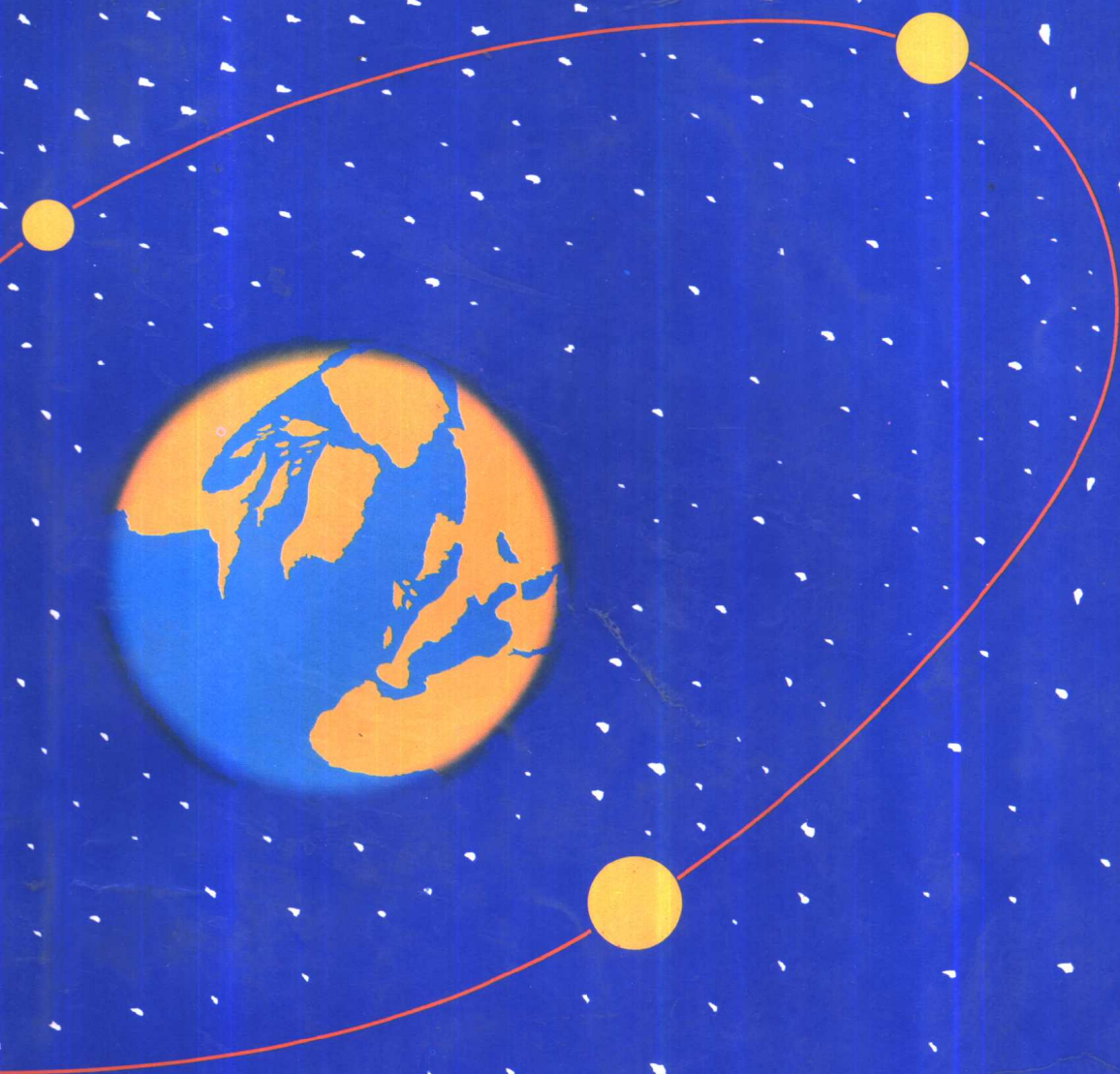


刘大杰 施一民 过静珺 编著



全球 定位系统(GPS) 的原理与数据处理

同济大学出版社

全球定位系统(GPS)的 原理与数据处理

刘大杰 施一民 过静珺 编著

同济大学出版社

内 容 提 要

GPS 卫星定位技术在国民经济和国防现代化建设中正发挥着重要的作用。本书作者结合科研和生产实践,对 GPS 技术从理论角度作了详尽的阐述,主要内容有:概论、卫星大地测量基础、GPS 系统的信号和接收机的基本工作原理、GPS 定位的基本观测量及误差分析、GPS 定位的基本原理和方法、GPS 控制网的建立、GPS 控制网的平差计算和 GPS 精密定位定轨概述等;还介绍了同济大学研制的 TGPPS(4.0)软件系统,供使用者参考。

本书可作高等院校有关专业的教材,也可供在测绘、交通、城建、国土管理、水电、地质、采矿等部门从事 GPS 工作的科技工作者参考。

责任编辑 李炳钊

封面设计 李志云

全球定位系统(GPS)的

原理与数据处理

刘大杰 施一民 过静珺 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

上海中行印刷厂常熟分厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:440千字

1996年8月第1版 1999年6月第3次印刷

印数:3101—6100 定价:19.00元

ISBN 7-5608-1658-4/V·2

前 言

全球定位系统(Global Positioning System)卫星定位技术正日益广泛地应用于测绘、导航、天文、通讯和其他许多领域。从其发展趋势看, GPS 卫星定位技术还将更加深入和普及到我国的经济和国防建设乃至人们的日常生活之中。

