

GPS测量原理及应用

郑加柱 王永弟 石杏喜 孙小荣 连达军 编著



科学出版社

GPS 测量原理及应用

郑加柱 王永弟 石杏喜 孙小荣 连达军 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从介绍卫星定位技术的发展历程入手,依次介绍当今正在运行和即将运行的四大卫星定位系统的组成、应用前景,然后重点介绍 GPS 接收机的原理和常用品牌接收机以及 GPS 定位技术的原理和应用。全书共 10 章,第 1 章介绍卫星定位技术的发展以及四大定位系统的组成和应用前景;第 2 章介绍 GPS 接收机的原理和常用品牌接收机;第 3 章介绍坐标系统和时间系统,为将空间卫星位置与地球表面点位的关联建立统一基准;第 4 章介绍卫星信号的组成和位置计算;第 5 章介绍 GPS 定位的基本观测量和误差来源;第 6 章阐述绝对定位、相对定位、静态定位、动态定位的基本原理和使用方法;第 7 章介绍静态 GPS 控制网的设计与实施;第 8 章介绍静态 GPS 测量数据处理原理和过程;第 9 章介绍动态 GPS 测量数据处理原理;第 10 章介绍 GPS 在各种工程中的应用,并对其具体应用过程进行分析。

本书概念清晰、通俗易懂、实用性强,可作为应用型测绘工程专业以及地理信息系统等相关专业的通用教材,也可作为测绘、土木、城市规划、交通、水电、地质矿产、农林等部门从事 GPS 工作的科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

GPS 测量原理及应用 / 郑加柱等编著. —北京:科学出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-03-040863-1

I. ①G… II. ①郑… III. ①全球定位系统-测量 IV. ①P228. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 117927 号

责任编辑:杨 红 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:阎 磊 / 封面设计:迷底书装

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>

北京华正印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 6 月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:350 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

当今世界正在运行和即将运行的全球卫星定位系统有 GPS、GLONASS、BDS、GALILEO, 其中以美国国防部为陆、海、空三军研制的新一代卫星导航定位系统, 简称全球定位系统 (global positioning system, GPS) 应用最为广泛。目前, GPS 正广泛应用于测绘、交通、军事、旅游、农林等许多领域。GPS 卫星定位技术的应用渗透到人们的日常生活中, 改变了人们的思维模式; 它与地理信息系统 (geographic information system, GIS) 相结合, 将人们的生活空间变为一个动态的信息世界。

GPS 测量技术是测绘学科中的重要技术之一, 它的出现为测绘学科带来了革命性的变化, 它的不断发展为测绘学科带来了勃勃生机。因此, “GPS 测量原理及应用”课程已成为测绘工程专业、地理信息系统专业的专业基础课。目前, 针对此课程的教材很多, 其重点都是介绍原理, 不太适合应用型测绘工程专业学生使用。为此, 我们结合 10 多年来从事 GPS 定位技术教学与应用研究的成果, 以培养应用型测绘专业人才为目标, 兼顾培养其他行业技术人员使用 GPS 接收机的技能, 编写了这本教材。

本书由郑加柱、王永弟、石杏喜、孙小荣、连达军编著。其中, 南京林业大学郑加柱撰写了第 1、2 章以及第 5、7、8、10 章的部分内容, 南京信息工程大学王永弟撰写了第 4 章和第 3、10 章的部分内容, 南京理工大学石杏喜撰写了第 9 章, 宿迁学院孙小荣撰写了第 6 章, 苏州科技学院连达军撰写了第 8、10 章的部分内容, 南京林业大学隋铭明撰写了第 5 章的部分内容, 厦门理工学院张爱国撰写了第 3 章的部分内容, 河南城建学院刘小强撰写了第 7 章的部分内容。全书由郑加柱统稿, 书中插图由研究生王建宇、陆川完成。

本书力求做到原理阐述简洁、使用操作介绍详细, 强调理论与工程实际相结合, 体现最新技术应用。为了便于学习, 本书还编写有习题和常用 GPS 基线处理软件使用说明, 可在科学出版社网站上下载, 网址: <http://www.sciencep.com>。

由于作者水平有限, 书中难免存在不足之处, 恳请读者批评指正。

作 者

2013 年 12 月于南京

目 录

前言

第 1 章 卫星导航定位系统概述	1
1.1 早期卫星定位技术	1
1.2 GPS 定位系统	1
1.3 GLONASS 系统	5
1.4 GALILEO 系统	7
1.5 北斗卫星导航系统	8
1.6 全球导航卫星系统特点	10
第 2 章 GPS 接收机	15
2.1 GPS 接收机基本工作原理	15
2.2 GPS 接收机的分类	18
2.3 测地型接收机选型、检验与维护	19
2.4 接收机技术发展	21
2.5 常用 GPS 接收机	22
第 3 章 坐标系统与时间系统	31
3.1 天球坐标系	32
3.2 地球坐标系	35
3.3 协议地球坐标系与协议天球坐标系的转换	37
3.4 几种常用坐标系	38
3.5 不同直角坐标系的坐标转换	42
3.6 时间系统	44
第 4 章 GPS 卫星信号与卫星坐标计算	47
4.1 测距码及其特性	47
4.2 GPS 导航电文	51
4.3 GPS 卫星载波信号	55
4.4 GPS 卫星信号的调制与解调	55
4.5 GPS 卫星轨道运动与位置计算	58
4.6 RINEX 数据格式	67
第 5 章 GPS 测量及误差分析	72
5.1 GPS 测量基本原理	72
5.2 GPS 测量基本观测量	73
5.3 GPS 测量误差分析	76
第 6 章 GPS 卫星定位原理	87
6.1 导航	87
6.2 载波静态绝对定位	90

