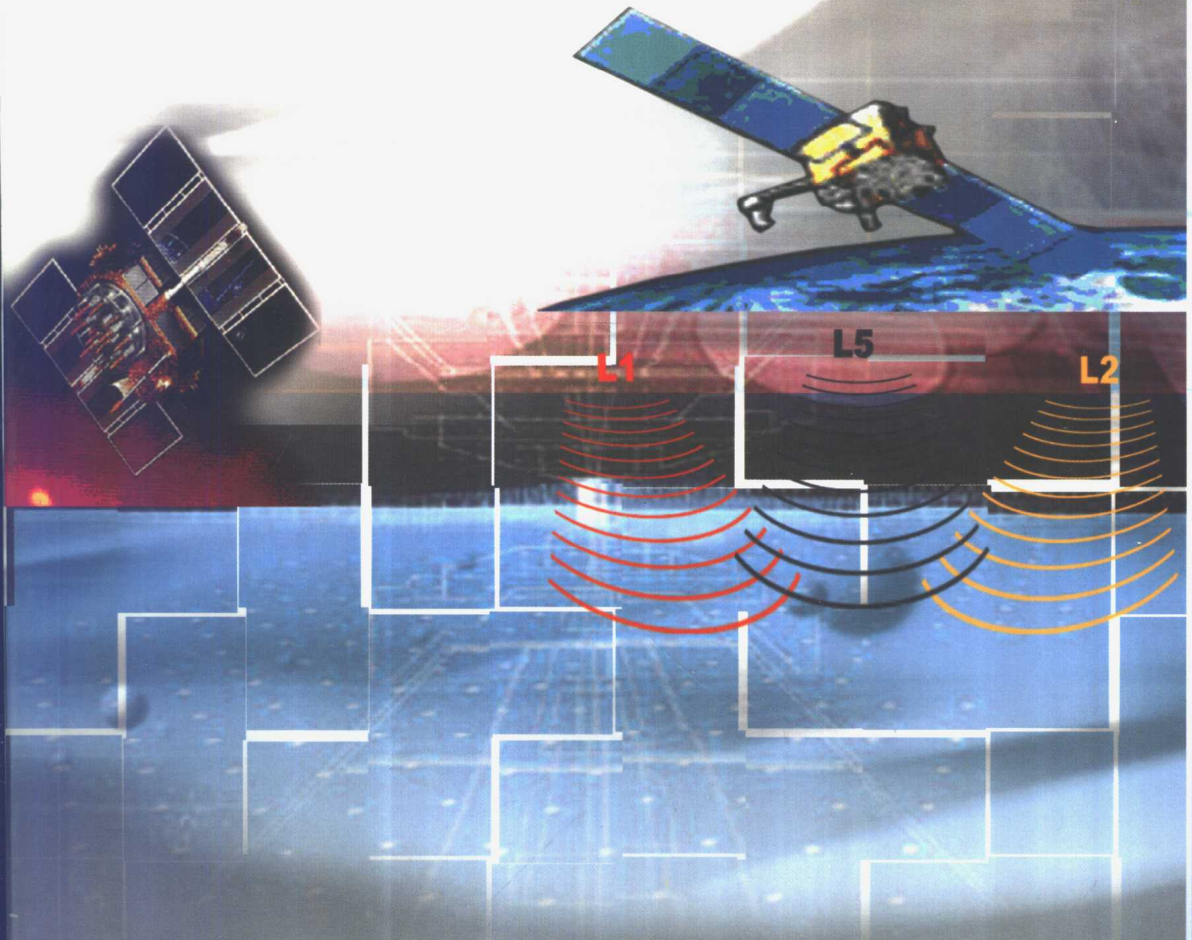


21世纪高等院校教材·地理信息系统教学丛书



# GPS 卫星导航定位 原理与方法

◎ 刘基余 / 编著



科学出版社  
www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材·地理信息系统教学丛书

# GPS 卫星导航定位 原理与方法

刘基余 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是我国第一本 GPS 教科书《全球定位系统原理及其应用》(刘基余主编,北京测绘出版社于 1993 年 10 月第一次出版发行)的发展和改写。它全面系统地论述了 GPS 卫星导航定位技术,深入浅出地阐述了 GPS 卫星导航定位的实用理论及其工程应用,简明扼要地介绍了 GLONASS 系统、GALILEO 系统、EGNOS 系统、WAAS 系统、GDGPS 系统、GPS 航天飞机测图系统和地球同步卫星导航定位系统的特点与应用,对卫星激光测距在 GPS 导航定位中的作用与影响也做了综述。

本书可以作为航空、航天、海洋、交通、地质、航道、石油、水利、农业、信息和测绘等行业初学者的教科书,研究生的参考书,工程师的工具书。

### 图书在版编目(CIP)数据

GPS 卫星导航定位原理与方法/刘基余编著. —北京:科学出版社,2003  
(21 世纪高等院校教材·地理信息系统教学丛书)  
ISBN 7-03-011448-5

I .G… II .刘… III .全球定位系统(GPS)-高等学校-教材 IV .P228  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 034775 号

策划编辑:朱海燕 杨 红 / 文案编辑:李久进 / 责任校对:柏连海  
责任印制:安春生 / 封面设计:高海英

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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2003 年 8 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2003 年 8 月第一次印刷 印张:28

