

基于 GNSS 多种技术监测方法

Various technical monitoring methods based on GNSS

黄静新 咎秀红 编著

GNSS

中国农业科学技术出版社

GNSS

基于 GNSS 多种技术监测方法

Various technical monitoring methods based on GNSS

黄静新 咎秀红 编著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

基于 GNSS 多种技术监测方法 / 黄静新, 咎秀红编. —北京:
中国农业科学技术出版社, 2016.5
ISBN 978-7-5116-2579-3

I. ①基… II. ①黄… ②咎… III. ①卫星导航—全球定位
系统—测绘—研究 IV. ①TN967.1 ②P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 073683 号

责任编辑 张孝安

责任校对 李向荣

出版发行 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010) 82109708 (编辑室) (010) 82109704 (发行部)
(010) 82109703 (读者服务部)

传 真 (010) 82109708

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 新华书店北京发行所

印 刷 者 河北省欣航测绘院印刷厂

开 本 889mm×1194mm 1/16

印 张 9.5

字 数 186 千字

版 次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价 80.00 元

❖ 版权所有·翻印必究 ❖

内 容 简 介

本书是作者在多年从事测绘工程与应用研究的基础上撰写而成的。全书共分两篇 7 章：第 1 篇为 GNSS 的基本原理；第 2 篇为案例分析：主要以固体矿山储量三维动态监测、区域地质灾害滑坡监测、SICOMINES 铜钴矿 D 坑边坡监测等 3 个案例为主题，详细介绍了以 GNSS 为基础的多种监测手段。本书可供从事变形监测和工程测量的测绘专业和工程技术人员参考阅读。

前 言

地质灾害是严重危害人民生命财产安全和制约社会经济可持续发展的自然灾害之一，它是一种自然现象，同时也可由人为工程活动诱发，加剧危害的一种灾害。深圳光明新区“12·20”滑坡灾害、湖北宣恩地质滑坡、浙江丽水莲都山体滑坡等地质灾害事故不但造成了极大的财产损失，而且造成了人员伤亡。这一现象已引起各地政府的高度重视，因此，必须加强对各类矿山施工期间的监测工作，查明安全隐患分布情况，评价其危险程度，采取有效预防措施，减小地质灾害造成的各项损失。

GNSS 是 Global Navigation Satellite System 的缩写，中文全称是全球导航卫星系统，被定义为：一个全球性的位置和时间测定系统，包括一种或几种卫星系统、机载接收机和系统完备性监视。目前主要包括美国主导的 GPS 系统、俄罗斯主导的 GLONASS 系统、欧盟主导的 GALILEO 系统以及中国主导的北斗系统，可用卫星在 100 颗以上。

全球导航卫星系统具有全天候、高精度的连续定位系统并且具有速度快、费用低、方法灵活多样和操作简便等优良特性而被广泛应用于控制测量、工程测量和变形监测中。但 GNSS 应用于变形监测还受制于使用成本高、地理环境因素影响大等原因，故而，在一些工程项目中采取综合监测系统：互联网 + GNSS 系统 + 全站仪机器人 + 电子水准仪 + ……本书以具体案例为依据，分析了几种监测设备的具体使用。

全书共分 7 章，第 1 章、第 2 章和第 3 章由咎秀红编写；前言、第 4 章、第 5 章、第 6 章和第 7 章由黄静新编写。全书由黄静新统稿。书中图件由咎秀红绘制。