6.3	载波静态相对定位	94
6.4	动态相对定位	100
6.5	周跳的探测与修复	108
6.6	整周模糊度的确定	111
第7章	GPS 控制网的设计与实施	114
7.1	GPS 控制网的技术设计	114
7.2	GPS 控制测量前的准备工作	119
7.3	GPS 控制测量的外业工作	121
7.4	GPS 控制测量的内业工作	124
7.5	技术总结撰写与资料提交	127
第8章	静态 GPS 测量数据处理	128
8.1	GPS 测量数据传输	128
8.2	静态 GPS 测量数据预处理	129
8.3	静态 GPS 基线向量解算	131
8.4	GPS 基线向量网平差	142
8.5	GPS 高程测量	149
第9章	动态 GPS 测量数据处理	157
9.1	GPS 精密单点定位	157
9.2	单基站 RTK 解法	161
9.3	网络 CORS 解法	164
9.4	GPS 动态定位关键技术	168
第10章	GPS 行业应用	175
10.1	GPS 在测绘工程中的应用	175
10.2	GPS 在土木工程中的应用	183
10.3	GPS 在交通运输行业中的应用	187
10.4	GPS 在精准农业中的应用	190
10.5	GPS 在林业中的应用	192
10.6	GPS 在旅游行业中的应用	196
10.7	GPS 在军事方面的应用	196
10.8	GPS 在电力传输中的应用	198
10.9	GPS 在气象学中的应用	200
主要参考文献		207

第1章 卫星导航定位系统概述

1.1 早期卫星定位技术

1957年10月4日，苏联成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星，标志着空间科学技术的发展跨入了一个崭新的时代。随着人造地球卫星的不断发射，世界各国不仅利用人造卫星为军事、经济和科学文化等服务，而且应用于空间定位，从而产生了卫星大地测量学。

卫星定位技术是指人类利用人造地球卫星确定测站点位置的技术。最初，人造地球卫星仅作为空间观测目标，即由地面上的两个测站对卫星的瞬间位置进行同步摄影观测，通过确定两个测站至卫星的方向构成一个平面，对不同卫星观测得到的两平面交线即为两个测站的弦线，在不同测站之间对卫星观测即可组成地面三角网，从而确定地面点的位置，此方法称为卫星三角测量（图1.1）。同时，也可利用激光技术测定观测站至卫星的距离，根据建立的卫星测距网进行定位。采用这两种观测方法，均可以实现大陆与海岛的联测定位，解决了常规大地测量难以实现的远距离联测定位问题。但是，其定位精度不高，是卫星定位的低级阶段。

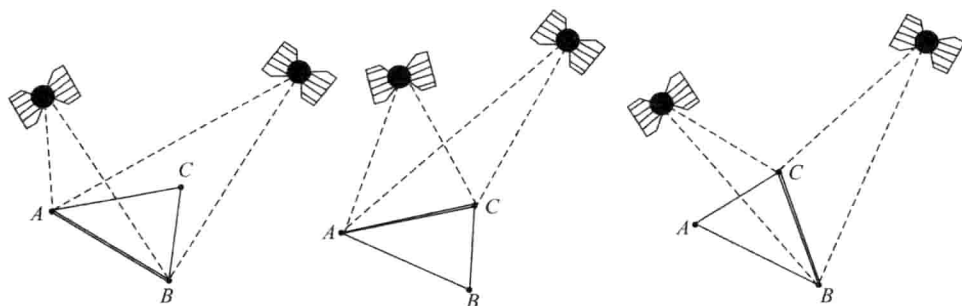


图 1.1 卫星空间摄影测量

1966~1972年，美国国家大地测量局在英国和联邦德国的协作下，用卫星三角测量方法测设了一个具有45个测站点的全球三角网，获得了 $\pm 5\text{m}$ 的点位精度。然而，这种观测方法受卫星可见条件及天气的影响，不仅定位精度较低，而且还得不到点位的地心坐标。因此，该方法很快就被新的卫星定位技术所取代。这种方法标志着卫星定位技术从仅仅把卫星作为空间测量目标的初级阶段，发展到把卫星作为动态已知点的高级阶段。

1.2 GPS 定位系统

1.2.1 概 述

1958年12月，美国海军为了给北极星核潜艇提供全球性导航，开始研制一种卫星导航系统，称为美国海军导航卫星系统（navy navigation satellite system, NNSS）。自1959年9月发射第一颗试验性卫星，到1961年11月，先后共发射了9颗试验性导航卫星，1964年系统

建成并投入使用。该系统共有 6 颗工作卫星，卫星的轨道均经过地球的南北极上空，组成子午卫星星座，故称为子午卫星系统。该系统的卫星平均高度约为 1000km，卫星运行周期约为 107min，轨道近似于圆形，地球表面上任何一个测站平均每隔 2h 便可观测到其中一颗卫星。