印数:1—3 500 字数:530 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

# 《地理信息系统教学丛书》编委会

顾问 陈述彭 王家耀 孙九林 李小文 李德仁  
承继成 高俊 童庆禧 廖克

主编 闫国年

副主编 王桥 黄家柱

委员 (按姓氏笔画排序)

王桥	王卫国	王建平	文斌	韦玉春
石富兰	兰小机	孙在宏	孙毅中	刘克
刘二年	刘晓艳	刘基余	毕硕本	乔延春
任建武	张宏	张之沧	张书亮	张亦含
张海涛	陈洋	陈踊	陈锁忠	李硕
李斌	李秀梅	李旭文	李安波	宋亚超
严荣华	杨旭	杨一鹏	杨建军	何建邦
吴长彬	吴平生	沈陈华	苏乐平	林琿
林振山	郑在洲	闫国年	唐卫	陶陶
徐敏	徐秀华	袁丁	龚敏霞	常本春
温永宁	蒋海琴	黄家柱	缪瀚深	潘莹

# 序

南京师范大学地理科学学院发起并组织编写地理信息系统专业系列教材,奋斗三载,先后问世,这是我国第一套全面阐述地理信息系统理论、方法、技术和应用的教科书。对于地理学科的现代化,信息科学新型人才的培训,对于落实科教兴国战略,深化教学改革来说,都是值得庆贺的。

据中国科学院地学部调查(2002),全国综合性大学共有 150 个地理学科机构,在地学领域中居首位。而地理信息系统专业脱颖而出,发展最快。世纪之初,已设置专业的学校有 70 多个,仅江苏省内就有 12 个。这是经济发展、社会进步的客观需求。面对全社会数字化的浪潮,“数字地球”、数字化城市、省区与流域,百舸争流。地理信息系统作为人口、资源与环境问题的公共平台;作为国家推动信息化,实现现代化的重要组成部分,正在与电子政务、电子商务信息系统相融合,愈来愈显示它跨行业、多功能的优势,不断开拓新的应用领域。一些涉及地理分布现象的数据采集、时空分析,涉及城市或区域规划、管理与决策的过程,都喜欢用上地理信息系统这种新的技术手段,来提高办公自动化的水平,提高企业科学管理的效率和透明度,加强面对国际市场的开放力度和竞争能力。近 20 年来,全国范围从事地理信息系统的事业、企业单位,迅猛增长,已超过 400 个,而且方兴未艾,与时俱进。

中国科学院地学部地学教育研究组在咨询报告(2002)中指出:“随着社会和科技的发展,地学的内涵、性质和社会功能也在变化。这在最近 20 年中尤为明显:遥感、信息技术和各种实时观测、分析技术的发展,使地球科学进入了覆盖全球、穿越圈层,即地球系统科学的新阶段,从局部现象的描述,推进到行星范围的推理探索,获得了全球性和系统性的信息。”这就是说,从学科的本质及其自身发展的规律来看,地理信息系统不仅仅是技术,而且是科学,是发展地球系统科学不可缺少的部分。

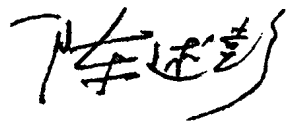
地理信息系统其所以一枝独秀,并非偶然!主要是由于它本身具备着多样化的社会功能。社会信息化的主要内容包括三个方面:一是信息基础设施的建设,地理信息系统正是地图测绘的数字化产品,同时又是兼收并容遥感、定位系统的缓冲区,起着调节网络信息流的作用。二是产业结构调整,地理信息系统起着润滑剂的作用,以信息流调控物流、能流和人流,以信息化促进现代化。三是信息服务,地理信息系统是电子政务、电子商务信息系统不可分割的组成部分。在航天事业、电信网络和电脑技术日新月异的新世纪,地理信息系统如虎添翼,广泛地渗透到各行各

业之中,提供无微不至的信息服务。

地理信息系统教材的编著,前人多以综论形式出版。例如,英文教材先后有 Taylor D. R. (1991), Autenucci J. C. et al. (1991), M. D. I. Goodchild (1991), Fisher M. M. (1993), Murai Shuji (1996), D. Rhind (2000); 中文教材先后有黄杏元、汤勤 (1989), 边馥苓 (1996), 陈述彭、鲁学军、周成虎 (1999), 龚健雅 (1999), 邬伦 (1999), 闫国年、吴平生、周晓波 (1999), 李德仁、关泽群 (2000), 马蔼乃 (2000), 王家耀 (2001) 等。这些教材对地理信息系统的科学与哲学性质, 及其与邻近学科的相互关系, 均有精辟论述。地理信息系统应用专论方面, 城市: 曹桂发等 (1991), 宋小冬、叶嘉安 (1995), 宫鹏 (1996), 陈述彭 (1999), 张新长等 (2001); 林业: 李芝喜、孙俊平 (2000); 农业: 王人潮 (1999)。这些专著密切结合相关行业和中国特色, 有所发挥。现在, 闫国年教授等主持编写的地理信息系统专业系列教材, 是在前人的工作基础上, 博采众家之所长, 继往开来, 推陈出新, 拓展为系列教材。基础是扎实的, 时机是成熟的。