GPS 技术的迅速发展, 已经使测绘学科发生了巨大的变革, GPS 卫星定位的基本理论及其在应用中的有关问题, 已逐渐成为测绘学科中至关重要和必不可少的内容, 也成为测绘学科各专业及其它相关学科的本科生、专科生和研究生的必修课程。

自 80 年代初起, 同济大学测量系和清华大学测量教研室就开展了卫星大地测量和 GPS 卫星定位方面的教学、生产和科研工作。为本科生和研究生开设了有关课程, 并为有关生产单位开办了各种培训班; 也曾对多种 GPS 仪器进行过测试, 利用 GPS 定位技术完成了大量的生产任务。为满足生产实践的需要, 还研制了 GPS 控制网平差计算软件、GPS 基线向量计算和快速定位软件、精密定轨定位软件, 为许多生产单位、科研单位所采用。我们还对 GPS 卫星定位的一些理论和实用问题进行了深入的探讨, 取得了一批科研成果。本书是在此基础上考虑作为测绘专业的教材而编写的, 编写中还力求能同时满足研究生、生产单位科技人员的需要, 因此, 不仅注意了加强基础理论, 深入浅出地论述一些基本原理, 而且把生产实践中的有关问题提高到理论上作较详细的阐述, 并将近几年来我们结合生产实际的一些研究成果补充到有关章节中。

全书共分八章, 第一章概要地叙述 GPS 卫星定位技术的发展及其应用特点; 第二章是卫星大地测量的基础知识, 除介绍所采用的坐标系统和时间系统上, 着重论述 GPS 卫星运动的基本原理; 第三章至第五章介绍 GPS 卫星的信号和定位的基本原理和方法, 着重叙述静态定位的观测值以及 GPS 基线向量计算的数据处理方法; 第六章和第七章叙述 GPS 控制网建立的技术设计及外业和内业计算工作, 以及数据处理中的有关问题; 第八章则简要地介绍了精密定轨定位的基本原理和做法。

参加本书编写工作的有同济大学的刘大杰教授、施一民教授和清华大学的过静珺教授, 同济大学金国雄教授和清华大学季如进副教授参加了部分编写工作。具体分工如下: 第一章由金国雄教授编写, 第二、五、八章由施一民教授编写, 第三、四章由过静珺教授编写, 第六章由季如进副教授和刘大杰教授编写; 第七章由刘大杰教授编写。需要说明的是, 本书是在我们的老师金国雄教授的热情关怀和指导下写成的, 从取材到结构安排, 他都提出了许多宝贵意见, 在此谨向他表示衷心的感谢。

由于作者水平有限, 谬误及不当之处在所难免, 尤其是作为新兴的科学技术, GPS 技术还在迅速地发展, 作者虽力求取材新颖, 以适应今后的发展趋势和各方面的应用需要, 但也未必尽如人意, 深切希望国内专家、学者及广大读者不吝赐教。

作者 1995 年 12 月

目 录

第一章 概论	(1)
§ 1.1 GPS 卫星定位技术的发展	(1)
§ 1.2 GPS 定位系统的组成	(2)
§ 1.3 GPS 定位系统的应用特点	(5)
第二章 卫星大地测量基础	(8)
§ 2.1 卫星大地测量中的坐标系	(8)
2.1.1 天球坐标系	(8)
2.1.2 地球坐标系	(12)
2.1.3 协议地球坐标系的实现和 WGS-84	(15)
§ 2.2 卫星大地测量中的时间系统	(19)
§ 2.3 GPS 卫星在地球质心的中心引力下的运动	(21)
2.3.1 二体问题下卫星运动的二阶微分方程	(21)
2.3.2 面积积分	(22)
2.3.3 轨道积分及轨道方程	(25)
2.3.4 开普勒积分及开普勒方程	(27)
2.3.5 能量积分与活力积分	(30)
2.3.6 二体问题的卫星位置及速度计算	(31)
§ 2.4 二体问题和多体问题	(34)
§ 2.5 卫星的受摄运动	(36)
2.5.1 受摄卫星状态方程的两种表达形式	(36)
2.5.2 有摄二体问题的理论和应用	(38)
2.5.3 用近似分析解探索卫星运动轨道的变化	(48)
第三章 GPS 定位系统的信号和接收机的基本工作原理	(53)
§ 3.1 GPS 卫星播发的信号	(53)
3.1.1 伪随机码	(53)
3.1.2 C/A 码和 P 码	(58)
3.1.3 GPS 卫星信号的构成	(61)
§ 3.2 GPS 卫星的导航电文	(63)
§ 3.3 GPS 卫星位置的计算	(66)
§ 3.4 GPS 接收机及其基本工作原理	(69)
第四章 GPS 定位的基本观测量及误差分析	(78)

