邻轨道上临近卫星的升交点角距又相差约 $30^\circ$ 。GPS工作卫星属于地球中轨道卫星,卫星轨道的平均高度约20200km,运行轨道是一个很接近于正圆的椭圆,运行周期为11h58min,约12个恒星时,考虑到周期为24h的地球自转,那么相对于地面上的一个固定观测点来说,卫星的运行和分布状况约每隔23h56min重复一次。每颗GPS工作卫星都会发射用于导航定位的信号,GPS用户正是利用这些信号进行工作的。可见,GPS卫星星座的作用就是不断地发射导航电文。

GPS卫星的如此分布使得在全球任何地方、任何时间都可观测到4颗或4颗以上的卫星。GPS的空间星座之所以如此设计,主要有两点原因:一是使地面上的任意一点在任意时刻,都能够同时观测到足够数量的卫星,以供定位之用;二是考虑了它的容错性能,也就是说,如果某一个轨道面上的一颗卫星因发生故障而失效,那么,由于相邻轨道面上临近卫星的存在,GPS卫星的信号覆盖性能和定位性能不至于因遭到剧烈破坏而大幅度下降,同时,3颗备用卫星可在必要时替代故障卫星,这对于确保空间星座部分的正常运转,也起到了相当重要的作用。

### 1.1.2 地面监控部分

GPS的地面监控部分主要是由分布在全球的若干个跟踪站所构成,根据其作用的不同,这些跟踪站又分为主控站、监测站和注入站。

地面监测站沿着经度方向依次位于美国的夏威夷(Hawaii)、科罗拉多泉市(Colorado Springs)、佛罗里达州卡纳维拉尔角(Florida Cape Canaveral)、南大西洋的阿松森群岛(Ascencion Island)、印度洋的迭戈加西亚(Diego Garcia)和南太平洋的卡瓦加兰(Kwajalein)。监测站是在主控站控制下的一个数据自动采集中心,其主要装置包括双频GPS接收机、高精度原子钟、进行数据初步处理的计算机以及若干环境数据传感器。监测站的主要任务是通过接收机对GPS卫星进行连续观测和数据采集,同时通过环境数据传感器采集有关当地的气象数据。监测站将所有观测和采集的数据略作处理后再传送给主控站。

主控站设在范登堡空军基地,它对地面监控部分实行全面控制。主控站的主要任务是收集各监测站对GPS卫星的全部观测数据,利用这些GPS观测数据计算出每颗GPS卫星的轨道、星历和卫星时钟的改正参数等。

设在美国科罗拉多州Falcon空军基地的主控站,是地面监控部分甚至是整个GPS的核心,它协调和控制地面监控部分的工作,通过接收、处理所有监测站传送的数据,主要实现以下功能。

(1) 监视所有卫星的运行轨道。

(2) 计算卫星钟差,以确保各颗卫星的原子钟与主控站的原子钟同步,维护

GPS 的时间基准。

- (3) 计算卫星的星历参数。
- (4) 计算大气层延时等导航电文中包含的各个修正参数。
- (5) 更新卫星的导航电文,并将其传送给注入站。
- (6) 发送用以调整卫星轨道的控制命令,以确保卫星沿预定的轨道运行。
- (7) 监视卫星是否正常工作,并在卫星出现故障、失效的情况下启动备用卫星。

注入站也设在范登堡空军基地,它的主要设备包括一套直径为 3.6m 的天线、一台 C 波段发射机和一台计算机,它的主要任务是在每颗卫星运行至上空时,将主控站计算出的卫星星历和卫星时钟的改正值等导航电文以及主控站的控制命令等注入到各相应卫星中去,并确保传输信息的准确性。这种注入对每颗 GPS 卫星每天进行一次,并在卫星离开注入站作用范围之前进行最后的注入。

图 1.2 所示为监测站、主控站和注入站三者之间数据的主要流向。地面监控部分的各个站间用美国国防部卫星通信系统保持联络,在原子钟的驱动下保持同步,并通过计算机控制实现各项工作的自动化和标准化。