这套系列教材的编写, 紧密结合地理信息系统专业的课程设置。在理论方面, 又推出了一部新作, 从哲学的高度来探讨地理信息系统中的虚拟时空。系列教材的重点侧重于方法、技术。总结了数据集成、知识发现的最新进展; 率先推出数据共享、虚拟环境与网络三部分, 反映地理信息系统的生长点。在应用方面, 主要是结合作者近年参与建设项目的实践, 加以总结和提高, 是来自生产第一线的“新知”。目前已涉及到土地与水资源管理、城市规划、环境保护以及设备设施管理与房产管理等, 今后随着应用领域的拓展, 还会有旅游、物流等地理信息系统教材相继问世。

同学们可以根据课程计划, 循序渐进, 在理论方面广泛涉猎, 解放思想, 开阔眼界。在方法、技术方面, 配合辅导教材和实习大纲, 刻苦钻研, 掌握关键技术, 学以致用。在应用方面结合个人志趣、专长与就业需求, 选修其中一、二门, 理清不同行业的应用特点, 举一反三。系列教材是面向整个专业的, 并不要求每位同学都把全部教材囫圇吞枣下去, 食而不化。编写系列教材, 正是为同学们提供了更加宽阔的学习园地, 更加宽松的学习环境。祝福同学们健康成长, 时刻准备着, 与时俱进, 开拓创新, 为祖国信息化和现代化多做贡献。



(中国科学院院士)

2003 新年

# 前 言

1978年2月22日第一颗GPS试验卫星的入轨运行,开创了以导航卫星为动态已知点的无线电导航定位的新时代。GPS卫星所发送的导航定位信号,是一种可供无数用户共享的空间信息资源。陆地、海洋和空间的广大用户,只要持有一种能够接收、跟踪、变换和测量GPS信号的接收机,就可以全天时、全天候和全球性地测量运动载体的七维状态参数和三维姿态参数。其用途之广,影响之大,是任何其他无线电接收设备望尘莫及的。不仅如此,GPS卫星的入轨运行,还为大地测量学、地球动力学、地球物理学、天体力学、载人航天学、全球海洋学和全球气象学提供了一种高精度、全天时和全天候的测量新技术。为促进世界文明进步,提供了一种新的高科技方法。

21世纪初叶,GPS卫星全球定位系统的空间部分和地面监控系统,都将实施现代化,并计划于2005年开始增设第三导航定位信号(L5),而形成用3个GPS信号(L1,L2,L5)同时进行导航定位的新格局。GPS现代化,不仅使全球广大用户能够用GPS动态载波相位测量获得厘米级精度的三维实时点位坐标,而且能够用C/A码伪距测量解获得米级的单点定位精度。第四代GPS工作卫星——Block III(GPS III),已于2001年开始了实质性的研制,预计2010年将发射第一颗GPS III卫星。因此,GPS卫星导航定位,将成为新世纪综合性高新技术的新亮点。“GPS卫星导航定位原理与方法”也许会成为我国许多高等院校的一门技术基础课。

1986年12月,笔者在联邦德国的“Nachrichten aus dem Karten und Vermessungswesen”期刊上发表了第一篇且被苏联《文摘杂志》检索的关于GPS技术的学术论文。此后,一直从事GPS卫星导航定位的教学和科研工作,先后为武汉测绘科技大学和武汉大学的本科生、研究生和来校的国外访问学者用中英文讲授了GPS技术,其授课学时数,最长者达到110学时。为此授课,作者先后编写了《全球定位系统原理及其应用》、《卫星导航学》和《GPS Technology》3本中英文教材,其中《全球定位系统原理及其应用》,是由全国高校测绘教材委员会审定的畅销全国的第一本GPS教科书(北京测绘出版社于1993年10月第一次印刷发行)。在编写本书时,不仅以笔者现已问世的3本GPS中英文教材和近100篇GPS学术论文为基本素材,用简洁的文字,高度概括了许多难以理解的基本概念,而且参考了散见于中外期刊和会议论文集上的大量文献资料,选用了最新而较成熟的科学论述,以求为初学者提供一本内容覆盖面广阔、深入浅出讲清原理与方法的教科书,为研究生提供一本引导思考、启迪深究的参考书,为工程师提供一本拓宽视野、指

导设计的工具书。

现行的卫星导航定位系统,除了 GPS 系统以外,还有 GLONASS 全球导航卫星系统和北斗卫星导航试验系统,以及 2002 年 3 月开始建设的 Galileo 卫星导航定位系统。但是,20 世纪末期的 GLONASS 星座,只有 7 颗 GLONASS 卫星能够提供导航定位服务,其他卫星均因种种原因再不能够用于微波导航定位。GLONASS 星座的补充卫星,也还在计划之中。依现实状态,21 世纪初叶,GPS 卫星导航定位仍占主导地位。因此,本书以它为主题。

本书全面完整地论述了 GPS 卫星导航定位原理与方法,深入浅出地讲清了 GPS 卫星导航定位的实用理论,简明扼要地综析了 GLONASS 系统、Galileo 系统、地球同步卫星导航定位系统以及 GPS 的外部增强系统(EGNOS 系统、WAAS 系统、GDGPS 系统)的特点与应用。全书分为“卫星导航定位系统概论”、“GPS 卫星及其轨道”、“GPS 卫星的导航定位信号”、“GPS 信号接收机”、“GPS 伪距测量定位”、“GPS 载波相位测量定位”、“GPS 动态载波相位测量的数据处理方法”、“GPS 导航定位误差”和“GPS 测量成果的实用性”等 9 章。刘基余教授编写了第 1 至 6 章和第 8、9 章。陈小明博士编写了第 7 章中 7.1 至 7.5 等节的初稿,刘基余教授对该初稿做了部分修改,并编写了第 7 章中 7.6 节。此外,罗和平硕士编写了第 6 章中 6.5 节的初稿,王甫红博士提供了部分算例,刘仲谋工程师和邵玲工程师绘制了部分插图。