§ 4.1	GPS 定位的基本观测量	(78)
§ 4.2	GPS 测量的误差来源和影响	(83)
4.2.1	与卫星有关的误差	(84)
4.2.2	信号传播误差	(86)
4.2.3	观测误差和仪器误差	(93)
§ 4.3	美国对 GPS 采用的 SA 技术和 AS 技术	(94)
✓ 第五章	GPS 定位的基本原理和方法	(97)
§ 5.1	测距码伪距单点定位	(97)
§ 5.2	载波相位测量的基本概念及基本观测方程	(102)
5.2.1	瞬时载波相位差及其观测值	(102)
5.2.2	初始历元的整周待定值	(103)
5.2.3	载波信号传播时间的化算	(105)
5.2.4	瞬时载波相位差的计算值	(106)
§ 5.3	差分观测值及其观测方程	(108)
5.3.1	相位差分观测值的分类	(109)
5.3.2	双差观测方程的组成	(116)
5.3.3	相位差分观测值的随机模型	(122)
5.3.4	GPS 基线向量的解算	(125)
§ 5.4	周跳的探测及修正	(128)
§ 5.5	整周模糊度的快速逼近与快速静态定位	(131)
§ 5.6	GPS 动态定位	(136)
第六章	GPS 控制网的建立	(144)
§ 6.1	概述	(144)
§ 6.2	GPS 控制网的技术设计	(145)
6.2.1	GPS 控制网技术设计的一般原则	(145)
6.2.2	GPS 控制网的图形设计	(148)
6.2.3	GPS 控制网技术设计示例——S 市 GPS 控制网技术设计书	(153)
§ 6.3	GPS 接收机的检定	(156)
§ 6.4	GPS 测量的外业工作	(158)
6.4.1	GPS 相对定位的作业模式	(158)
6.4.2	GPS 卫星预报和观测调度计划	(159)
6.4.3	GPS 外业观测工作	(161)
6.4.4	归心元素的测定和归心计算	(163)
§ 6.5	GPS 基线向量计算软件 TJGPS 简介	(166)
§ 6.6	GPS 观测成果的检查和技术总结	(170)
第七章	GPS 控制网的平差计算	(172)
§ 7.1	概述	(172)

§ 7.2 参心坐标系.....	(173)
7.2.1 参心坐标系的建立	(173)
7.2.2 高斯投影和 UTM 投影平面直角坐标系	(176)
7.2.3 我国的国家坐标系	(180)
§ 7.3 不同坐标系统的坐标转换模型.....	(183)
7.3.1 几种基本的坐标转换模型	(183)
7.3.2 坐标差的转换模型	(187)
7.3.3 转换参数的计算	(189)
§ 7.4 GPS 网的三维平差	(192)
7.4.1 GPS 网在 WGS-84 坐标系中的三维平差	(192)
7.4.2 GPS 网在国家坐标系中的三维平差.....	(197)
7.5 地方独立坐标系中的坐标转换和 GPS 网三维平差	(203)
7.5.1 地方独立坐标系的建立	(203)
7.5.2 E_1 椭球下的坐标变换和 GPS 网三维平差	(205)
7.5.3 E_2 椭球下的坐标变换和 GPS 网三维平差	(208)
§ 7.6 GPS 控制网的精度分析	(211)
7.6.1 GPS 网三维平差中的精度计算.....	(211)
7.6.2 GPS 基线向量观测值的精度分析.....	(215)
7.6.3 GPS 网中地面起算点坐标的精度分析.....	(218)
§ 7.7 GPS 网的二维平差	(220)
§ 7.8 GPS 点的高程计算	(224)
§ 7.9 GPS 网平差计算软件系统 TGPPS 简介.....	(229)
第八章 GPS 精密定位定轨概述.....	(241)
§ 8.1 精密定位定轨原理和基本方程.....	(241)
§ 8.2 卫星运动的力模型及加速度对状态向量的偏导数.....	(245)
§ 8.3 用数值积分解求卫星运动状态方程.....	(257)
8.3.1 常用的单步法——龙格-库塔解法	(258)
8.3.2 常用的线性多步法——阿达姆斯解法	(260)
8.3.3 阿达姆斯预估-校正法(PECE 算法).....	(263)
§ 8.4 统计定轨理论在卫星定轨中的应用.....	(263)
参考书目	(267)

第一章 概 论

§ 1.1 GPS 卫星定位技术的发展

1967年7月29日,美国政府宣布海军导航卫星系统(NNSS)、亦称子午卫星(TRANSIT)系统的部分导航电文解密,供民间应用。这种由测站上接收机直接对空间卫星进行多普勒测量的定位技术遂迅速兴起,应用于导航和大地定位。实践证明,卫星多普勒定位技术,不受天气的限制,只要能接收到子午卫星信号,便可藉助已知的卫星轨道信号,进行单点定位或双点联测定位,即可确定测站的三维地心坐标或两点的坐标差。因此,这项新技术迅速地从美国传播到北美欧亚诸国,得到了广泛的应用。80年代初,我国也引进了一些多普勒接收机应用于导航和大地测量中。

子午卫星导航系统虽为导航和定位技术起了一定的革新作用,但仍然存在一些明显的缺陷:

1. 卫星数少,每隔1~2h才有卫星一次通过而进行跟踪观测,不能进行实时连续定位;
2. 子午卫星系统的定位精度仍嫌不高。

美国国防部于1973年批准建立新一代卫星导航系统——导航卫星定时测距全球定位系统(Navigation Timing and Ranging Global Positioning System),简称全球系统,它是一种可以定时和测距的空间交会定点的导航系统;可向全球用户提供连续、实时、高精度的三维位置、三维速度和时间信息,为陆、海、空三军提供精密导航,还可用于情报收集、核爆监测、应急通讯和卫星定位等一些军事目的。GPS整个发展计划分三个阶段实施;即原理可行性验证阶段;系统的研制与试验阶段;最后的工程发展与完成阶段、至1994年,7颗GPS试验卫星(目前2颗仍在工作和分布在六根轨道上的24颗(3颗备用)工作卫星已全部升空并正常工作。整个计划耗资巨大(100亿美元以上),这是继阿波罗计划、航天飞机计划之后的又一庞大的空间计划。