子午卫星系统的问世，标志着海空导航进入了一个崭新的时代，揭开了卫星大地测量学的新篇章。1967 年 7 月 29 日，美国政府宣布该系统解密并提供民用。该系统由三部分组成，即围绕地球运行的子午卫星、地面跟踪网和用户接收机。地面跟踪网由跟踪站、计算中心、注入站、海军天文台和控制中心五部分组成，其任务是测定各颗卫星的轨道参数，并定时将这些轨道参数和时间信号注入相应的卫星内，以便卫星按时向地面播发。用户接收机是接收卫星发射信号、测量多普勒频移、解译卫星轨道参数、测定接收机所在位置的专用设备。由于这些接收机都是根据多普勒效应原理进行接收和定位，所以称为多普勒接收机，该系统也因此被称为卫星多普勒定位系统。

虽然卫星多普勒定位系统对导航定位技术的发展具有划时代的意义，但由于该系统卫星数目少，运行高度低，从地面站观测到卫星的时间间隔较长，获得一次导航解所需的时间也较长，因而不能进行三维连续导航，无法充分满足军事导航的需求。从大地测量学的角度来看，由于它的定位速度慢（测站平均观测 1~2 天），精度较低（单点定位精度为 3~5m，相对定位精度约为 1m），因此，该系统在大地测量学和地球动力学研究方面也受到了极大的限制。

为了满足军事及民用部门连续实时三维导航的需求，1973 年 12 月美国国防部批准研制新一代卫星导航系统，即“授时与测距导航/全球定位系统”（navigation satellite timing and ranging/global positioning system），通常称为全球定位系统（GPS）。

自 1974 年以来，GPS 计划经历了方案论证（1974~1978 年）、系统论证（1979~1987 年）、生产实验（1988~1993 年）三个阶段，总投资超过 200 亿美元。迄今为止，GPS 卫星已设计了三代，分别为 Block I、Block II、Block III。第一代（Block I）卫星用于全球定位系统的实验，通常称为 GPS 实验卫星。Block I 卫星共研制和发射了 11 颗，设计寿命为 5 年。第二代（Block II）卫星用于全球定位系统的正式工作，称为 GPS 工作卫星。Block II 卫星共研制和发射了 28 颗，设计寿命为 7.5 年，于 1994 年发射完毕。

1999 年 1 月美国提出了 GPS 现代化的计划。其目的是更好地保护美方利益和使用，发展军码和强化军码的保密性能，加强抗干扰能力；阻扰敌对方的使用，施加干扰；保持在有威胁地区以外的民用用户有更精确、更安全的使用。主要内容是增加 GPS 信号内容，增加新的军用码和第三频率载波；研发新一代军用 GPS 接收机，提高 GPS 的抗干扰能力；增强

GPS 信号发射和关闭能力，确保对 GPS 信号干扰的有效性；更新 GPS 地面测控设备，增加地面测控站的数量；实施第三代（Block III）卫星计划，计划于 2012 年以后开始陆续发射卫星，预计数量为 20 颗，以取代 Block II 卫星，用于改善 GPS。

GPS 分为卫星星座、地面控制与监控站、用户设备三个部分（图 1.2）。

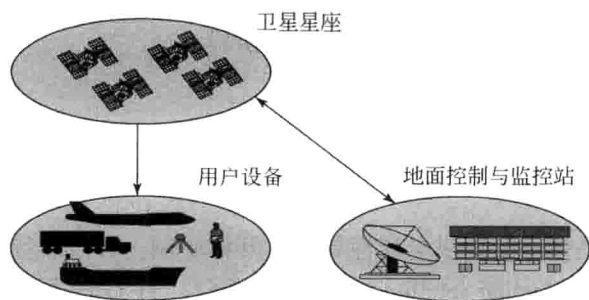


图 1.2 GPS 的组成

1.2.2 卫星星座部分

1. GPS 卫星星座的构成

设计的 GPS 空间卫星星座由 24 颗卫星组成（其中，21 颗为工作卫星，3 颗为备用卫星）。如图 1.3 所示，卫星分布在 6 个轨道面内，每个轨道上均匀分布有 4 颗卫星，卫星轨道面相对地球赤道面的倾角约为 55° ，各轨道平面升交点的赤经相差 60° 。在相邻轨道上，卫星的升交距相差 30° 。轨道平均高度约为 20200km，卫星运行周期为 11h58min（恒星时 12h），两个载波频率为 1575.42MHz 和 1227.60MHz。因此，在同一观测站上，每天出现的卫星分布图形相同，但每天提前 4min。每颗卫星每天约有 5h 在地平线以上，位于地平线以上的卫星数目随时间和地点而异，最少为 4 颗，最多可达 11 颗。GPS 卫星空间星座的分布保障了在地球上任何地点、任何时刻至少有 4 颗卫星被同时观测，且卫星信号的传播和接收不受天气的影响，因此，GPS 是一种全球性、全天候的连续实时定位系统。



图 1.3 GPS 卫星星座

从 2000 年起美国逐步开始实行 GPS 现代化，陆续发射了一些新型第二代卫星，预计到 2016 年全部以 GPS II-F 卫星运行。截至 2012 年底，美国 GPS 系统在轨卫星共计 31 颗，其中 GPS II-A 卫星 10 颗，GPS II-R 卫星 12 颗，GPS II-R-M 卫星 7 颗，GPS II-F 卫星 2 颗，卫星具体情况见表 1.1。