本书是为航空、航天、海洋、交通、地质、航道、石油、水利、农业、信息和测绘等行业院校相关专业的本科生、研究生和工程技术人员而编写的“通用教材”。当用它进行讲授时,教师可据本专业学生的基础知识情况,重点讲授相关章节,而适当忽略某些内容。

感谢科学出版社编辑朱海燕同志、杨红同志和李久进同志对本书的热情支持和认真审校!

GPS 卫星导航定位,涉及伪噪声编码技术、卫星轨道理论、微波与天线、锁相环路技术和现代数据处理技术等诸多学科与技术,加之笔者水平有限,疏漏谬误之处在所难免,诚请读者不吝斧正!

编著者

2002 年 12 月



# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 卫星导航定位系统概论</b> .....	1
1.1 卫星导航定位系统的发展回顾 .....	1
1.2 GPS 卫星全球定位系统 .....	9
1.3 GLONASS 全球导航卫星系统 .....	16
1.4 GPS 外部增强系统 .....	21
1.5 GPS 航天飞机测图系统 .....	28
1.6 地球同步卫星导航定位系统 .....	32
1.7 建设中的 Galileo 卫星导航定位系统 .....	41
<b>第 2 章 GPS 卫星及其轨道</b> .....	47
2.1 导航卫星的正常轨道 .....	47
2.2 导航卫星的摄动轨道 .....	59
2.3 GPS 卫星工作星座 .....	71
2.4 GPS 地面监控系统的作用 .....	80
2.5 GPS 卫星的导航电文 .....	87
2.6 GPS 卫星在轨位置的计算 .....	97
<b>第 3 章 GPS 卫星的导航定位信号</b> .....	103
3.1 概述 .....	103
3.2 伪噪声码及其生成 .....	107
3.3 几种特殊伪噪声码 .....	116
3.4 GPS 卫星的伪噪声码 .....	121
3.5 GPS 信号的 SA 影响 .....	131
3.6 GLONASS 信号与导航电文 .....	136
<b>第 4 章 GPS 信号接收机</b> .....	147
4.1 GPS 信号接收机的类型与发展 .....	147
4.2 GPS 信号接收机的基本结构 .....	154
4.3 微带天线 .....	163
4.4 GPS 信号接收机的工作原理 .....	169
4.5 GPS 观测量及其测量 .....	176
4.6 GPS/GLONASS 集成接收机 .....	181
4.7 GPS 信号接收机的基本性能检验 .....	187
<b>第 5 章 GPS 伪距测量定位</b> .....	197

5.1	GPS 伪距单点定位 .....	197
5.2	GPS 伪距差分定位 .....	206
5.3	DGPS 数据链 .....	216
5.4	RTCM SC-104 数据格式及其应用 .....	221
<b>第 6 章</b>	<b>GPS 载波相位测量定位 .....</b>	<b>229</b>
6.1	GPS 载波相位测量 .....	229
6.2	GPS 载波相位测量的单点定位问题 .....	239
6.3	GPS 载波相位测量的 DGPS 模型 .....	243
6.4	GPS 载波相位测量与伪距测量的组合解算 .....	249
6.5	GPS 载波相位测量的姿态测定应用 .....	254
<b>第 7 章</b>	<b>GPS 动态载波相位测量的数据处理方法 .....</b>	<b>265</b>
7.1	概论 .....	265
7.2	卡尔曼滤波数据处理模型 .....	271
7.3	附加模糊度参数滤波模型 .....	289
7.4	整周跳变的探测与修复 .....	296
7.5	整周模糊度的在航解算 .....	306
7.6	GPS 动态载波相位测量的工程实施 .....	318
<b>第 8 章</b>	<b>GPS 导航定位误差 .....</b>	<b>334</b>
8.1	GPS 卫星导航定位的精度、误差与偏差 .....	334
8.2	GPS 卫星导航定位的主要误差 .....	338
8.3	电离层效应的距离偏差及其改正误差 .....	346
8.4	对流层效应的距离偏差及其改正误差 .....	353
8.5	多路径误差 .....	357
8.6	GPS 现代化的作用与影响 .....	363
<b>第 9 章</b>	<b>GPS 测量成果的实用问题 .....</b>	<b>374</b>
9.1	WGS-84 坐标变换成本地实用坐标 .....	374
9.2	WGS-84 坐标的变换基础 .....	388
9.3	大地坐标变换成高斯平面直角坐标 .....	393
9.4	GPS 定轨的激光测距校验 .....	397
9.5	机载 GPS/激光测深系统 .....	408
<b>附录 A</b>	<b>中文参考资料 .....</b>	<b>422</b>
<b>附录 B</b>	<b>英文参考资料 .....</b>	<b>426</b>
<b>附录 C</b>	<b>Internet 英文参考资料 .....</b>	<b>432</b>