由于编者水平有限，不足之处在所难免，敬请各位专家和广大读者批评指正。

作 者

2016 年 2 月

目 录

第 1 篇 GNSS 的基本原理	(1)
第 1 章 GNSS 发展概况	(1)
1.1 GNSS 的产生	(1)
1.2 GNSS 的发展现状	(1)
1.3 我国的 GPS 大地网	(3)
第 2 章 GNSS 卫星定位技术	(7)
2.1 GNSS 介绍	(7)
2.2 GNSS 组成	(7)
2.3 四大全球卫星导航系统比较	(11)
2.4 GNSS 卫星定位原理	(14)
第 3 章 测量系统与参考框架	(19)
3.1 坐标系统	(19)
3.2 国际地球参考框架	(20)
3.3 我国大地坐标系统	(20)
3.4 坐标系之间的转换	(22)
3.5 高程系统和高程框架	(23)
3.6 重力系统和重力测量框架	(24)
3.7 深度基准	(24)
3.8 时间基准	(24)
第 4 章 GPS 控制网	(30)
4.1 GPS 控制网等级	(30)
4.2 卫星定位连续运行基准站网的布设	(31)
4.3 GPS 网布设	(33)
4.4 GPS RTK 测量	(36)
4.5 GPS 测量数据处理	(38)
第 2 篇 案例分析	(39)
第 5 章 固体矿产 (矿山) 储量三维空间监测应用	(39)
5.1 概况	(39)
5.2 以往工作情况	(40)
5.3 工作依据及流程	(41)

5.4	主要工作内容	(42)
5.5	实物工作量及预期成果	(63)
5.6	费用预算	(64)
5.7	组织管理与保障措施	(67)
第 6 章	地质灾害监测应用	(69)
6.1	概述	(69)
6.2	滑坡体监测设计的原则、依据和技术指标	(71)
6.3	滑坡立体监测设计	(72)
6.4	设备选型	(86)
6.5	监测系统软件	(93)
6.6	工程质量管理体系	(103)
第 7 章	变形监测应用	(107)
7.1	总则	(107)
7.2	边坡监测基础工作	(110)
7.3	TM30 测量机器人的应用	(115)
7.4	GNSS 自动化监测预警系统组成	(123)
	主要参考文献	(141)

第 1 篇 GNSS 的基本原理

第 1 章 GNSS 发展概况

1.1 GNSS 的产生

全球导航卫星系统，简称 GNSS。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提倡发展完全民用的全球导航卫星系统。1992 年 5 月，在国际民航组织（ICAO）未来空中导航系统会议上，确定了全球导航卫星系统的定义：它是一个全球性的位置和时间测定系统，包括一种或几种卫星星座、机载接收机和系统完备性监视。

全球导航卫星系统致力于弥补第二代导航卫星定位系统存在的不足。将分两步实施建立，第一步以 GPS/GLONASS 导航卫星系统为基础，建立一个混合系统，该系统应集合地球同步卫星移动通信导航卫星系统、完备性监视系统以及接收机完备性监视系统于一体，第二步建立一个由多种中高轨全球导航卫星和静地卫星构成的纯民间控制的 GPS 系统。

目前，欧洲已经建成 EGNOS，它是一种覆盖全欧洲的广域增强系统，可以改善 GPS/GLONASS 的实时导航定位精度，并提供系统完备性监测信息。

美国联邦航空管理局建成了 WAAS，该系统是覆盖美国的用于改善 GPS 定位精度的广域增强系统，该系统提供了 GPS 星历和卫星钟改正、差分距离改正、电离层改正以及完备性信息，以提高 GPS 导航定位的可靠性。

日本也建立了 QZSS 系统，对于在城市峡谷和多山地形的国家和地区，用户机用户在观测卫星时是否具有高仰角是非常重要的。在日本，有很多的山脉和稠密高层建筑以及狭窄道路。在这种情况下，QZSS 系统可以保证，GPS 用户在任何时间，在天顶附近区域都可以高仰角接收到至少一颗 QZSS 卫星信号。

上述系统都属于 GPS/GLONASS 为依托的外部增强系统，不具备独立的全球性质的导航定位能力，只能起到辅助改善系统定位精度、可靠性和完备性的作用。随着时代的发展，越来越多的国家意识到拥有自己的全球导航卫星系统的重要性，因此，在 GPS 和 GLONASS 之后，欧盟主导建立了 GALILEO 系统以及中国主导建立了北斗系统，至此全球导航卫星系统（GNSS）雏形初现，这 4 个全球性质的导航卫星系统即是现阶段 GNSS 的主要构成。