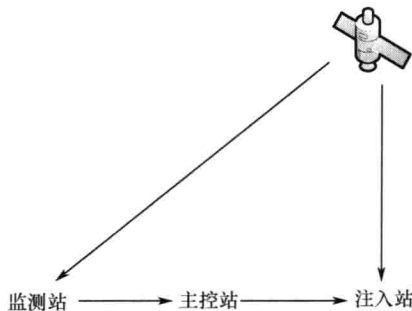


图 1.2 监测站、主控站和注入站三者之间数据的主要流向

### 1.1.3 用户设备部分

空间星座部分和地面监控部分为 GPS 提供了定位基础,并且可以支持无数个 GPS 用户。然而,它们不会替用户定位,用户只有通过 GPS 用户设备才能实现定位。用户设备可以简单地理解成我们时常所说的 GPS 接收机,它主要由接收机硬件、数据处理软件、微处理机和终端设备组成,其中接收机硬件一般又包括主机、天线和电源。GPS 用户部分主要由 GPS 接收机、数据处理软件以及相应的用户设备如计算机气象仪器等所组成,它的主要作用是接收 GPS 卫星发射的信号,并利用这些信号进行导航定位等工作。

用户设备的主要功能是能够捕获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。当接收机捕获跟踪卫星的无线电信号后,经过数据处理,就可

测量出接收天线至卫星的伪距离和距离的变化率,解调出卫星轨道参数等数据。根据这些数据,接收机中的微处理机就可以按照定位解算的方法进行定位计算,计算出用户所在地理位置的经度、纬度、高程、速度和时间等信息。

GPS接收机可接收的信息包括:可用于授时的准确至纳秒级的时间信息;用于预报未来几个月内卫星所处大概位置的预报星历;用于计算定位时所需卫星坐标的广播星历,精度为几米至几十米(各个卫星不同,随时变化);GPS信息,如卫星状况等。

GPS接收机对接收到的卫星信号进行解码,或采用其他技术将调制到载波上的信息去掉后,就可以恢复载波。严格地讲,载波相位应称为载波拍频相位,它是接收到的受多普勒频移影响的卫星信号载波相位与接收机本机振荡产生信号相位之差。一般在接收机时钟确定的历元时刻量测,保持对卫星信号的跟踪,就可记录相位的变化值,但开始观测时的接收机和卫星振荡器的相位初值是未知的,起始历元的相位整数也是未知的,即整周模糊度只能在数据处理中作为参数解算。相位观测值的精度高至毫米,但前提是解出整周模糊度,因此只有在相对定位、并有一段连续观测值时才能使用相位观测值,而要达到优于米级的定位精度,也只能采用相位观测值。

考虑到GPS的空间星座部分和地面监控部分是由美国政府控制,于是用户设备部分就成了GPS三个组成部分中最充满活力的一部分。本书旨在详尽地探讨这一用户设备部分,特别是GPS接收机的信号处理和定位算法。接收机的结构分为天线单元和接收单元两部分。接收机一般采用机内和机外两种直流电源,设置机内电源的目的在于更换外电源时不中断地连续观测,在用机外电源时机内电池自动充电,关机后机内电池为随机存取存储器(RAM)供电,以防止数据丢失。各种类型的接收机发展趋势是体积越来越小,重量越来越轻,以便于野外观测。GPS卫星接收机种类很多,根据型号分为测地型、全站型、定时型、手持型、集成型等;根据用途分为车载式、船载式、机载式、星载式、弹载式等。另外,还有以下几种典型的分类方法。

按接收机的用途分类,主要分下面三种。

(1) 导航型接收机,主要用于运动载体的导航,它可以实时地给出载体的位置和速度。这类接收机一般采用C/A码伪距测量,单点实时定位精度较低,一般为 $\pm 10\text{m}$ ,有S/A影响时为 $\pm 100\text{m}$ 。这类接收机价格便宜,应用广泛。根据应用领域的不同,此类接收机还可以进一步分为:车载型——用于车辆导航定位;航海型——用于船舶导航定位;航空型——用于飞机导航定位,由于飞机飞行速度快,因此,在航空上用的接收机要求能适应高速运动;星载型——用于卫星的导航定位,由于卫星的速度高达 $7\text{km/s}$ 以上,因此对接收机的要求更高。