# Contents

## Preface

<b>1</b>	<b>Introduction of Satellite Navigation/Positioning Systems</b>	1
1.1	Development Briefing of Satellite Navigation/Positioning Systems	1
1.2	Navigation by Satellite Timing and Ranging Global Positioning System	9
1.3	Global Orbiting Navigation Satellite System	16
1.4	GPS External Augmentation Systems	21
1.5	GPS Shuttle Mapping System	28
1.6	Geostationary Satellite Navigation/Positioning System	32
1.7	Galileo Satellite Navigation/Positioning System	41
<b>2</b>	<b>GPS Satellites and Their Orbits</b>	47
2.1	Normal Orbit of Satellites	47
2.2	Perturbed Orbit of Satellites	59
2.3	GPS Operational Constellation	71
2.4	Function of GPS Ground Control System	80
2.5	Navigation Message of GPS Satellites	87
2.6	Position Calculation for GPS Orbiting Satellites	97
<b>3</b>	<b>Navigation/Positioning Signals of GPS Satellites</b>	103
3.1	Elements	103
3.2	Pseudo Random Noise Code and its Generation	107
3.3	Especial PRN Codes	116
3.4	PRN Codes of GPS Satellites	121
3.5	Influence of Selective Availability on GPS Signals	131
3.6	GLONASS Signals and Navigation Message	136
<b>4</b>	<b>GPS Signal Receiver</b>	147
4.1	Types and Developments of GPS Signal Receiver	147
4.2	Fundamental Element of GPS Signal Receiver	154
4.3	Microstrip Antenna	163
4.4	Operational Principle of GPS Signal Receiver	169
4.5	GPS Observables and Their Surveys	176
4.6	GPS/GLONASS Integrated Receiver	181
4.7	Inspection on Fundamental Performance of GPS Signal Receiver	187
<b>5</b>	<b>Positioning with GPS Pseudo-range Observations</b>	197

5.1	Single Point Positioning with GPS Pseudo-range Observations	197
5.2	Differential Positioning with GPS Pseudo-range Observations	206
5.3	DGPS Data links	216
5.4	RTCM SC-104 Data Format and Applications	221
<b>6</b>	<b>Positioning with GPS Carrier Phase Measurements</b>	<b>229</b>
6.1	GPS Carrier Phase Measurements	229
6.2	Problem on Single Point Positioning with GPS Carrier Phase Measurements	239
6.3	DGPS Equations of GPS Carrier Phase Measurements	243
6.4	Combinatory Solution with GPS Carrier Phase Measurements/Pseudo-range Observations	249
6.5	Attitude Determinations Using GPS Carrier Phase Measurements	254
<b>7</b>	<b>Data Processing on GPS Kinematical Carrier Phase Measurements</b>	<b>265</b>
7.1	Introduction	265
7.2	Kalman Filter Model for Data Processing	271
7.3	Kalman Filter Model with Additional Ambiguity Parameters	289
7.4	Detection and Repair of Cycle Slips	296
7.5	Ambiguity Solution On-The-Fly	306
7.6	Engineering Practice on GPS Kinematical Carrier Phase Measurements	318
<b>8</b>	<b>Errors in GPS Navigation/Positioning</b>	<b>334</b>
8.1	Accuracy, Error and Bias in GPS Navigation/Positioning	334
8.2	Major Errors in GPS Navigation/Positioning	338
8.3	Ranging Bias and Correction Error for Ionosphere Effect	346
8.4	Ranging Bias and Correction Error for Troposphere Effect	353
8.5	Error from Multipath Effects	357
8.6	Impact and Influence of GPS Modernization	363
<b>9</b>	<b>Application Problem on GPS Surveying Results</b>	<b>374</b>
9.1	Datum Transformation from WGS-84 Coordinates to Local Coordinates	374
9.2	Surveying Method for WGS-84 Coordinate Transformation	388
9.3	Transformation from Geodetic Coordinates to Gauss-Krügger Plane Coordinates	393
9.4	Laser Ranging Check on GPS Orbit Determinations	397
9.5	Airborne GPS/Laser Sounding System	408
<b>Supplement A</b>	<b>Chinese references</b>	<b>422</b>
<b>Supplement B</b>	<b>English references</b>	<b>426</b>
<b>Supplement C</b>	<b>Internet English references</b>	<b>432</b>

# 第 1 章 卫星导航定位系统概论

导航(navigation),“navigation”原为“航行”之意。它源于海洋船舶航行,初始形式是罗盘领航和天文导航,此后发展到陆地车辆和航空飞行器的行驶。以致“navigation”被译作“领航”或“导航”。广而言之,导航是实时地测定运动载体在途行进时的位置和速度,引导运动载体沿一定航线经济而安全地到达目的地。制导是利用导航定位的测量数据,通过姿态控制和平移,将飞行器(导弹、无人驾驶飞机、卫星等)运动载体导引至预定的轨道。

卫星导航,是接收导航卫星发送的导航定位信号,并以导航卫星作为动态已知点,实时地测定运动载体的在航位置和速度,进而完成导航。在第一颗人造地球卫星于 1957 年 10 月入轨运行的次年,美国科学家们就开始了卫星导航系统的研究,人造地球卫星的最重要应用,就是全球无线电导航。1963 年 12 月,第一颗导航卫星的入轨运行,开创了陆海空卫星无线电导航的新时代。1994 年 3 月,第二代卫星导航系统——“GPS 卫星全球定位系统”的全面建成,不仅导致无线电导航一场深刻的技术革命,而且为大地测量学、地球动力学、地球物理学、天体力学、载人航天学、全球海洋学和全球气象学提供了一种高精度和全天候的测量新技术。今天, GPS 已成为名符其实的跨学科、跨行业、广用途、高效益的综合性高新技术。