从覆盖范围、信号可靠性、数据内容、准确度以及多用性这五项指标来看,GPS定位系统都远比先前的子午卫星导航系统优越,它不仅能满足精密导航等一系列军事目的,还能对卫星信号进行载波相位测量,达到精密相对定位。因此,GPS定位系统为民用导航、测速、时间比对和大地测量、工程勘测、地壳监测等众多领域,展现了极其广阔的应用前景。它的问世已导致测绘行业的一场深刻的技术革命。

目前,美国着手设计与试验新的第二代工作卫星改进系统(BLOCK II R),于90年代后发射,计划发20颗,新系统的定位精度可达1mm。前苏联自1978年10月开始,发射自己的全球导航卫星系统(GLONASS)试验卫星,计划在90年代中期建成GLOANSS工作星座,星座由21颗工作卫星和3颗在轨备用卫星组成,均匀分布在三个轨道平面上。欧洲空间局(ESA)正在筹建民用导航卫星系统,包括在赤道平面上的6颗同步卫星(GEO)和12颗高椭圆轨道(HEO)卫星的混合卫星星座。我国也正在筹建双星定位系统,由2颗同步卫星确定平面位置的导航系统。

随着 GPS 卫星星座的不断改善与发展, 地面接收机会更加小型化、精密化与自动化, 必将在各个领域中获得广泛应用。

§ 1.2 GPS 定位系统的组成

GPS 定位系统由三部分组成, 即由 GPS 卫星组成的空间部分、由若干地面站组成的控制部分和以接收机为主体的广大用户部分。三者有各自独立的功能和作用, 但又是有机地配合而缺一不可的整体系统。

图 1-1 显示了 GPS 定位系统的三个组成部分及其配合情况

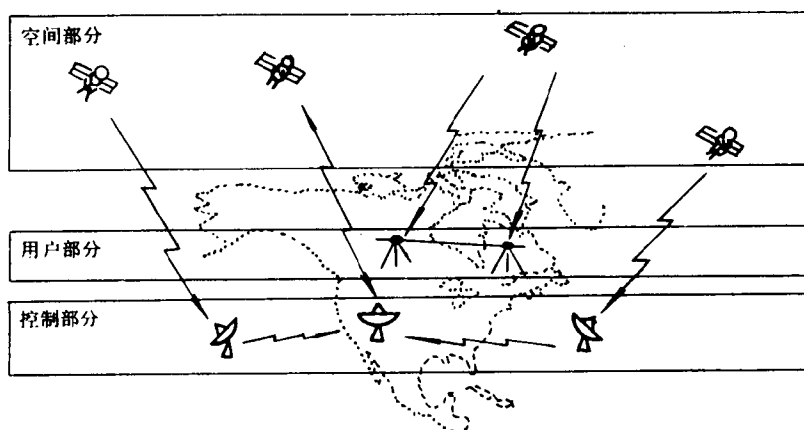


图 1-1 GPS 的空间、控制 and 用户部分

一、空间部分

空间部分由 GPS 卫星组成。覆盖全球上空的 GPS 卫星星座, 必须保证在各处能时时观测到高度角 15° 以上的 4 颗卫星。

目前, GPS 工作卫星星座(BLOCK II)共有 24(21+3)颗卫星, 均匀分布在倾角为 55° 的 6 个轨道上, 即各轨道升交点(与赤道交点)之间的角距为 60° , 每轨均匀分布 4 颗卫星, 相邻轨道之间的卫星还要彼此叉开 40° , 以保证全球均匀覆盖的要求, 分布情况如图 1-2 所示。至 1995 年, 仍有几颗试验卫星在正常工作。3 颗在轨的备用工作卫星随时可替代发生故障的其他卫星。

GPS 工作卫星重达 1500kg, 设计寿命 7.5 年, 星上装备了无线收发两用机、铯原子钟(稳定度为 $10^{-13} \sim 10^{-14}$)、计算机、两块 7m^2 的太阳能翼板以及其他装备。每颗卫星以两个 L 波段频率发射载波无线电信号:

$$L_1 = 1575.42\text{MHz}(\text{波长约 } 19\text{cm})$$

$$L_2 = 1227.60\text{MHz}(\text{波长约 } 24\text{cm})$$

在 L_1 载波上测距用 P 码(精码, 码长约 30m)和 C/A 码(粗搜索码, 码长约 300m)。C/A 码供民用的标准定位服务(SPS), P 码只供美国军方和授权用户使用。此外, 在载波上还调制了每秒 50(bit)的数据导航电文, 内容包括: 卫星星历、电离层模型系数、状态信息、时间信息和星钟偏差以及漂移信息等。

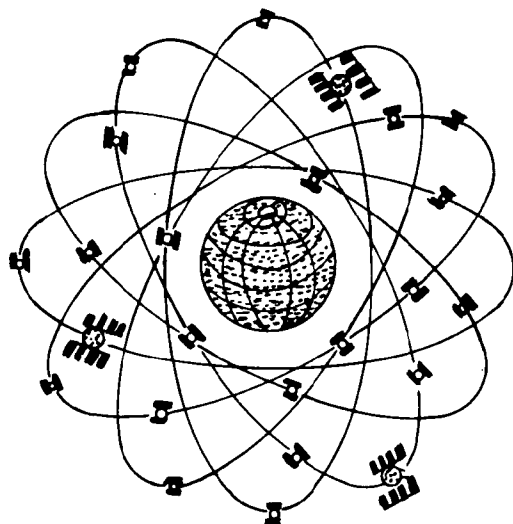


图 1-2 GPS 卫星星座

GPS 卫星采取多种编号识别系统，通常采用的编号是 PRN 数(伪随机噪声数)，由各卫星的导航电文获知。GPS 工作卫星离地高度 20 200km，运行周期为 12 个恒星时，因此，完整的工作卫星星座保证在全球各处可以随时观测到 4~8 颗高度角在 15° 以上的卫星，若要求高度角仅在 10° 和 5° 以上时，则分别可观测到 4~10 和 4~12 颗卫星。