(2) 测地型接收机,主要用于精密大地测量和精密工程测量。这类接收机主要采用载波相位观测值进行相对定位,定位精度高,仪器结构复杂,价格较贵。

(3) 授时型接收机,主要利用 GPS 卫星提供的高精度时间标准进行授时,常用于天文台及无线电通信中的时间同步。

按接收机的载波频率分类,主要分为以下两种。

(1) 单频接收机,只能接收 L1 载波信号,测定载波相位观测值进行定位。由于不能有效消除电离层的延迟影响,单频接收机只适用于短基线(小于 15km)的精密定位。

(2) 双频接收机,可以同时接收 L1 和 L2 载波信号。利用双频对电离层延迟的不同,可以消除电离层对电磁波信号延迟的影响,因此双频接收机可用于长达几千千米的精密定位。但是由于价格因素,双频接收机较贵,一般使用者所购买的多为单频接收机。

GPS 接收机能同时接收多颗 GPS 卫星的信号,为了分离接收到的不同卫星的信号,以实现对卫星信号的跟踪、处理和测量,具有这样功能的器件称为天线信号通道。根据接收机所具有的通道种类可分为多通道接收机、序贯通道接收机、多路多用通道接收机。

按接收机的工作原理可分为:①码相关型接收机,利用码相关技术得到伪距观测值;②平方型接收机,利用载波信号的平方技术去掉调制信号,来恢复完整的载波信号,通过相位计测定接收机内产生的载波信号与接收到的载波信号之间的相位差,测定伪距观测值;③混合型接收机,综合上述两种接收机的优点,既可以得到码相位伪距,也可以得到载波相位观测值;④干涉型接收机,将 GPS 卫星作为射电源,采用干涉测量方法,测定两个测站间的距离。

## 1.2 各国卫星导航系统概况

本节,将分别详细地介绍 1.1 节提到的全球四大卫星导航系统。

### 1.2.1 全球定位系统

GPS 是指利用 GPS 卫星,向全球各地全天候、实时性地提供三维位置、三维速度等信息的一种无线电导航定位系统。GPS 的前身是 1958 年美国军方研制的一种子午仪(Transit)卫星定位系统,1964 年正式投入使用,该系统用 5~6 颗卫星组成的星网工作,每天最多绕过地球 13 圈,并且无法给出高度信息,在定位精度方面也不尽如人意。然而,子午仪卫星定位系统使得研发部门对卫星定位取得了初步的经验,并验证了由卫星系统进行定位的可行性,这就为 GPS 的研制做了铺垫。由于卫星定位显示出在导航方面的巨大优越性以及子午仪系统存在对潜艇和舰船导航方面的巨大缺陷,美国陆、海、空三军及民用部门都感到迫切需要一种新的卫星导航系统。20 世纪 70 年代,陆、海、空三军联合研制了新一代全球定位系统——GPS,主要目的是为陆、海、空三军提供实时、全天候和全球性的导航服务,

并用于情报搜集、核爆炸监测和应急通信等一些军事目的,经过 20 余年的研究实验,耗资 300 亿美元,到 1994 年,全球覆盖率高达 98% 的 24 颗 GPS 卫星星座已布设完成。GPS 已经经历了第一代和第二代,现在已升级到第三代,以保持其在导航定位系统的霸主地位,从目前来看,GPS 是全球范围内精度最高、覆盖范围最广的导航定位系统。

最初的 GPS 计划是在美国联合计划局的领导下制定的,该方案将 24 颗卫星放置在互成  $120^\circ$  的三个轨道上。每个轨道上有 8 颗卫星,地球上任何一点均能观测到 6 ~ 9 颗卫星。这样,粗码精度可达 100m,精码精度为 10m。由于预算的压缩,GPS 计划不得不减少卫星发射数量,改为将 18 颗卫星分布在互成  $60^\circ$  的 6 个轨道上,然而这一方案保障不了卫星的可靠性。1988 年又进行了最后一次修改:21 颗工作卫星和 3 颗备用卫星工作在互成  $60^\circ$  的 6 个轨道上。这也是目前 GPS 卫星所使用的工作方式。