本章是学习 GPS 卫星导航定位的向导,它将向读者概述卫星导航定位的发展历程、现行卫星导航定位系统的作用与影响及其最新的技术与应用。

## 1.1 卫星导航定位系统的发展回顾

20 世纪 20 年代,第一个无线电导航系统——无线电信标的问世,开创了海洋船舶和航空飞行器导航的新篇章。随后,涌现了仪表着陆系统(instrument landing system, ILS)、微波着陆系统(microwave landing system,MLS)、伏尔/测距器(very high frequency omnidirectional range/ distance measuring equipment, VOR/DME)、罗兰 C(Loran C)、奥米伽(Omega)、塔康(tactical air navigation, TACAN)和台卡(Decca)等陆基无线电导航系统。

独立联体国家(原苏联)自行建立了一个类同于罗兰 C 的恰卡(Chayka)陆基无线电导航系统,并在国内建设了 15 个恰卡导航台,用于海空陆 3 大领域内的导航定位测量。我国在南海海域也自行建立了长河二号南海无线电导航系统,自 1990 年起,正式向国内用户开放使用。

上述陆基无线导航系统,普遍存在下列不足:信号覆盖区域有限、技术落后、设备陈旧、定位精度低(如奥米伽的定位精度为 $3.7\sim 7.4\text{km}$ ),难以适应现代航海、航空和陆地车辆的导航定位需要。星基无线电导航系统,特别是第二代星基无线电导航系统(如 GPS 卫星全球定位系统)的问世,给无线电导航注入了强劲的生命活力,开创了无线电导航定位的新时代。

1957 年 10 月 4 日,原苏联成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星,开创了空间技术造福人类的新时代。这颗卫星入轨运行后不久,美国詹斯·霍普金斯(Johns Hopkins)大学应用物理实验室(APL)的韦芬巴赫(G.C. Weiffenbach)和基尔(W.H. Guier)等学者,在地面已知坐标点位上,用自行研制的测量设备捕获和跟踪到了苏联卫星发送的无线电信号,并测得它的多普勒频移,进而用它解算出了苏联卫星的轨道参数。依据这项实验成果,该实验室的麦克雷(F.T. Meclure)等学者,设想了一个“反向观测方案”:若已知在轨卫星的轨道参数,地面上的观测者又测得该颗卫星发送信号的多普勒频移,则可计算出观测者的点位坐标。这个设想,成为了第一代卫星导航系统的基本工作原理,将导航卫星作为一种动态已知点,利用测量卫星信号的多普勒频移,通过计算,实现海洋船舶等运动载体的导航定位。1958 年 12 月,美国詹斯·霍普金斯大学应用物理实验室在美国海军的资助下,开始用上述原理研制一种卫星导航系统,称为美国海军卫星导航系统(navy navigation satellite system, NNSS),因为这些导航卫星是沿着地球子午圈的轨道运行——轨道绕过地球的南北两极上空(如图 1.1.1 所示),故又称之为子午卫星(TRANSIT)导航系统。1959 年 9 月,第一颗试验性子午卫星入轨运行,至 1961 年 11 月,先后发射了 9 颗试验性子午卫星。经过几年的试验研究,解决了卫星导航的许多技术难题,而于 1963 年 12 月发射了第一颗子午工作卫星。此后,陆续发射了数颗工作卫星,而形成了由 6 颗工作卫星构成的子午卫星星座(如图 1.1.1 所示)。在该星座信号的覆盖下,地球表面上任何一个观测者,至多间隔 2h 便可观测到该星座中的一颗卫星。卫星轨道距离地面约为 1070km,轨道椭圆的偏心率很小,近于圆形,每一个轨道上运行一颗子午卫星。子午卫星沿轨道运行的周期约为 107min。每一颗子午卫星均以 400MHz 和 150MHz 频率的微波信号作为载波,向用户发送导航电文。子午卫星星座运行初期,导航电文是保密的。1967 年 7 月 29 日,美国政府宣布,解密子午卫星所发送的导航电文部分内容而供民间使用。此后,利用子午卫星所发送的导航信号和导航电文进行导航定位测量的技术和应用,迅速地普及到世界上许多国家。

子午卫星导航系统的用户设备,是卫星多普勒接收机,或称为卫星多普勒导航仪。它的基本工作原理是,接收一颗通过用户视界的子午卫星发送的导航定位信号,测量该信号的多普勒频移,并从导航电文中解调出在视卫星的在轨实时点位和时标信息,依此而解算出用户的点位坐标。为了提高多普勒频移的测量精度,卫