目前，美国采取两种限制性政策：SA(选择可用性)政策，有意使频率漂移和降低轨道精度，使 C/A 码原有的定位精度从 20~40m 降低到 100m；AS(反欺骗)政策，为防止 P 码被窃取，将 P 码改为 Y 码，使非授权用户无法解态 P 码。

二、控制部分

控制部分负责监控全球定位系统的工作，包括主控站、监控站和注入站，它们的作用分述如下：

主控站——卫星操控中心(CSOC) 位于科罗拉多斯普林斯附近的佛肯(Falcon)空军基地，其任务是收集各监控站送来的跟踪数据，计算卫星轨道和钟差参数并发送至各注入站，转发至各卫星。主控站本身还是监控站，另外可诊断卫星的工作状态，进行调度。

监控站——共有 5 个，除主控站上外，还在夏威夷和北太平洋上的 Kwajalein 岛、印度洋的 Diogo Garcia 岛、大西洋的 Ascension 岛上设立监控站，装备有 P 码接收机和精密铯钟，对所接收到的卫星进行连续的 P 码伪距跟踪测量，并将每隔 1.5s 的观测结果，借助电离层和气象数据，采取平滑方法，获得每 15min 的结果数据，传送到主控站。

注入站 共有 3 个，与三大洋的 Kwajalein 岛、Diogo Garcia 岛和 Ascension 岛上的监控站并置，其主要功能是将主控站发送来的卫星星历和钟差信息，每天一次地注入到卫星上的存贮器中。即使注入站因故障无法注入新的数据，存贮器具备长达 14d 的预报能力，此时，定位精度从 10m 左右逐渐递减直至约 200m。

图 1-3 中，5 个监控站的分布位置以黑圆点标志。由此 5 站构成的跟踪观测网确定广播

星历和钟差模型，由卫星广播电文供全球用户使用，在目前 SA 政策条件下，定位精度为 100m。美国国防制图局加设若干监测跟踪站，图 1-3 中以黑小正块标志，用以确定精密星历，定位精度为 16m，供军方和授权用户使用。多年来，一些厂商和国际合作组织建立卫星跟踪网，如协调国际 GPS 跟踪网(CIGNET)，测定卫星精密星历，供有关用户使用。我国亦计划建立局部卫星跟踪网，测定卫星精密星历。

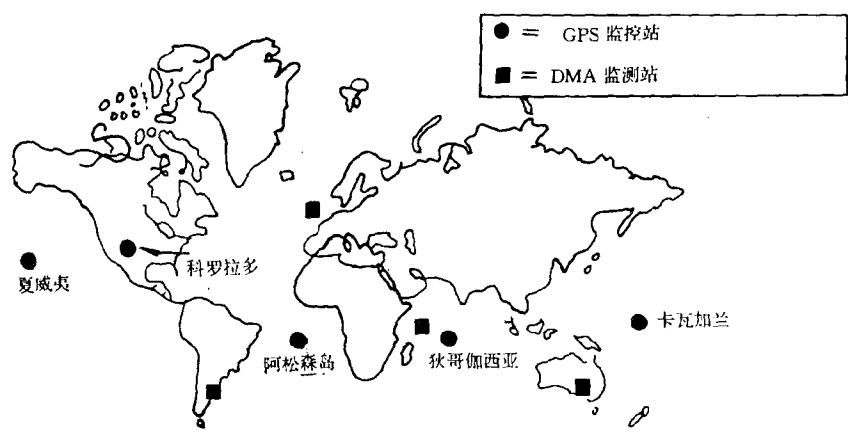


图 1-3 GPS 卫星的地面监控系统

三、用户部分

GPS 主要为美国军方服务，军方用户——导航型接收机可为飞机、舰艇和战车以及野外人员的定位。近年来，厂商提供了阵列天线的接收机(如呈方形四角阵列天线)，不仅提供正确位置，还能确定运动载体的 3 个姿态角。星载接收机，可以为低空侦察卫星定位，法国的 SPOT 卫星也得益于星载接收机来确定遥感影像图片的精密位置。

10 多年来，导航型接收机已广泛应用于交通等领域，更为突出的是相位接收机的问世，这种接收机用于精密相对定位，至今已开始取代常规的控制测量，这里，我们重点介绍相位接收机的基本构造及几种主要接收机的技术参数。

GPS 接收机的基本结构如图 1-4 所示。

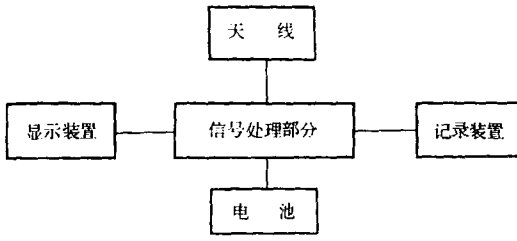


图 1-4 GPS 接收机基本结构

- 1. 天线 要求灵敏度高和抗干扰性强，前置放大器，一般与天线结合在一起。
- 2. 信号处理 是 GPS 接收机的核心部件，那里要进行中频放大、滤波和信号处理，由跟踪环路重建载波；解码得广播电文，并获得伪距定位结果；