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,然后综合多颗卫星的数据就可知道接收机的具体位置。要达到这一目的,卫星的位置可以根据星载时钟所记录的时间在卫星星历中查出。而用户到卫星的距离则通过记录卫星信号传播到用户所经历的时间,再将其乘以光速得到,由于含有接收机卫星时钟的误差以及大气层电离层的干扰,这一距离并不是用户与卫星之间的真实距离,故称为伪距。当 GPS 卫星正常工作时,会不断地用 1 和 0 二进制码元组成的伪随机码(简称伪码)发射导航电文。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 码由标准定位信号经干扰而成,频率 1.023MHz,重复周期 1ms,码间距  $1\mu\text{s}$ ,相当于 300m;P 码经加密后播发,仅供军用,频率 10.23MHz,重复周期 266.4 天,码间距  $0.1\mu\text{s}$ ,相当于 30m,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、时钟改正、电离层时延修正、大气折射修正等信息,它是从卫星信号中调制出来,以 50b/s 调制在载频上发射的。导航电文每个主帧中包含 5 个子帧,帧长 6s。前三帧各有 10 个字码;30s 重复一次,每小时更新一次。后两帧共 15000bit。导航电文中的内容主要有遥测码、转换码、第 1、2、3 数据块,其中最重要的则为星历数据。当用户接收到导航电文时,提取出卫星时间并将其与自己的时钟进行对比,便可知道卫星与用户的距离,再利用导航电文中的卫星星历数据推算出卫星发射电文时所处位置,用户在 WGS - 84 坐标系中的位置和速度等信息便可得知。

按定位方式,GPS 定位分为单点定位和相对定位(差分定位)。单点定位就是根据一台接收机的观测数据来确定接收机位置的方式,它只能采用伪距观测量,可用于车船等的概略导航定位。相对定位(差分定位)是根据两台以上接收机的观测数据确定观测点之间的相对位置的方法,它既可采用伪距观测量也可采用相位观测量,大地测量或工程测量均应采用相位观测值进行相对定位。

GPS 是以卫星作为导航台的星基无线电导航系统,具有如下特点。

(1) 全球覆盖连续导航定位。GPS 卫星数目较多,且分布合理,所以在地球上任何时间、任何地点都至少可以观测到 5 颗卫星,从而保证了全球、全天候的连续导航定位能力。

(2) 高精度实时三维定位。GPS 可为各类用户连续提供动态目标的三维位置、三维速度和时间信息,经处理后还可提供姿态信息。利用 GPS 进行导航定位和测速,一般在 1s 内即可完成,其首次卫星跟踪和解算一般也不超过 30s。

(3) 被动式导航定位。用 GPS 进行导航定位时,用户只需要接收 GPS 信号就可进行导航定位,而不需要用户发射任何信号。这种被动式导航定位不仅隐蔽性好,而且可容纳无数个用户。

(4) 抗噪声干扰性能好、保密性强。由于 GPS 采用了数字通信的特殊编码技术,即伪随机噪声码扩谱技术,因而 GPS 卫星所发送的信号,具有良好的抗干扰性和保密性。

(5) 操作简便,易于安装。GPS 测量的自动化程度很高,其观测和解算等均由接收机自动完成。不仅如此,GPS 用户接收机一般重量较轻,体积较小,因此,携带和安装都很方便。

前面,多次提到定位与导航两个术语,它们两者之间联系紧密,但又存在区别。定位指的是,确定一点在某一参考坐标系中的位置;而导航一般是指筹划并实现如何从一点运动到另一点的途径方案。导航通常建立在定位的基础上。