表 1.1 GPS 卫星基本情况

轨道名	编号	卫星类型	开始服务日期	轨道名	编号	卫星类型	开始服务日期
A	9	II-A	1993-07-20	D	2	II-R	2004-11-22
	31	II-R-M	2006-10-13		1	II-F	2011-10-14
	8	II-A	1997-12-18		21	II-R	2003-04-12
	7	II-R-M	2008-03-24		4	II-A	1993-11-22
	27	II-A	1992-09-30		11	II-R	2000-01-03
B	16	II-R	2003-02-18	E	20	II-R	2000-06-01
	25	II-F	2010-08-27		22	II-R	2004-01-12
	28	II-R	2000-08-17		5	II-R-M	2009-08-27
	12	II-R-M	2006-12-13		18	II-R	2001-02-15
	30	II-A	1993-09-28		32	II-A	1990-12-10
C	29	II-R-M	2008-01-02	F	10	II-A	1996-08-15
	3	II-A	1996-04-09		14	II-R	2000-12-10
	19	II-R	2004-04-05		15	II-R-M	2007-10-31
	17	II-R-M	2005-11-13		13	II-R	1998-01-31
	6	II-A	1994-03-28		23	II-R	2004-07-09
				26	II-A	1992-07-23	

2. GPS 卫星及其功能

GPS 卫星主体呈圆柱形，直径约为 1.5 m，重约 774kg（包括 310kg 燃料），两侧各设有一块四叶太阳能电池翼板，其面积为 72m²，能自动对日定向，以保证卫星正常工作用电。每颗卫星装有 4 台高精度原子钟（2 台铷原子钟和 2 台铯原子钟），这是卫星的核心设备。它将发射标准频率信号，为 GPS 定位提供高精度的时间标准。

GPS 卫星有如下基本功能。

- (1) 接收和储存由地面监控站发来的导航信息，接收并执行监控站的控制指令；
- (2) 在地面监控站的指令下，通过推进器调整卫星的姿态和启用备用卫星；
- (3) 借助于卫星上设有的微处理机进行必要的数据处理工作；
- (4) 通过星载的高精度铯原子钟和铷原子钟提供精密的时间标准；

(5) 向用户发送定位信息。GPS II-A 卫星是通过 L1、L2 两个载波向用户发送导航电文和测距码（民用的 C/A 码和军用的 P 码），其中 L2 载波上只有军用的 P 码。在 GPS 现代化以后，新型的 GPS II-R 卫星在 L1、L2 两个载波上都加载 C/A 码和 P 码，GPS II-R-M 卫星在 GPS II-R 卫星功能基础上加载了新的军用码（M 码），GPS II-F 卫星在保留了 GPS II-R 型卫星所有功能的基础上，还进一步强化发射 M 码的功率和增加发射第三民用频率，即 L5 载波。

1.2.3 地面监控部分

地面监控部分包括一个主控站、三个信息注入站和五个卫星监控站（图 1.4）。其中，在科罗拉多监控站与主控站并置，在阿森松岛、迪戈加西亚和卡瓦加兰，监控站分别与注入站并置，夏威夷为独立的监测站。地面监控部分的主要任务是：①监视卫星的运行；②确定 GPS 时间系统；③跟踪并预报卫星星历和卫星钟状态；④向每颗卫星的数据存储器注入卫星导航数据。

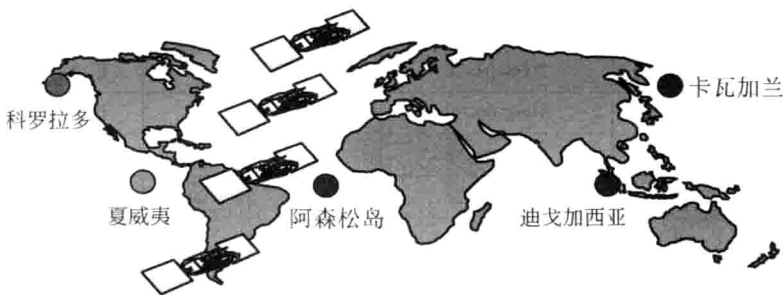


图 1.4 GPS 的地面监控部分

1. 监测站

监测站是在主控站直接控制下的数据自动采集中心。站内设有双频 GPS 接收机、高精度原子钟、计算机和若干台环境数据传感器。接收机对 GPS 卫星进行连续观测，以采集数据和监测卫星的工作状况。原子钟提供时间标准，而环境传感器收集有关当地的气象数据。所有观测资料由计算机进行初步处理，并储存和传送到主控站，用以确定卫星的轨道参数。

2. 主控站

主控站设在美国科罗拉多州斯平士的联合空间执行中心。主控站除对地面监控系统进行

协调和管理外，主要还有以下三个方面的任务。

(1) 根据本站和其他监测站的所有观测资料，推算编制各卫星的星历、卫星钟差和大气层的修正参数等，并把这些数据传送到注入站。

(2) 提供 GPS 的时间基准。各测站和 GPS 卫星的原子钟，均与主控站的原子钟同步，或测出其间的钟差，并把这些钟差信息编入导航电文，送到注入站。

(3) 调整偏离轨道的卫星使之沿预定轨道运行或启用备用卫星以代替失效的工作卫星。

3. 注入站

注入站的主要设备包括一台 3.6m 直径的天线、一台 C 波段发射机和一台计算机。其主要任务是在主控站的控制下将主控站推算和编制的卫星星历、钟差、导航电文和其他控制指令等，注入相应卫星的存储器，每天注入 3~4 次。此外，注入站能自动向主控站发射信号，每分钟报告一次自己的工作状态。