1.2 GNSS 的发展现状

在当前全球导航卫星系统发展过程中，GPS 现代化、GLONASS 现代化、欧盟的

GALILEO 计划和中国的北斗系统都是全球性质的，因此也将起到关键作用，下面分别对他们给予简要介绍。

1.2.1 GPS 现代化

GPS 现代化将在民用和军用两方面改善 GPS 服务，其核心部分主要包括：增加 GPS 两个新的民用频道，提高 GPS 卫星集成度，增强 GPS 无线电信号强度，改进导航电文，改善导航和定位精度，提高系统可靠性并强化抗干扰能力。具体内容可归纳为 3 个方面：①保护 GPS 系统不受敌方和破坏分子干扰，提高 GPS 军用信号的抗干扰能力，其中，包括增强 GPS 军用无线电信号的强度。②阻止地方利用 GPS 军用信号。设计新型 GPS 卫星，使用新的 GPS 信号结果，增加新频段，将民用信号和军用信号分离。③改善 GPS 导航定位的精度，在 IIF 型卫星中增加两个新的民用频道，即在 L2 中增加 C/A 码，另增加 L5 民用频道。

1.2.2 GLONASS 现代化

GLONASS 现代化具体内容有：①俄罗斯将继续发射新型卫星，以改善工作卫星不足的现状，同时增设第二个民用导航定位信号。②改善 GLONASS 与其他无线电系统的兼容性；改进卫星子系统；改进地面控制系统。③改频计划，因为 GLONASS 采用频分多址，所以占用频段较多，采用适当技术，让出高端频率。④未来的 5 年，即到 21 世纪 20 年代，系统的整体功能将进一步加强，达到与 GNSS 系统抗衡的目的。

1.2.3 GALILEO 系统

GALILEO 系统自 2001 年提出起，其主要侧重于民用，该系统服务功能主要集中在公共服务、生命安全服务、商业服务、公共管理服务和搜索与营救服务。由于 GALILEO 系统的设计在 GPS 与 GLONASS 之后，所以其设计理念较前两个系统更为全面，卫星设计更为合理，信号结构设置更为科学，完备性监测更为完善。GALILEO 系统在建设中除了面对 GPS 领域的老问题，还要面对系统可协调性和系统安全性这样的新技术问题，甚至还要面对欧洲和世界的政治问题。因此，虽然其理论价值很高，很完善，但是其建设十分缓慢，欧盟不得不调整计划，将运营阶段推迟到 2014 年，但即便如此截至今日，其卫星数量达到 8 个，只能做到覆盖欧洲区域。未来如何能加快建设，增加卫星数量，将是 GALILEO 系统发展的重要问题。

1.2.4 北斗系统

北斗系统的“三步走”计划至今已走完两步，现在已发射卫星 19 颗，实现覆盖亚太地区的目标。未来“第三步”要走的路依旧很艰难，主要在这 5 个方面：①卫星所载原子钟的授时精度有待提升，它决定着卫星定位精度，与美国的原子钟相比中国的原子钟存在不小的差距，这也是为什么目前北斗精度始终不如 GPS 定位精度高的原因之一；②提升卫星使用寿命，我国现在北斗卫星的使用寿命在 8 年左右，如何将其延长到 10~15 年将是一个挑战，这样就大大减少补网卫星发射数量，增加经济效益；③加强一箭多星技

术,也可以增加经济效益;④增强北斗系统兼容性,既然是全球卫星定位系统,就要满足可以接受其他系统信号并参与计算,这样既能提高定位精度,又增加了数据冗余度使数据质量更高,定位结果更可信;⑤既然是全球卫星定位系统,就涉及在全球范围内建设地面站,这其中涉及大量的国际合作问题。

1.3 我国的 GPS 大地网

1.3.1 GPS 网分为两大类

- (1) 全球或全国性的高精度 GPS 网(A 级 GPS 网、B 级 GPS 网);
- (2) 区域性的 GPS 网(国家 C、D、E 级 GPS 网或专为工程项目而建立的工程 GPS 网)。

1.3.2 EPOCH 92 中国 GPS 大会战(92A 级网)

1.3.2.1 目的

利用国际全球定位系统地球动力学服务 IGS92 会战的机会,完成一次全国性精密 GPS 定位会战。目的是在全国范围内确定精确地心坐标,建立起我国新一代地心参考框架及其与国家坐标系转换参数,布设成国家 A 级网,作为国家高精度卫星大地网的骨架并奠定地壳运动及地球动力学研究的基础。