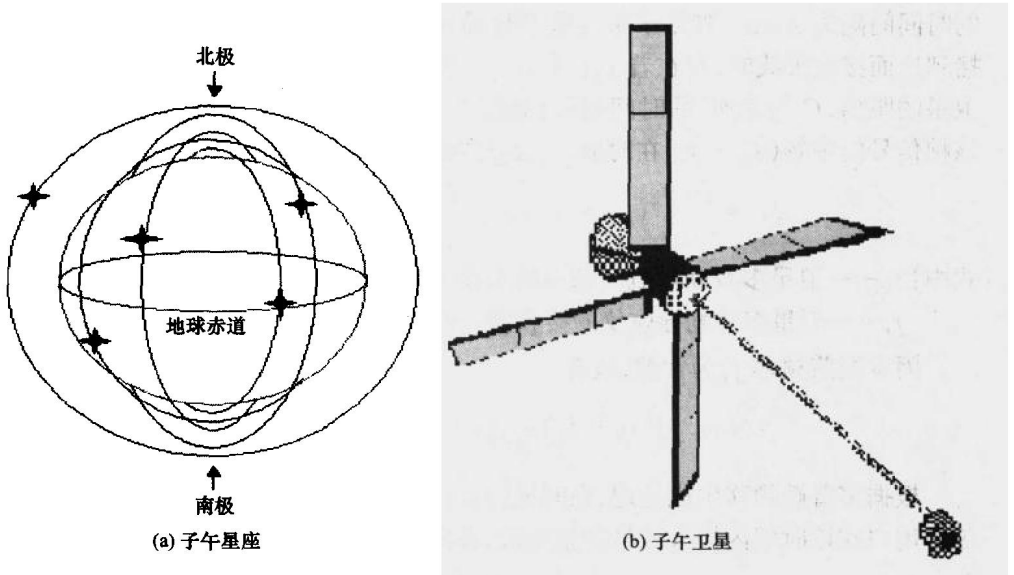


图 1.1.1 子午卫星星座与工作卫星

星多普勒导航仪不是直接测量某一时元的多普勒频移,而是测量在一定时间间隔内多普勒频移的积累数值,称之为多普勒计数。子午卫星发射一帧又一帧的导航信号,每帧信号的起始时元  $t_1, t_2, t_3 \dots$  都是 2min 的整倍数,亦即  $t_1$  与  $t_2, t_2$  与  $t_3$

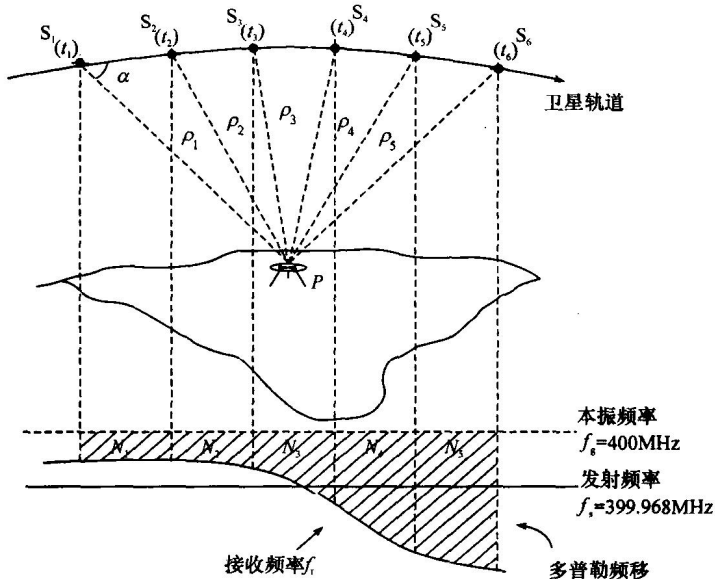


图 1.1.2 多普勒计数测量图示

的时间间隔为 2min。如果子午卫星于时元  $t_1$  至  $t_2$  发射一帧信号,它经过大气层传播到地面接收天线时,存在着  $\tau_1(=\rho_1/C)$  和  $\tau_2(=\rho_2/C, \rho_1, \rho_2$  为接收天线至子午卫星的距离,  $C$  为光速)的时间延迟(如图 1.1.2),以致卫星多普勒导航仪所测得该帧信号的中频( $f_g - f_r$ )在时域  $[t_1, t_2]$  内的整周数为

$$N = \int_{t_1+\tau_1}^{t_2+\tau_2} (f_g - f_r) dt = \int_{t_1+\tau_1}^{t_2+\tau_2} f_g dt - \int_{t_1+\tau_1}^{t_2+\tau_2} f_r dt \quad (1.1.1)$$

式中:  $f_g$ ——卫星多普勒导航仪的本机振荡频率;

$f_r$ ——卫星多普勒导航仪的接收信号频率。

因本机振荡频率  $f_g$  为常数,故有

$$N = f_g(t_2 - t_1) + f_g(\tau_2 - \tau_1) - \int_{t_1+\tau_1}^{t_2+\tau_2} f_r dt \quad (1.1.2)$$

根据多普勒频移生成基理,在时域  $[t_1, t_2]$  内子午卫星发射信号的整周数应该等于用户在该时域内接收信号的整周数,亦即

$$\int_{t_1}^{t_2} f_s dt = \int_{t_1+\tau_1}^{t_2+\tau_2} f_r dt$$

若式(1.1.2)顾及上式,并考虑到  $\tau_1 = \rho_1/C, \tau_2 = \rho_2/C$  (此处  $\rho_1, \rho_2$  为接收天线至子午卫星的距离),则有

$$N = f_g(t_2 - t_1) + f_g\left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{C}\right) - \int_{t_1}^{t_2} f_s dt$$

式中:  $f_s$ ——子午卫星发射信号的频率,故有

$$N = (f_g - f_s)(t_2 - t_1) + f_g\left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{C}\right) \quad (1.1.3)$$