分布于全球 5 个不同位置的整个 GPS 地面监控部分，除主控站外均无人值守。各站之间通过现代化的通信网络相互联系，在原子钟和计算机的驱动和精确控制下，各项工作实现了高度自动化和标准化。

1.2.4 用户部分

用户部分即 GPS 接收机，主要由天线、接收机主机单元和电源组成。

GPS 接收机能够捕获到按一定卫星高度截止角所选择的待测卫星的信号，并跟踪这些卫星的运行，对所接收到的 GPS 信号进行变换、放大和处理，以便测量出 GPS 信号从卫星到接收机天线的传播时间，解译出 GPS 卫星所发送的导航电文，实时地计算出测站的三维位置，甚至三维速度和时间。图 1.5 为常用的 GPS 接收机。



图 1.5 常用 GPS 接收机

1.3 GLONASS 系统

1.3.1 概 述

GLONASS (格洛纳斯) 是与美国 GPS 相似的全球导航卫星系统，是前苏联独立发展的导航卫星系统。苏联自 1982 年 10 月开始研制发射第二代导航卫星——GLONASS 卫星，至 1996 年共发射 24+1 颗卫星，经数据加载，调整和检验，于 1996 年 1 月 18 日系统正式运行，主要为军用。1991 年苏联解体后，俄罗斯全面接管了 GLONASS 系统，但是，由于经济方面的原因，使得系统星座的补网发射难以进行，星座卫星数量最少时只有 7 颗，无法独立提供导航、定位与授时服务。同时，用户设备的开发也受到了极大的影响。2001 年 8 月 20 日，俄罗斯政府批准了 GLONASS 系统 2002~2011 年发展计划。该计划的主要目标是成功开

发、有效应用 GLONASS 系统，保证国家、社会和经济的发展，保障国家安全。

该计划分以下三个阶段执行。

第一阶段，对 GLONASS 星座进行补充，最低限度地保持星座。

第二阶段，利用 GLONASS-M 进行星座升级。内容包括 2003 年进行 GLONASS-M 卫星的首次飞行试验，卫星寿命达到 7 年，转换导航频率和引入第二个民用导航频率等。

第三阶段，利用 GLONASS-K 卫星进行星座升级，构成由 24 颗 GLONASS-M 和 GLONASS-K 卫星组成的星座。同时，降低系统维持成本，进行地面控制段的升级，引入第三民用导航信号，改善导航信号特性以及提升用户设备性能。

2011 年 12 月 31 日，俄罗斯宣布 GLONASS 系统 2002 ~ 2011 年发展计划已经完成，同时公布 2012 ~ 2020 年将投资 3470 亿卢布（约 120 亿美元）用于 GLONASS 系统和相关用户设施的发展，发射约 35 颗卫星，其中 GLONASS-M 卫星 13 颗，GLONASS-K 卫星 22 颗，使 GLONASS 系统定位精度达到 0.6m。

目前，GLONASS 系统处于星座恢复阶段，尚不能单独提供全球导航卫星服务。因此，俄罗斯政府鼓励使用 GPS/GLONASS 组合接收设备，特别要求俄罗斯航天、军事与政府部门用户必须使用 GPS/GLONASS 组合接收设备，为将来 GLONASS 系统恢复后，向以使用 GLONASS 系统为主过渡；同时促进 GLONASS 的应用，特别是民用部分的发展，以此为基础进入全球导航卫星市场，并积极谋求使 GLONASS 系统成为定位、导航与授时服务重要的全球性基础设施。

1.3.2 系统组成

GLONASS 系统分为卫星星座、地面控制与监控站、用户设备三个部分。但目前市场上没有单独使用 GLONASS 系统的民用接收机。

1. 卫星星座

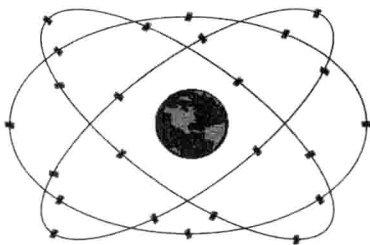


图 1.6 GLONASS 卫星星座

设计的 GLONASS 卫星星座为 24 颗卫星均匀地分布在 3 个轨道平面内，每个轨道上等间隔地分布 8 颗卫星（图 1.6），轨道倾角为 64.8° ，卫星距离地面高度为 19100km，卫星的运行周期为 11h15min。GLONASS 系统可进行卫星测距。民用无任何限制，不收费。民用的标准精度为：水平精度为 50 ~ 70m，垂直精度为 75m，测速精度为 15cm/s，授时精度为 $1\mu\text{s}$ ，导航信息数据率为 50bit/s。