3. 控制显示 控制作业, 有各种显示屏供观测与检查用;
4. 记录装置 主要有接收机的内存硬盘或记录磁卡;
5. 电源 外接或内接电池(12V), 机内还有一个锂电池。

大地型接收机 主要有(2)+(3)组合式。(如 Ashtech M.R 接收机)和(1)+(2)组合式(如 W200 接收机)。

接收机接收到的卫星信号是在载波上调制有 C/A 和 P 两种伪随机码和每秒 50 比特的导航电文, 解码原理主要有以下两种:

1. 调制码相关 已知 C/A 码和 P 码, 可由码跟踪环路获得伪距和广播电文, 又由载波跟踪环路获得载波相位测量值。

2. 平方型通道 不必知道 C/A 码和 P 码的结构, 可利用信号自乘, 获得载波相位测量值, 但无法获得伪距和导航电文, 只能从其他途径获得, 这种原理的接收机称为无码接收机。

GPS 接收机的基本类型分导航型和大地型。大地型接收机的类型分单频(L_1)型和双频(L_1, L_2)型。而双频型接收机又有 C/A 码相关和 C/A 码、P 码相关两种, 前者, L_2 载波相位测量用平方型原理, 因此无法求 P 码伪距, 而后者则可以。现今公开出售的双频接收机都是前一种类型。只有像美国 TI-4100 接收机是属于后一种类型, 但不公开出售。

几种主要 GPS 大地型接收机的技术参数列于表 1-1 中

几种主要 GPS 大地型接收机的技术参数

表 1-1

型号	观测值	利用的载波和调整码	精度	重量和体积	备 注
TI4100	伪距 载波相位	L_1, L_2 C/A 码, P 码	15m(实时) 1ppm(测 3 小时)	接收机 16kg 天线 2kg	
Mini-Mac 2816	伪距 载波相位	L_1, L_2 C/A 码	1mm+1ppm	接收机 20kg	8 通道
Trimble~ 4000SL	伪距 载波相位	L_1, L_2 C/A 码			
Ashtech M12	伪距 载波相位	L_1, L_2 C/A 码	5mm+1ppm		最新抗 AS, Z 跟踪 12 通道
W200	伪距 载波相位	L_1, L_2 C/A 码	5mm+1ppm	接收机 2.2kg	配快速定位软件
Gss1A	伪距 载波相位	L_1 C/A 码	5mm+2ppm	接收机 1.9kg 电池 0.5kg	8 通道

§ 1.3 GPS 定位系统的应用特点

从 80 年代起, 随着 GPS 实验卫星和工作卫星先后不断升空, 经过各国科学家的刻意开发研究以及各厂家的竞相研制, 在 10 年左右的时间内, GPS 硬件——导航型和大地型接收机及各类配件日趋完善, 各种不同的应用软件精益求精, 使 GPS 定位技术在导航、测绘等领域迅速获得推广应用。综观 10 多年来年的 GPS 应用实践, GPS 定位技术的应用特点可归

纳为以下几点:

一、用途广泛

用 GPS 信号可以进行海空导航、车辆引行、导弹制导、精密定位、动态观测、设备安装、传递时间、速度测量等。GPS 定位技术应用于民用导航和测绘行业,可归纳如表 1-2 所示。

GPS 定位技术应用一览表

表 1-2

1. 陆地导航 2. 海上导航 3. 航空导航 4. 空间导航 5. 港湾导航 6. 内河导航 7. 旅游车导航 8. 地面高精度测量 9. 机器人和其他机器引导	全球性 ↓ GPS ↑ 全天候 (24h)	1. 地籍测量 2. 大地网加密 3. 高精度飞机定位 4. 无地面控制的摄影测量 5. 变形监测 6. 海道、水文测量 7. GPS 全站仪测量和主动控制站 8. 全球或区域性高精度三维网
---	--	---

二、自动化程度高

GPS 定位技术减少了野外作业的时间和强度。用 GPS 接收机进行测量时,只要将天线准确地安置在测站上,主机可安放在测站不远处,亦可放在室内,通过专用通讯线与天线连接,接通电源,启动接收机,仪器即自动开始工作。结束测量时,仅需关闭电源,取下接收机,便完成了野外数据采集任务。如果在一个测站上需作较长时间的连续观测,目前有的接收机(如 Ashtech Z12 型)可贮存连续三天的观测数据;还可以实行无人值守的数据采集,通过数据通讯方式,将所采集的 GPS 定位数据传递到数据处理中心,实现全自动化的 GPS 测量与计算。

三、观测速度快

目前, (21+3)颗 GPS 工作卫星已全部发射升空,加上先前发射的试验卫星中仍有 2 颗继续正常工作,一测站上可以同时观测高达 5~8 颗。因此,用 GPS 接收机作静态相对定位(边长小于 15km)时,采集数据的时间可缩短到 1h 左右,即可获得基线向量,精度为 $\pm (5\text{mm}+1\text{ppm})D$,两台仪器每天正常作业可测 4 条边。如果采用快速定位软件,对于双频接收机,仅需采集 5min 左右的时间;对于单频接收机,只要能观测到 5 颗卫星,也仅需采集 15min 左右的时间,便可达到上述同样的精度,作业进度更快。同济大学测量系用两台 Wild200 型接收机建立 GPS 控制网,仅花 4 个工作日就测完了全网的 27 个点。可见,用 GPS 定位技术建立控制网,作业迅速,比常规手段(包括造标)快 2~5 倍。