1.3.2.2 观测情况

全网 27 个点,其中 5 个测站上布置了 GPS 观测副站,平均边长 800km,使用 4 台 MI-NI-MAC2816、13 台 Trimble 4000 SST 和 17 台 Ashtech MDX II C/A 双频接收机观测。

1.3.2.3 精度

平差后在 ITRF 91 地心参考框架中的定位精度优于 0.1m,边长相对精度一般优于 1×10^{-8} 。

1.3.3 96 GPS A 级网

1.3.3.1 目的

为了达到进一步完善我国新一代的地心坐标框架的目的,在我国西部地区增加了新的点位,对 92 GPS A 级网的改造,尽量增埋了新点。

1.3.3.2 观测情况

96 GPS A 级网共包括 33 个主站,23 个副站,与 92 GPS A 级网点重合 21 个。96 GPS A 级网观测时共使用了 53 台双频 GPS 接收机,其中 14 台 Ashtech MD12,17 台 Trimble 4000 SSE,8 台 Leica 200,6 台 Rogue 8000,8 台 Ashtech Z12。

1.3.3.3 精度

经数据精处理后基线分量重复性水平方向优于 $4\text{mm} + 3\text{ppm}$,垂直方向优于 $8\text{mm} + 4\text{ppm}$,地心坐标分量重复性优于 2cm。全网整体平差后,在 ITRF93 参考框架中的地心坐标精度优于 10cm,基线边长的相对精度优于 1×10^{-8} 。

1.3.4 国家高精度 GPS B 级网

1.3.4.1 目的

为了精化我国的大地水准面,初步建立覆盖全国的三维地心坐标框架,精确测定我国大地坐标与地心坐标系之间的转换参数,监测我国地壳变和板块运动,建立海洋大地测量与陆地大地测量统一的大地基准。

1.3.4.2 观测情况

全网由 818 个点组成,分布全国各地(除台湾省外)。东部点位较密,平均站间 50 ~ 70km,中部地区平均站间 100km,西部地区平均站间距 150km。外业自 1991 年至 1995 年结束。

1.3.4.3 精度

点位中误差相对于已知点在水平方向优于 0.07m,高程方向优于 0.16m,平均点位中误差水平方向为 0.02m,垂直方向为 0.04m,基线相对精度达到 1×10^{-7} 。

1.3.5 全国 GPS 一、二级网

全国 GPS 一、二级网是军测部门建立的。

1.3.5.1 观测情况

(1) 一级网:由 40 余点组成。大部分点与国家三角点(或导线点)重合,水准高程进行了联测。一级网相邻点间距离最大 1 667km,最小 86km,平均为 683km。

(2) 二级网:由 500 多个点组成,二级网是一级网的加密。二级网与地面网联系密切,有 200 多个二级点与国家三角点(或导线点)重合,所有点都进行了水准联测,全网平均距离为 164.7km。

1.3.5.2 精度

(1) 一级网:基线分量相对误差平均在 0.01ppm 左右,最大 0.024ppm,点位中误差,绝大多数点在 2cm 以内。

(2) 二级网:基线分量相对误差平均在 0.02 ppm 左右,最大 0.245ppm,网平差后大地纬度、大地经度和大地高的中误差的平均值分别为 0.18cm、0.21cm 和 0.81cm。

1.3.6 中国地震运动观测网络

主要是服务于中长期地震预报,兼顾大地测量的目的。

1.3.6.1 基本情况

以 GPS 为主,辅以 SLR 和 VLBI 以及重力测量的观测网络,它由 3 个层次的网络组成,即 25 站连续运行的基准网、56 站定期复测的基本网和 1 000 站复测频率低的区域网。

1.3.6.2 观测情况

基准网与基本网的试验联测于 1998 年 8—9 月完成,每天连续观测 23.5h 以上。

基准站从 1999 年 1 月开始运行。区域网(与基准站和区域站一起)的首次观测于 1999 年 3—10 月进行。每站观测 4 ~ 5d。

1.3.7 中国 GPS 2000 网

1.3.7.1 现状

目前点数达 2 000 多个, GPS 永久性跟踪站 25 个。点数少、分布密度低(1 点:70km×70km, 即 9 幅 1:5 万地形图才有 1 个 GPS 点)。