GLONASS 和 GLONASS-M 卫星的结构均采用圆柱形密闭压力容器，星上仪器、天线馈线装置、指向系统仪器、太阳能电池板驱动装置、推进单元和热控系统百叶窗驱动装置均在其内部。GLONASS-M 卫星以 GLONASS 卫星为基础，改进了后者的天线馈线和星钟，增加了第二个民用导航信号。GLONASS-K 卫星是新一代卫星，采用非密闭式平台。平台是以“快讯”1000 为基础改进的。卫星重量约 700kg，远低于以前的卫星。卫星设计寿命为 10 ~ 12 年，在 L 频段播发 3 个民用导航信号，GLONASS-K 卫星试验于 2007 年开始。截至 2012 年底，在轨正常工作的 GLONASS 卫星已达 23 颗，另有备用卫星 3 颗（表 1.2）。

表 1.2 GLONASS 卫星基本情况

轨道名	编号	开始服务日期	备注	轨道名	编号	开始服务日期	备注
1	730	2010-01-30		2	715	2007-04-03	
	728	2009-01-20			738	2010-10-11	
	744	2011-12-08			736	2010-10-04	
	742	2011-10-25		3	722	2008-01-25	备用卫星
	734	2010-01-10			724	2008-10-26	
	733	2010-01-24			720	2007-11-25	
	745	2011-12-18			719	2007-11-27	
	729	2009-02-12			725	2008-11-05	
	712	2005-10-07	备用卫星		731	2010-03-28	
2	717	2007-04-03			732	2010-03-28	
	723	2008-01-22		735	2010-03-28		
	737	2010-10-12		746	2011-12-23		
	721	2008-02-08		714	2006-08-31	备用卫星	

2. 地面支持系统

地面支持系统由系统控制中心、中央同步器、遥测遥控站（含激光跟踪站）和外场导航控制设备组成。

GLONASS 系统地面支持系统的功能刚开始由前苏联境内的许多场地来完成，前苏联解体后，系统由俄罗斯航天局管理，地面支持已经减少到只有俄罗斯境内的场地。目前，系统控制中心和中央同步处理器位于莫斯科，遥测遥控站分别位于圣彼得堡、捷尔诺波尔、埃尼谢斯克和共青城。

1.4 GALILEO 系统

1.4.1 概 述

GALILEO（伽利略）系统是由欧共体发起，旨在确定建立一个由国际组织控制的民用全球卫星导航服务系统。1999年12月，西班牙提出了第一套解决方案，历经1年多的讨论研究，从6个欧共体国家的15份解决方案中筛选出目前的GALILEO系统。该系统是以独立性、全球性、欧洲人控制卫星为基础的民用导航和定位系统。其总的战略意图有以下三个方面。

(1) 建立一个高效经济的民用导航及定位系统。

(2) 使之具备欧洲乃至世界运输业可以信赖的高度安全性，且确保任何未来系统安全置于欧洲人的控制之下。

(3) 该系统的实施将为欧洲工业进军正在兴起的卫星导航市场的各个方面提供一个良好的机会，使其能够站在一个合理的基础上公平竞争。

GALILEO前期的表现形式为欧共体所提出的EGNOS（Euro geostationary navigation overlay service）系统，该系统是和美国的WAAS（wide area augmentation system）、日本的MSAS（multi-functional satellite augmentation system）并存的地区广域差分系统。

GALILEO 系统能够与美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 系统实现多系统内的相互合作,任何用户将来都可以用一个接收机采集各个系统的数据或者各系统数据的组合来实现定位导航的要求。GALILEO 系统可以分发实时的米级定位精度信息,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,如果失败也能够几秒钟内通知用户。对于对安全性有特殊要求的情况,如飞机导航和着陆、铁路安全运行调度、海上运输、陆地车队运输调度、精准农业等,GALILEO 系统的应用就特别适合。

1.4.2 体系结构

GALILEO 系统设计体系结构包括空间星座、地面部分和用户三部分。

1. 空间星座

GALILEO 系统的卫星星座由分布在 3 个轨道上的 30 颗中等高度轨道卫星 (MEO) 和 3 颗静地轨道 (GEO) 卫星组成。3 颗静地卫星分别为定点在西经 15.5° 的 Inmarsat III AOE-E 卫星、定点在东经 25° 的 Inmarsat III F5 卫星和定点在东经 21.5° 的 ESA Artemis 卫星。30 颗中轨卫星均匀分布在 3 个轨道面上,每个轨道上有 10 颗卫星,9 颗正常工作,1 颗运行备用,轨道高度为 23223km,轨道倾角为 56° 。2011 年 10 月发射了两颗 MEO 卫星。

2. 地面部分

地面部分包括全球地面控制段、全球地面任务段、全球域网、导航管理中心、地面支持设施和地面管理机构。其主要功能为:导航控制和星座管理;完好性数据检测和分发。

导航控制和星座管理功能由地面控制部分完成,主要由导航系统控制中心、轨道同步站网络和遥测遥控中心三部分构成。其中,轨道同步站共 15 个,无人监管并且只能接收星座发出的导航电文和星座运行环境数据,并把数据传送到导航系统控制中心进行检测和处理;分布在四点的遥测遥控系统接收导航系统控制中心提供的导航数据信息,并上传到星座。

完好性数据检测和分发功能主要由欧洲完好性决策系统完成,该系统主要由完好性监视站、完好性注入站和完好性控制中心三部分组成。其中,无人照管的监视站网络接收来自星座的 L 波段,以此计算 GALILEO 系统完好性的原始卫星测量数据;控制中心包括完好性控制设备、完好性处理设备和完好性服务接口,它接收监视站的数据,并发送数据到无人照管的注入站,再由注入站将数据以 S 波段发送到星座上。