上式为接收信号在时域  $[t_1, t_2]$  内的整周数,因此多普勒计数为

$$N_d = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\lambda_g} = N - (f_g - f_s)(t_2 - t_1) \quad (1.1.4)$$

式中:  $\lambda_g = C/f_g$ 。且知在时域  $[t_1, t_2]$  内始终点距离差( $\rho_2 - \rho_1$ )的观测值为

$$(\rho_2 - \rho_1)_m = [N - (f_g - f_s)(t_2 - t_1)]\lambda_g \quad (1.1.5)$$

值得指出的是,上述积分多普勒计数  $N$  的测量时间间隔一般取用 4.6s 或 4.9s,对于测地型卫星多普勒接收机而言,以 6~7 个 4.6s 合并成 (28/32)s 的长间隔积分多普勒计数,称之为半分钟多普勒计数,并将它作为一个观测值。

式(1.1.5)所示的距离差,亦可按用户和卫星在轨位置的三维坐标算得,即有

$$(\rho_2 - \rho_1) = \sqrt{(X_2^S - X_u)^2 + (Y_2^S - Y_u)^2 + (Z_2^S - Z_u)^2} - \sqrt{(X_1^S - X_u)^2 + (Y_1^S - Y_u)^2 + (Z_1^S - Z_u)^2} \quad (1.1.6)$$

式中:  $X_{1,2}^S, Y_{1,2}^S, Z_{1,2}^S$ ——子午卫星于时元  $t_1, t_2$  的在轨三维坐标,它们可依据导



航电文给出的轨道参数而计算求得,亦即卫星在轨位置是已知的;

$X_u, Y_u, Z_u$ ——用户接收天线的三维坐标。

如果已知用户位置的近似值为  $X_{u0}, Y_{u0}, Z_{u0}$ , 而它的改正数为  $\Delta X_u, \Delta Y_u, \Delta Z_u$ , 则式(1.1.6)可以展成泰勒级数, 即有

$$\begin{aligned} (\rho_2 - \rho_1)_C &= f(X_{u0} + \Delta X_u, Y_{u0} + \Delta Y_u, Z_{u0} + \Delta Z_u) \\ &= f(X_{u0}, Y_{u0}, Z_{u0}) + \frac{\partial f(X_u, Y_u, Z_u)}{\partial X_u} \Delta X_u \\ &\quad + \frac{\partial f(X_u, Y_u, Z_u)}{\partial Y_u} \Delta Y_u + \frac{\partial f(X_u, Y_u, Z_u)}{\partial Z_u} \Delta Z_u \end{aligned} \quad (1.1.7)$$

距离差的观测值常常存在着测量误差, 后者导致  $(\rho_2 - \rho_1)_m$  的改正数若为  $\nu_{21}$ , 则有

$$\nu_{21} = (\rho_2 - \rho_1)_C - (\rho_2 - \rho_1)_m$$

上式若顾及式(1.1.5)和(1.1.7), 且考虑到式(1.1.5)中

$$f_g - f_s = f_m + \Delta f_m$$

则有

$$\begin{aligned} \nu_{21} &= f(X_{u0}, Y_{u0}, Z_{u0}) + \frac{\partial f(X_u, Y_u, Z_u)}{\partial X_u} \Delta X_u + \frac{\partial f(X_u, Y_u, Z_u)}{\partial Y_u} \Delta Y_u + \\ &\quad \frac{\partial f(X_u, Y_u, Z_u)}{\partial Z_u} \Delta Z_u - [N_{21} - (f_m + \Delta f_m)(t_2 - t_1)] \lambda_g \end{aligned} \quad (1.1.8)$$

若令

$$a_1 = \frac{\partial f(X_u, Y_u, Z_u)}{\partial X_u}$$

$$b_1 = \frac{\partial f(X_u, Y_u, Z_u)}{\partial Y_u}$$

$$c_1 = \frac{\partial f(X_u, Y_u, Z_u)}{\partial Z_u}$$

$$d_1 = (t_2 - t_1) \lambda_g$$

$$L_1 = f(X_{u0}, Y_{u0}, Z_{u0}) + [f_m(t_2 - t_1) - N_{21}] \lambda_g$$

则式(1.1.8)可写成

$$\nu_{21} = a_1 \Delta X_u + b_1 \Delta Y_u + c_1 \Delta Z_u + d_1 \Delta f_m + L_1 \quad (1.1.9)$$

一颗子午卫星一次通过用户上空的持续时间一般为 10~18min, 若采用 5 个 4.6s 合成一个 23s 的长计数作为多普勒观测值, 一次卫星通过可以采集到 20~40 个有效观测值, 而可按式(1.1.9)列出 20~40 个改正数方程, 亦即

$$\left. \begin{aligned} \nu_{21} &= a_1 \Delta X_u + b_1 \Delta Y_u + c_1 \Delta Z_u + d_1 \Delta f_m + L_1 \\ \nu_{32} &= a_2 \Delta X_u + b_2 \Delta Y_u + c_2 \Delta Z_u + d_1 \Delta f_m + L_2 \\ &\quad \vdots \\ \nu_{(n+1)n} &= a_n \Delta X_u + b_n \Delta Y_u + c_n \Delta Z_u + d_n \Delta f_m + L_n \end{aligned} \right\} \quad (1.1.10)$$