1.3.7.2 “十五”期间

“十一五”期间布局合理的高精度的 GPS 加密网点 5 000 个, 270 个左右的永久性跟踪站。

1.3.8 我国先后建成 4 个较大规模的 GPS 大地网

1.3.8.1 A、B 级网 (图 1-1-1)

①框架: ITRF93。②历元: 1996.365。③精度: 约为 1×10^{-7} 。



图 1-1-1 A、B 级网示意

1.3.8.2 形变监测网 (图 1-1-2)

①框架: ITRF96。②历元: 1996.582。③精度: 约为 1×10^{-8} 。



图 1-1-2 形变监测网

1.3.8.3 一、二级网 (图 1-1-3)

①框架: ITRF96。②历元: 1997.0。③精度: 约为 3×10^{-8}



图 1-1-3 一、二级网

1.3.8.4 地壳运动观测网络 (图 1-1-4)

①框架: ITRF96。②历元: 1998.680。③精度优于 2mm。



图 1-1-4 地壳运动观测网络

第2章 GNSS 卫星定位技术

2.1 GNSS 介绍

GNSS 是 Global Navigation Satellite System 的缩写，中文全称是全球导航卫星系统，被定义为：一个全球性的位置和时间测定系统，包括一种或几种卫星星座、机载接收机和系统完备性监视。目前，主要包括美国主导的 GPS 系统、俄罗斯主导的 GLONASS 系统、欧盟主导的 GALILEO 系统以及中国主导的北斗系统，可用卫星在 100 颗以上。4 个系统之间有着相同点，也有着差异。总的来说，GPS 和 GLONASS 是同一时期先后建立起来的全球性质的导航卫星系统，因此在 GALILEO 系统和北斗系统建立时，参考了前者的经验和技術，改善其不足之处。

全球导航卫星系统具有全天候、高精度、自动化、高效益、性能好、应用广等显著特点为各类用户提供精确的坐标、速度和时间（图 1-2-1）。通过卫星为基础的无线电导航定位系统完成导航、定位和定时等各系列功能。