### 1.2.2 欧盟“伽利略”系统

欧盟 Galileo 系统是世界上第一个基于民用的全球卫星导航定位系统,是欧盟为了打破美国的 GPS 在卫星导航定位这一领域的垄断而开发的全球导航卫星系统,有欧洲版“GPS”之称。

2010 年 1 月 7 日,欧盟委员会称,Galileo 系统将从 2014 年起投入运营,耗资 30 亿欧元,韩国、中国、日本、阿根廷、澳大利亚、俄罗斯等国都参与了该计划,当初的目标完成时间是 2008 年,但由于技术等各种原因,进展十分缓慢,原定关键计划时间节点一拖再拖,最新消息延长到了 2014 年。Galileo 计划的目标是建设独立的、全球性的民用导航和定位系统,中国也向 Galileo 计划投资了 296 万美元。Galileo 系统将为欧盟成员国和中国的公路、铁路、空中和海洋运输甚至徒步旅行者有保障地提供精度为 1m 的定位导航服务,从而也将打破美国独霸全球卫星导航系统的格局。

Galileo 系统采用了性能极为先进的新技术,保持了系统的独立性,又考虑了与其他卫星导航系统(重点考虑的是 GPS)的兼容性和互操作性。

Galileo 系统主要由三大部分组成:空间星座部分、地面监控与服务设施部分以及用户设备部分。

空间星座部分是由分布在三个轨道上的 30 颗中高度圆轨道卫星构成,卫星分

布在三个高度为 23616km,倾角为  $56^\circ$  的轨道上,每个轨道有 9 颗工作卫星外加 1 颗备用卫星,备用卫星停留在高于正常轨道 300km 的轨道上,能使任何人在任何时间、任何地点准确定位,误差不超过 3m。Galileo 星座具有较好的 DOP 值分布特性,定位精度也优于 GPS 定位精度。地面监控与服务设施部分包括两个位于欧盟的伽利略控制中心(Galileo Control Center)和 20 个分布在全球的伽利略传感器站(Galileo Sensor Station)。除此之外,还有实现卫星和控制中心进行数据交换的 5 个 S 波段上行站和 10 个 C 波段下行站,伽利略控制中心主要控制卫星的运转和导航任务的管理。20 个传感器站通过冗余通信网络向控制中心传送数据。用户设备部分主要由导航定位模块和通信模块组成。

Galileo 系统可以发送实时的高精度定位信息,这是现有的卫星导航系统所没有的,同时 Galileo 系统能够保证在许多特殊情况下提供服务,如果失败也能在几秒钟内通知客户。与美国的 GPS 相比,Galileo 系统更先进,也更可靠。美国 GPS 提供的卫星信号,只能发现地面约 10m 长的物体,而 Galileo 系统的卫星则能发现 1m 长的目标。一位军事专家形象地比喻说,GPS 只能找到街道,而 Galileo 系统则可找到家门。

### 1.2.3 俄罗斯“格洛纳斯”系统

俄罗斯 GLONASS 最早开发于苏联时期。1993 年,俄罗斯开始独自建立本国的全球卫星导航系统,原计划 2007 年年底之前开始运营,2009 年年底之前将服务范围拓展到全球,但由于资金等各种原因,系统仍在持续进行阶段。GLONASS 至少需要 18 颗卫星才可以为俄罗斯全境提供定位和导航服务,如果要提供全球服务,则需要 24 颗卫星在轨工作,另有 6 颗卫星在轨备用。据俄罗斯官方报道,该系统完全建成后,其定位和导航误差范围仅为 2 ~ 3m,就精度而言将处于世界领先水平。

GLONASS 与 GPS 类似,也由空间星座部分、地面监控部分以及用户设备部分组成。空间星座部分主要由 24 颗卫星组成,均匀分布在三个近圆形的轨道面上,每个轨道面有 8 颗卫星,轨道高度 19100km,运行周期 11h15min,轨道倾角比 GPS 略大,为  $64.8^\circ$ 。地面监控部分以及用户设备部分均与 GPS 差不多。