四、定位精度高

大量试验表明, GPS 卫星相对定位测量精度高,定位计算的内符合与外符合精度均符合 $(5\text{mm}+1\text{ppm})D$ 的标称精度,二维平面位置都相当好,仅高差方面稍逊一些。用 GPS 相对定位结果,还可以推算出两测站的间距和方位角,精度也很好。据国内外 10 多年来的众多试验和研究表明: GPS 相对定位,若方法合适、软件精良,则短距离(15km 以内)精度可

达厘米级或以下，中、长距离(几十公里至几千公里)相对精度可达到 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 。其精度是惊人的。

五、经济效益高

据某些国外大地测量实测资料表明，用 GPS 定位技术建立大地控制网，要比常规大地测量技术节省 70%~80% 的外业费用，这主要是因为 GPS 卫星定位不要求站间通视，不必建立大量费时、费力、费钱的觐标。一旦 GPS 接收机价格不断下降，经济效益将愈益显著。

更由于 GPS 定位技术具有速度快的特点(比常规方法快 2~5 倍)，使工期大大缩短，由此产生的间接经济效益更是不可估量。

GPS 定位技术在其他方面(如海湾战争)的诸多应用，其经济效益也是不言而喻的。

综上所述，GPS 定位技术较常规手段有明显的优势，而且它是一种被动系统，可为无限多个用户使用，信用度和抗干扰强，将来必然会基本上取代常规测量手段。GPS 定位技术与另两种精密空间定位技术——卫星激光测距(SLR)和甚长基线干涉(VLBI)测量系统相比，据近几年来全球网测量结果比较表明，其精度已能与 SLR，VLBI 相媲美，但 GPS 接收机轻巧方便、价格较低、时空密集度高，同样显示出 GPS 定位技术较之 SLR，VLBI 具有更优越的条件和更广泛的应用前途。

第二章 卫星大地测量基础

§ 2.1 卫星大地测量中的坐标系

和传统大地测量观测技术不同,在卫星大地测量中,观测站虽是固定在地球表面上,其空间位置随同地球自转而运动,但观测目标却是主要受地球引力作用而绕地球旋转的人造地球卫星,它与地球自转无关。因此,为了统一描述卫星在其轨道上的运动,按不同需要表示测站的空间位置,并正确处理关联着地面测站及卫星的观测数据,需要采用两类坐标系,并需实现各种坐标系之间的转换。

人造卫星工作常采用空间直角坐标系。任一点的空间位置可由该点在三个坐标面上的投影唯一地确定。通过坐标平移、旋转和尺度转换,可以将一点的位置向量方便地转换为另一坐标系中的位置向量。与某一空间直角坐标系所相应的大地坐标系,只是坐标表示形式有所不同,实质上是完全等价的;两者之间可互相转化。

我们知道,从几何上看坐标系是由原点位置、三个坐标轴的指向和尺度所定义的。在卫星大地测量中,一般取地球质心为坐标系的原点。由于人造地球卫星围绕地球运动,引进地心坐标系是十分自然的,这样,便于研究人造卫星运动的规律。根据坐标轴指向的不同,可划分为两大类坐标系,天球坐标系和地球坐标系。地球坐标系随同地球自转,可看作为固定在地球上的坐标系,便于表述地面观测站的空间位置;天球坐标系则与地球自转无关,便于描述人造地球卫星的位置和状态。

应该指出,无论是天球坐标系还是地球坐标系,在不同观测瞬间,其坐标轴指向相应地也不相同。由于坐标系与时间的相依性,每类坐标系又可划分为若干种不同定义的坐标系。

2.1.1 天球坐标系

一、岁差和章动

所谓天球,指的是以地球质心为球心,以无限大长度为半径的一个假想球体。地球自转轴的延长线与天球的两个交点称为天极,分为北天极和南天极。通过地球质心与天轴垂直的平面称为天球赤道面。地球公转的轨道面与天球相交的大圆称为黄道,黄道与天球赤道有两个交点,其中,太阳的视位置由南到北的交点称为春分点。

由赤道面和黄道面可分别定义赤道坐标系和黄道坐标系,它们均可作为天球坐标系。人造卫星工作中所采用的天球坐标系是由天球赤道面作为基准面的,因此,在有些文献中,常称之为赤道坐标系。

笼统地说,以地心为坐标原点的天球坐标系, Z 轴的正向指向北天极, X 轴的正向指向春分点,并构成右手坐标系,以确定 Y 轴的正向。

然而,地球自转轴在空间的方向并非固定不变,春分点在天球上的位置也是随时间而变化的。由于日、月对地球非球形部分的摄动,使地球自转轴在空间不断摆动,它可分解为两

种运动：日月岁差和章动。日月岁差指的是由此引起的地球自转轴绕黄道的垂直轴旋转的一种长期运动(周期约 25 800 年)，即在天球上北天极绕北黄极向西移动，构成一个以黄赤交角 ($23^{\circ}.5$) 为半径的小圆，从而也使春分点在黄道上缓慢地西移。在任一瞬间，按这种方式运动的北天极称为瞬时平北天极。春分点除因地球自转轴方向变动而引起的变化外，还因黄道的缓慢变动(行星引力对地球绕日运动轨道的摄动)而变化，后者称为行星岁差。赤道与黄道由于日月岁差和行星岁差引起的缓慢运动称为总岁差。既然平北天极就是由于岁差而绕北黄极向西作均匀圆周运动的北天极，从这个意义上说，岁差可看作平天极本身的运动。与瞬时平北天极相应的天球赤道和春分点称为瞬时平天球和瞬时平春分点。