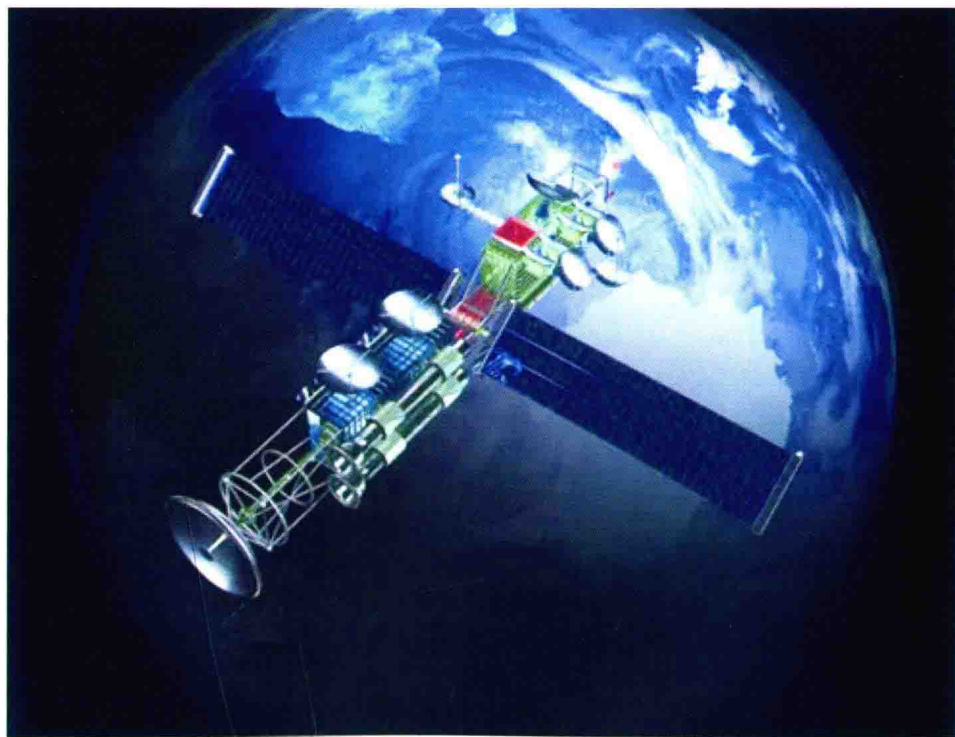


图 1-2-1 空间飞行的 GNSS

2.2 GNSS 组成

全球导航卫星系统由全球设施、区域设施和用户部分构成（图 1-2-2）。

全球设施包括 3 个部分空间段、空间信号和地面控制部分。空间段的核心是一系列空间卫星，其主要功能有接收地面监控站发送的信息、指令。对部分数据进行必要处理。

提供精确的时间标准和频率基准。调整卫星在轨姿态。发送卫星导航定位信号或其他特定信号。

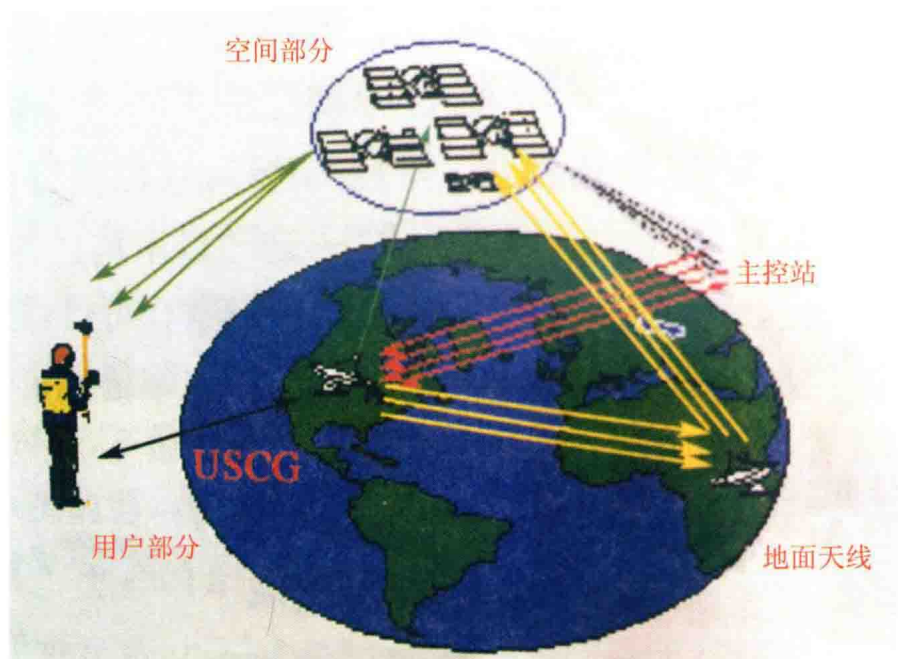


图 1-2-2 导航卫星定位系统的三大部分

GPS 迄今为止有 31 颗在轨运行卫星，分布在等间隔的倾角为 55° 的 6 个轨道面，轨道平均高度约为 20 200km，每个卫星都装有铷钟或铯钟，以提供精确的时间。20 世纪 90 年代美国认识到 GPS 存在的不足，进而提出了“GPS 现代化”的构想，通过取消 SA 政策，新增加 L2C 码和 M 码，研制新型卫星等方法提高 GPS 的性能（图 1-2-3）。