1.5 北斗卫星导航系统

1.5.1 北斗卫星导航系统简介

北斗卫星导航系统 (BDS, 简称北斗系统),是我国自主建设、独立运行,并与世界其他卫星导航定位系统兼容的全球卫星导航系统。其分为“北斗一代”和“北斗二代”,分别由 4 颗 (两颗工作卫星、两颗备用卫星) 和 35 颗北斗定位卫星、地面控制中心为主的地面部分、北斗用户终端三部分组成。北斗系统可向用户提供全天候的即时定位服务,其精度与 GPS 相当。我国在 2000 ~ 2007 年先后发射了 4 颗“北斗一号”卫星,建立起我国“北斗一代”卫星导航系统,这种区域性的卫星导航定位系统,为我国陆地交通、航海、森林防火等领域提供了良好的服务。

“北斗一代”卫星导航定位系统主要由两颗地球静止轨道卫星、地面中心站、用户终端组成。系统的基本工作原理是“双星定位”（图 1.7），即以两颗在轨卫星的已知坐标为圆心，各以测定的卫星至用户终端的距离为半径，形成两个球面，用户终端将位于这两个球面交线的圆弧上。地面中心站配有电子高程地图，提供一个以地心为球心，以球心至地球表面高度为半径的非均匀球面。用数学方法求解圆弧与地球表面的交点即可获得用户的位置。

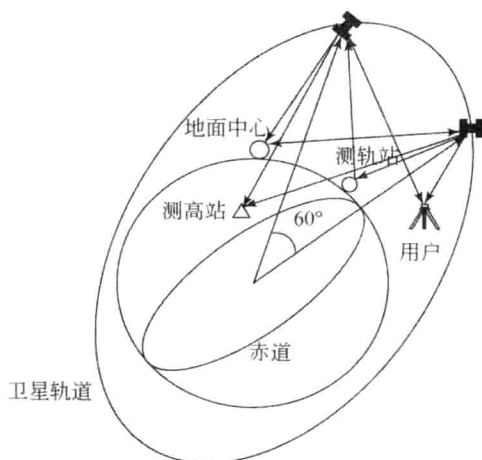


图 1.7 北斗双星定位系统

用户利用“北斗一代”定位的过程。首先由用户向地面中心站发出请求，然后地面中心站发出信号，分别经两颗卫星反射传送至用户，地面中心站通过计算中心发出的信号，经卫星转发到用户，用户响应后，信号再经卫星传回到中心的时间延迟，求得卫星到用户的距离，完成定位。“北斗一代”与 GPS 不同，对所有用户位置的计算不是在用户接收机上进行，而是在地面中心站完成。因此，地面中心站可以保留全部北斗用户的位置及时间信息，并负责整个系统的监控管理。

由于“北斗一代”在定位时需要用户终端向定位卫星发送定位信号，由信号到达定位卫星时间的差值计算用户位置，所以被称为“有源定位”。

2007 年 4 月，我国开始发射“北斗二代”导航卫星，到 2010 年 1 月，成功发射了第三颗北斗导航卫星（G1），标志着我国进入“北斗二代”系统卫星的密集发射阶段。

“北斗二代”卫星导航系统的基本定位是由 27 颗中圆地球轨道卫星完成的，通过 3 个 55° 倾角的轨道平面各部署 9 颗卫星，定位精度可达 10m 以内，理论上可以达到水平和垂直方向 7.5m 精度。为了满足高纬度地区进行信号增强工作的需求，增设了 3 颗倾斜地球同步轨道（IGSO）卫星。IGSO 卫星高度和静止轨道卫星相同，但是倾角不为 0° ，因此轨道中心在赤道设定的经度上，星下点南北来回运动在地面上划出很明显的 8 字形轨迹。IGSO 轨道卫星克服了 GEO 卫星在高纬度地区仰角过低的问题，可以对高纬度地区进行有效的信号增强。3 颗 IGSO 卫星轨道最北到北纬 55° ，可对我国领土范围内进行有效的精度增强。

“北斗一代”与“北斗二代”卫星导航系统的差别主要是“北斗二代”用户机可不再依靠中心站电子高程图处理或由用户提供高程信息，而是直接接收卫星单程测距信号自己定位，系统的用户容量不受限制，并可提高用户位置的隐蔽性。

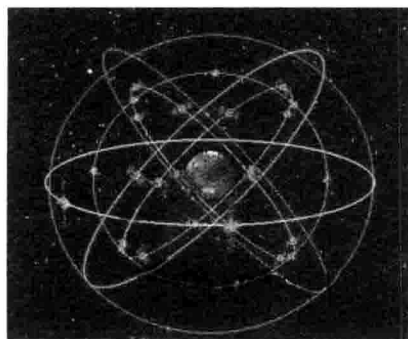


图 1.8 北斗系统卫星星座

1.5.2 “北斗二代”系统组成

“北斗二代”卫星导航系统设计的空间星座由 5 颗地球静止轨道卫星、27 颗中圆地球轨道卫星和 3 颗倾斜地球同步轨道卫星组成（图 1.8）。GEO 卫星轨道高度为 35786km，分别定点于东经 58.75° 、东经 80° 、东经 110.5° 、东经 140° 和东经 160° ；MEO 卫星轨道高度为 21528km，轨道倾角为 55° ；IGSO 卫星轨道高度为