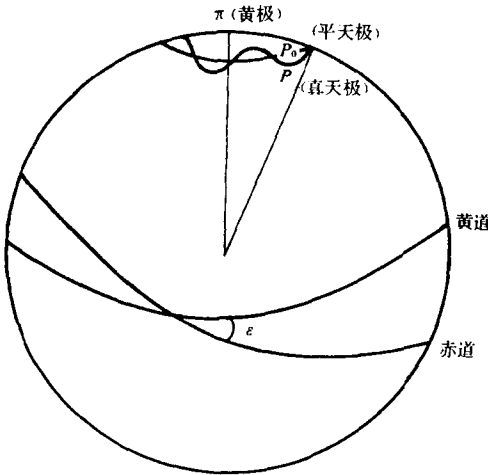


图 2-1 日月岁差和章动

北天极除了这种有规律的长期运动外，由于日月引力等因素的影响，还会有短周期的变化，周期约为 18.6 年，称为章动。当分解出平北天极绕北黄极的运动(岁差)后，章动则成为真北天极绕平北天极顺时针的转动，其轨迹大致成椭圆形，周期约为 18.6 年。

各瞬间的真北天极在天球上的位置各不相同，与瞬时真北天极相应的春分点和天球赤道称为瞬时真春分点和瞬时真赤道。

二、三种天球(赤道)坐标系

由瞬时真天极及瞬时真赤道面、瞬时真春分点所定义的地心坐标系称为瞬时真天球坐标系。不同的观测历元相应于不同的瞬时真天球坐标系。由于岁差、章动的影响，瞬时真天球坐标系的坐标轴指向随时间不断地变化。这种不断旋转的坐标系显然并不是惯性系统，不能直接采用牛顿第二定律来研究卫星的运动。因此，需要建立一个三轴指向保持不变的天球坐标系，使它接近于惯性坐标系。为此可选择某一确定时刻为标准历元 t_0 ，任一观测历元 t 的瞬时真天球坐标系经过从该瞬间到标准历元的章动、岁差改正可归算到标准历元的平天球坐标系。所谓瞬时平天球坐标系就是以瞬时平天极、瞬时平赤道、瞬时平春分点所定义的一种地心坐标系。每一观测历元均有其相应的瞬时平天球坐标系。而标准历元平天球坐标系只是其中相应于标准历元的一种特定的天球坐标系。标准历元的选取常由国际上协议确定，可称为协议惯性系(协议天球坐标系)。国际大地测量协会和国际天文学联合会决议，从 1984 年 1

月 1 日后启用的协议天球坐标系—采用的标准历元为 2000 年 1 月 1.5 日 TDB(质心动力学时), 首记为 J2000.0, 即儒勒日 JD2451545.0。每年的岁首是标准历元 ± 儒勒年(365.25 儒勒日)的整倍数并从标准历元 J2000.0 起算。每儒勒世纪的总岁差为 5 029″.099 6, 章动量为 9″204 4。

三种天球坐标系的定义和空间点位置向量的符号见表 2-1。

三种天球坐标系的定义 表 2-1

天球坐标系	原点	Z 轴正向	X 轴指向	空间点位置向量
标准历元平天球坐标系	地心	标准历元平天极	标准历元平春分点	$\vec{r}_s$
瞬时平赤道天球坐标系	地心	瞬时平天极	瞬时平春分点	$\vec{r}_M$
瞬时真赤道天球坐标系	地心	瞬时真天极	瞬时真春分点	$\vec{r}_T$

三、三种天球坐标系间的转换

由于坐标系的原点相同, 可以通过几次旋转变换实现标准历元平天球坐标系与瞬时真天球坐标系间的坐标变换。对于固定某一坐标轴的旋转矩阵可分别写为

$$\begin{aligned} R_x(\alpha) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \\ R_y(\beta) &= \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \\ R_z(\gamma) &= \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2-1-1}$$

对于右手坐标系的空间直角坐标系, 由(2-1-1)式规定, 从旋转轴的正向来看, 逆时针的旋转角为正, 顺时针的旋转角为负。

先考虑标准历元平天球坐标系与瞬时平赤道坐标系间的转换。

这两种坐标系之间的差别在于从标准历元到观测瞬间的岁差的影响。由地心惯性系转换到瞬时平赤道坐标系的岁差距阵为

$$PR = R_z(-z_A)R_y(\theta_A)R_z(-\zeta_A) \tag{2-1-2}$$

式中, z_A , θ_A , ζ_A 为岁差三分量, 由图 2-2 可看出其几何关系, 图中, P_0 , γ_0 及 P_1 , γ_1 分别为地心惯性系及瞬时平天球坐标系中的平北天极和平春分点。

θ_A 为赤纬岁差, 乃是瞬时平赤道对于标准历元平赤道的倾角, 角距为 P_0P_1 。 ζ_A 为赤经岁差部分, 沿标准历元的平赤道计算, 以球面角 $\gamma_0P_0P_1$ 表示。 z_A 为赤经岁差部分, 沿瞬时平赤道计算, 以球面角 $qP_1\gamma_1$ 表示之。

按下式可求出三个岁差角:

$$\begin{aligned} \zeta_A &= 2\,306''.218\,1T + 0''.301\,88T^2 + 0''.017\,998T^3 \\ \theta_A &= 2\,004''.310\,9T - 0''.426\,65T^2 + 0''.041\,833T^3 \end{aligned}$$