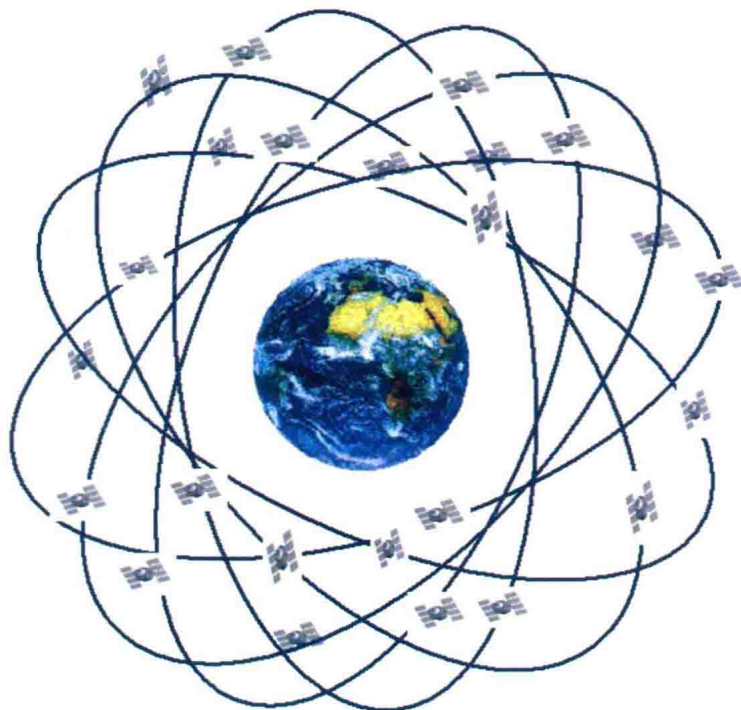


图 1-2-3 GPS 导航系统

GLONASS 完整的卫星星座包含 3 个轨道面的 21 颗工作卫星和 3 颗备用卫星, 每个轨道平面上有 8 颗星均匀分布, 卫星高度约为 19 100km, 但由于其卫星在轨工作时间较短, 严重影响了系统性能, 因此在 21 世纪初, 俄罗斯侧重设计新型卫星, 提高卫星寿命以此提升 GLONASS 性能。

GALILEO 系统卫星星座计划由 27 颗工作卫星和 3 颗备用卫星, 卫星分布在距地面 23 616km 的 3 个中轨上, 轨道倾角为 56° , 每个轨道上有 9 颗卫星。以上数据只是设计阶段的预期目标, 实际中卫星数量并没有达到 27 颗, 现阶段已经发射 4 颗 GALILEO 系统卫星。

北斗卫星导航系统 (BDS) 中国自行研制的全球卫星定位与通信系统, 设计空间星座由 5 颗地球静止轨道 (GEO) 卫星、27 颗中远地球轨道 (MEO) 卫星和 3 颗倾斜地球同步轨道 (IGSO) 卫星组成。我国结合国情、科学、合理地提出“北斗”卫星导航系统建设的“三步走”规划。第一步 (2000—2003 年) 发射北斗双星, 为北斗系统建设积累技术经验、培养人才; 第二步 (2003—2012 年) 发射 10 多颗卫星, 实现覆盖亚太地区; 第三步 (2012—2020 年) 完成设计计划实现全球覆盖 (图 1-2-4)。