35786km, 轨道倾角为 55° 。每颗北斗卫星都发射 4 个频率的载波信号用于导航: 1561.098 MHz (B1), 1589.742 MHz (B1-2), 1207.14 MHz (B2), 1268.52 MHz (B3), 每个载波信号均有正交调制的普通测距码 (I 支路) 和精密测距码 (Q 支路)。卫星以不同地址码区分。截至 2012 年底, 在轨工作卫星有 5 颗 GEO 卫星、4 颗 MEO 卫星和 5 颗倾斜地球同步轨道卫星 (表 1.3)。

表 1.3 北斗卫星基本情况

卫星编号	卫星类型	卫星发射时间
G1	地球静止轨道 140°E	2010-01-17
G3	地球静止轨道 84°E	2010-06-02
I1	倾斜地球同步轨道倾角 55°	2010-08-01
G4	地球静止轨道 160°E	2010-11-01
I2	倾斜地球同步轨道倾角 55°	2010-12-18
I3	倾斜地球同步轨道倾角 55°	2011-04-10
I4	倾斜地球同步轨道倾角 55°	2011-07-27
I5	倾斜地球同步轨道倾角 55°	2011-12-02
G5	地球静止轨道 58.5°E	2012-02-25
M3	中地球轨道 21500km	2012-04-30
M4	中地球轨道 21332km	2012-04-30
M5	中地球轨道 21332km	2012-09-19
M6	中地球轨道 21332km	2012-09-19
G6	地球静止轨道 110.5°E	2012-10-25

地面控制部分由若干主控站、注入站和监测站组成。主控站主要任务是收集各个监测站的观测数据, 进行数据处理, 生成卫星导航电文、广域差分信息和完好性信息, 完成任务规划与调度, 实现系统运行控制与管理等; 注入站的主要任务是在主控站的统一调度下, 完成卫星导航电文、广域差分信息和完好性信息注入, 有效载荷的控制管理; 监测站对导航卫星进行连续跟踪监测, 接收导航信号, 发送给主控站, 为卫星轨道确定和时间同步提供观测数据。

用户终端部分由各类北斗用户终端, 以及与其他卫星导航系统兼容的终端组成, 能够满足不同领域和行业的应用需求。

北斗卫星导航系统时间基准采用北斗时 (BDT), 秒长取国际单位制秒, 起算历元为 2006 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒协调世界时 (UTC)。BDT 是连续时间, 与 UTC 之间的闰秒信息在导航电文中播报。BDT 与 UTC 的偏差保持在 100ns 以内。北斗卫星导航系统的坐标框架采用中国 2000 大地坐标系统 (CGCS2000)。

北斗卫星导航系统建成后将为全球用户提供卫星定位、导航和授时服务。其定位精度优于 10m, 测速精度优于 0.2m/s, 授时精度优于 20ns。在我国及周边地区还提供定位精度 1m 的广域差分服务和 120 个汉字/次的短报文通信服务。

1.6 全球导航卫星系统特点

1.6.1 全球导航卫星系统性能比较

全球导航卫星系统 (GNSS) 是目前所有卫星定位系统的总称, 包含 GPS、GLONASS、

GALILEO、BDS 等系统。此四大系统在系统架构、定位原理、应用领域等方面基本相似，但系统性能方面有很多区别。

系统架构：四大系统均分为空间卫星星座、地面监控、用户接收机三个部分。

定位原理：四大系统均采用被动式测距，测量空间卫星至用户接收机的距离，利用 4 颗卫星进行定位。

应用领域：四大系统均分为免费使用和有偿使用两类，都可以应用到多个领域。

GPS、GLONASS、GALILEO、BDS 四大系统在系统的具体性能方面有很多区别，主要有：卫星数量和星座不同、信号传输方式不同、参照系不同、定位精度不同（表 1.4）。

表 1.4 GNSS 系统性能比较

内 容		系 统		GPS	GLONASS	GALILEO	BDS
		卫星数量 /个	设计 实际				
卫星数量和星座	卫星数量	设计	24	24	33	35	
		实际	31	26	2	14	
	卫星类型		MEO	MEO	MEO GEO	MEO GEO IGSO	
	轨道面数		6	3	3+1	3+1+2	
	轨道高度/km		20181.5	19061.8	23223.1	21499.8 35785.8	
	轨道倾角/(°)		55	64.8	56	55	
	轨道长半轴/km		26559.7	25440	29601.2	27878 42164	
	中轨卫星运行周期		11h58min02s	11h16min	14h4min	—	
信号传输	多址方式		码分	频分	码分	码分	
	频段 /MHz		1575.42	1602.1625 ~ 1615.50	1587 ~ 1590 1559 ~ 1563	1561.098 1589.742	
			1227.60	1246.4375 ~ 1256.50	1164 ~ 1215 1260 ~ 1300	1207.140 1268.520	
	下行码速率/(bit/s)		50	50	50 ~ 1500	50	
参照系	时间系统		GPST	GLONASST	GALILEOT	BDT	
	坐标系统		WGS-84	PZ-90	—	CGCS2000	
定位精度	绝对定位/m		<50	<100	—	<10	
	授时/ns		10	1000	—	20	
	测速/(m/s)		<0.1	<0.15	—	<0.2	
功能			定位、测速、授时	定位、测速、授时	定位、测速、授时	定位、测速、授时、短信	