目前,GLONASS 与 GPS 最主要的不同之处是信号结构不同。GLONASS 采用的是频分多址(FDMA)技术,即在不同的载波频率上用相同的码来广播导航信号。GLONASS 由各自的轨道信号频率区分,有 24 个间隔点,以 1 ~ 24 命名。而 GPS 采用的是码分多址(CDMA)技术,所有 GPS 卫星的载波频率是相同的,均由各自的伪随机码(PRN)区别开来,它的伪随机码 1 ~ 32,使用其中的 24 个。最近,俄罗斯官方宣布,在新一代 GLONASS - M 卫星中将增加 CDMA 信号(1575.42MHz 和 1176.45MHz,分别对应 GPS 的 L1 和 L5 载波信号),同时增加卫星数量,扩展地面增强系统,升级地面控制和完整性监测,以拓展市场,从而满足更多用户的需要。



俄罗斯旨在加快 GLONASS 星座重建,推动卫星导航应用。目前,俄罗斯境内使用的卫星导航终端基本上被 GPS 接收设备占领。据报道,在现有俄罗斯的 5000 架飞机中,只有 1200 架配备了卫星导航设备,其中 92% 为 GPS 接收机, GLONASS 接收机仅占 8%。因此,俄罗斯近年来正在加大开发 GLONASS 卫星导航终端用户设备的力度,研发一批专用的接收机设备,并在部分汽车和飞机上试用,努力向前推进本国的卫星导航事业。

#### 1.2.4 中国“北斗”卫星导航系统

中国“北斗”卫星导航系统是中国正在实施的自主研发、独立运行的全球卫星导航系统,是与世界其他卫星导航系统兼容共用的全球卫星导航系统。

按照“自主、开放、兼容、渐进”的发展原则,遵循“先区域、后全球”的总体思路,“北斗”卫星导航系统按“三步走”发展规划稳步有序推进:第一步,1994 年启动“北斗”卫星导航实验系统建设,并已于 2000 年形成区域有源服务能力;第二步,2004 年启动“北斗”卫星导航系统建设,2012 年已形成区域无源服务能力;第三步,2020 年“北斗”卫星导航系统形成全球无源服务能力,实现全球组网。

2000 年,首先建成由两颗地球同步轨道卫星组成的“北斗”卫星导航实验系统,我国成为继美、俄之后的世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家,这极大地改善了我国长期缺乏自主有效导航定位手段的被动局面,但由于系统体制的限制,无源导航系统的建设迫在眉睫。2004 年,我国启动“北斗”区域卫星导航系统工程建设,历经 8 年的研制,完成了 5 颗地球静止轨道(GEO)卫星、5 颗斜地球同步轨道(IGSO)卫星和 4 颗中高度圆轨道(MEO)卫星组网。区域系统可为我国及周边地区、海域提供连续定位、测速、授时和部分地区的用户位置报告以及双向报文通信服务。作为重要的国家战略性资源,“北斗”卫星导航系统将在坐标框架维护与更新、海洋主权和权益维护、军事工程建设等领域发挥重要作用,对于形成自主可控的位置服务能力、提升我国相关产业的核心竞争力具有重要意义。该系统已成功应用于测绘、电信、水利、渔业、交通运输、森林防火、减灾救灾和公共安全等诸多领域,产生了显著的经济效益和社会效益,特别是在 2008 年北京奥运会、汶川抗震救灾中发挥了重要作用。

2012 年 10 月 25 日 23 时 33 分,我国在西昌卫星发射中心成功地将第 16 颗“北斗”导航卫星送入预定轨道。这是我国第二代“北斗”导航工程的最后一颗卫星,至此,我国“北斗”导航工程区域组网顺利完成。

2012 年 12 月 27 日,“北斗”卫星导航系统正式提供区域服务。“北斗”卫星导航系统在继续保留“北斗”卫星导航实验系统有源定位、双向授时和短报文通信服务基础上,向大部分亚太地区正式提供连续无源定位、导航、授时等服务,民用服务与 GPS 一样免费。

在 2014 年年初,我国与泰国合作,主要服务于泰国农业的灾害预警,此外还辐