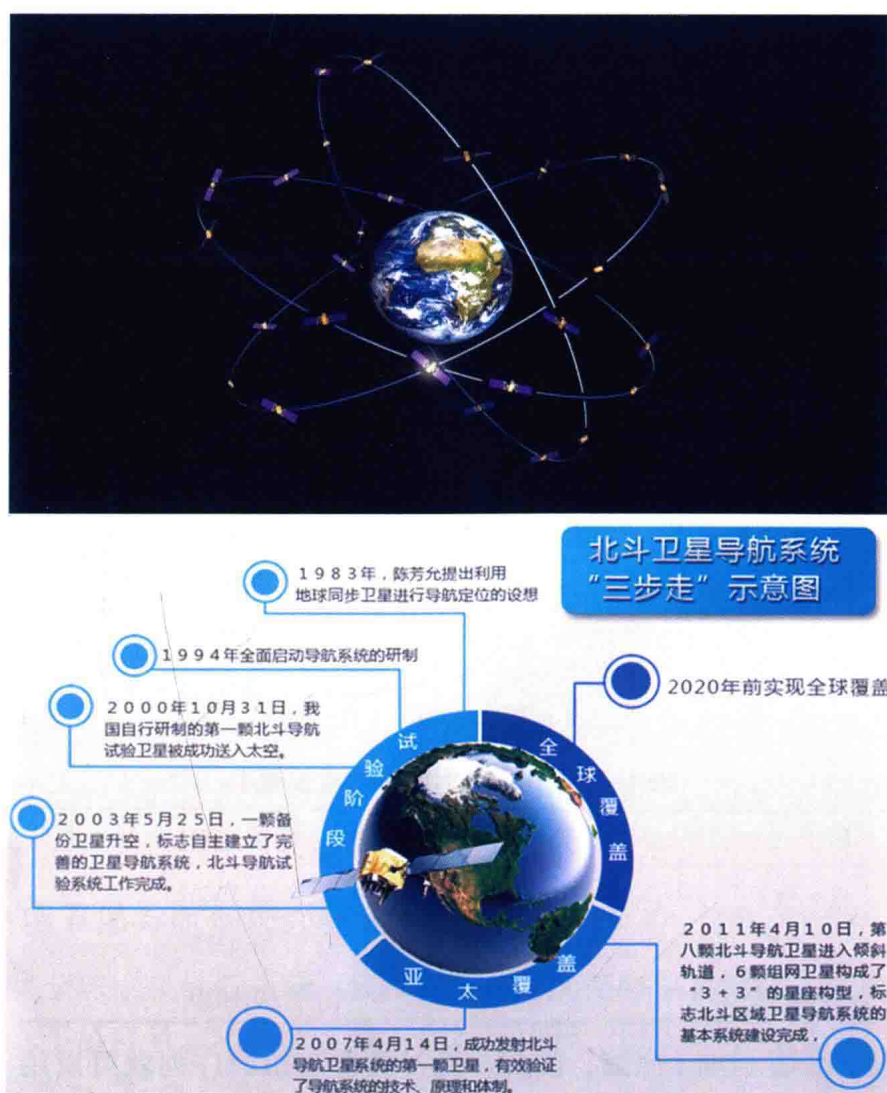


图 1-2-4 北斗卫星导航系统

空间信号段是指卫星发射的无线电信号。导航定位信号一般包括载波、测距码和数据码 3 类信号。GPS 的基本频率 $f_0 = 10.23\text{MHz}$ 。表 1-2-1 中列出了这 3 个载波的频率。

表 1-2-1 GPS 的载波频率

链路	因子 (f_0)	频率 (MHz)	波长 (cm)
L1	154	1575.42	19
L2	120	1227.60	24.4
L5	115	1176.45	25.5

载波上调制了测距码和数据码, GPS 采用码分多址技术 (CDMA), 表 1-2-2 为 GPS 测距信号的信息。

表 1-2-2 GPS 的测距信号

链路	PRN 码	PRN 码长/码片	码率 (兆码片/秒)
L1	C/A	1023	1.023
	P	7 天	10.23
	M	未公开	5.115
	L1C _D	10230	1.023
	L1C _P	10230 × 1800	1.023
L2	P	7 天	10.23
	L2C	M: 10230 L: 767250	1.023 (chip-by-chip 分时)
	M	未公开	5.115
L5	L5I	10230 × 10	10.23
	L5Q	10230 × 20	10.23

GLONASS 通过频分多址技术 (FNMA) 区分不同卫星的信号, 各颗卫星都有特定的载波频率 (表 1-2-3):

$$f_1k = f_1 + \Delta f_1k = 1602.0000 + 0.5625k \text{ (MHz)}$$

$$f_2k = f_2 + \Delta f_2k = 1246.0000 + 0.4375k \text{ (MHz)}$$

$$f_3k = f_3 + \Delta f_3k = 1204.7040 + 0.4230k \text{ (MHz)}$$

表 1-2-3 GLONASS 的载波频率

链路	因子 ($\times f_1$)	频率 (MHz)	增量 (MHz)	波长 (cm)
G1	1	1602.000	0.5625	18.7
G2	7/9	1246.000	0.4375	24.1
G3	94/125	1204.704	0.4230	24.9

GLONASS 系统采用 FDMA 原理, 因此, 通过的伪随机码序列就可以用于所有的卫星 (表 1-2-4)。