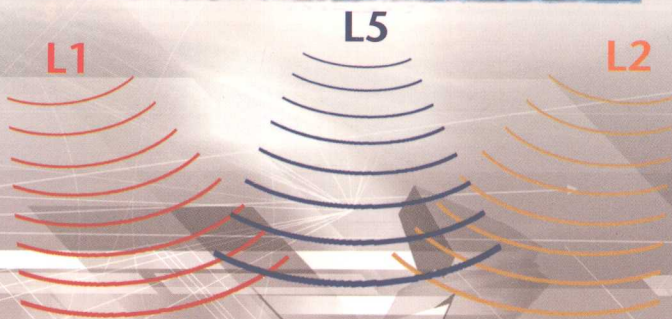
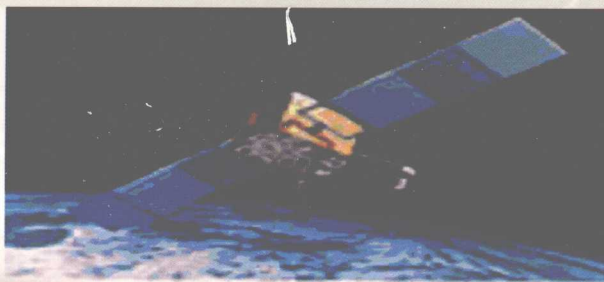


21世纪高等院校教材

GPS 卫星导航定位 原理与方法

(第二版)

刘基余 编著



科学出版社

www.sciencep.com

V4/4.35
1920
1-

21 世纪高等院校教材

GPS 卫星导航定位 原理与方法

(第二版)

刘基余 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者在第一版的基础上,搜集了很多最新资料并整理而成的。它全面系统地论述了GPS卫星导航定位技术及其发展,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GLO-NASS系统、GALILEO系统、DORIS系统、PRARE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。

本书可以作为高等院校航空、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. —2版. —北京:科学出版社,2008

21世纪高等院校教材

ISBN 978-7-03-021995-4

I. G… II. 刘… III. 全球定位系统(GPS)-高等学校-教材
IV. P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第070044号

责任编辑:杨红 / 责任校对:包志虹

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈敬

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>

骏立印刷厂印刷

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)

2008年6月第 二 版 印张:30 3/4

2008年6月第五次印刷 字数:587 000

印数:8 501—11 000

定价:45.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

第二版前言

《GPS 卫星导航定位原理与方法》一书,自 2003 年 8 月出版以来,深受广大读者的厚爱。更令人高兴的是,经过教育部学位管理与研究生教育司遴选与推荐,国务院学位委员会评议组召集人会议审定,《GPS 卫星导航定位原理与方法》一书,被评定为教育部 2004~2005 年度全国高等院校相关专业的研究生教学用书。

在编写《GPS 卫星导航定位原理与方法》之初,我们就确定了“引导思考、启迪深究”的写作原则,且以该原则为主线,贯穿全书始末。此次再版,不仅继续执行上述写作原则,而且考虑到我国建设 CNSS 指南针导航卫星系统的需要,依据 GPS 现代化的最新进展和国际友人提供的最新资料,增修了书中的有关论述。例如, GPS 现代化增添的 M 军用伪噪声码,实际上是在 GPS 第二导航定位信号上,增设一个军用 M_{earth} 伪噪声码,在 GPS 第三导航定位信号上,将增设另一个军用 $M_{\text{High Power}}$ 伪噪声码;现行的国内外文献却概称之为 M 军码;2013 年后, GPS 导航定位信号将增加 L1-C 测距码等。

近年来,在一些论文和相关学术会议征文中,将 GNSS 与 GPS 等系统并列而述,而 GPS 厂商却推出 GNSS 接收机。这就存在一个问题:GNSS 究竟是一个单一系统,还是一个综合系统? GNSS 是 Global Navigation Satellite System 的缩写,应译为“全球导航卫星系统”,而不宜译成“全球卫星导航系统”。众所周知,卫星是在天空中环绕地球而运行的,其“全球性”是不言而喻的;而“全球导航”是相对于陆基区域性导航而言,以此体现卫星导航的优越性。

从 20 世纪 90 年代中期开始,欧盟一直致力于一个雄心勃勃的民用全球导航卫星系统计划,称之为 Global Navigation Satellite System。该计划分两步实施:第一步是建立一个综合利用美国的 GPS 系统和俄罗斯的 GLONASS 系统的第一代全球导航卫星系统(当时称为 GNSS-1,即后来建成的 EGNOS 系统);第二步是建立一个完全独立于美国的 GPS 系统和俄罗斯的 GLONASS 系统之外的第二代全球导航卫星系统,即正在建设中的 Galileo 卫星导航定位系统。由此可见,GNSS 从问世开始,就不是一个单一星座系统,而是一个包括 GPS、GLONASS 在内的综合星座系统。为便于明义,我们建议采用“GNSS 全球导航卫星系统”之称。它是所有在轨工作的卫星导航系统的总称,目前主要包括 GPS 卫星全球定位系统、GLONASS 全球导航卫星系统、北斗卫星导航系统、WAAS 广域增强系统、EGNOS 欧洲静地卫星导航重叠系统、DORIS 星载多普勒无线电定

轨定位系统、PRARE 精确距离及其变率测量系统、QZSS 准天顶卫星系统、GAGAN GPS 静地卫星增强系统,以及正在建设的 Galileo 卫星导航定位系统、中国的指南针导航卫星系统(Compass Navigation Satellite System,简称 CNS)和印度区域导航卫星系统(IRNSS)。而具有 30 年应用历史的 GPS 系统,是其杰出代表,其导航定位原理与方法具有普遍的实用价值。因此,本次再版增修仍旧以 GPS 系统为主,其主要内容如下所述:

1. 较全面地增修了第 1 章的有关论述。该章简要地论述了 GPS 系统、GLO-NASS 系统、Galileo 系统、DORIS 系统、PRARE 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发展;而这些系统随着应用的扩展与深入,都在不断地更新与完善。本次再版时,采集了最新的相关资料,对有关论述做了增修,例如,简介了 GPS 技术的 14 种军事应用;GLONASS 系统现代化的主要内容;对第 1.7 节做了较多的增补,其中包括每颗 Galileo 卫星发送的 L1F、L1P、E6C、E6P、E5A 和 E5B 等六种导航定位信号;对于采用类似于 GPS L5 导航电文的 Galileo 卫星导航电文,则在新增写的第 2.7 节中予以概述。

2. 据最新资料,2009 年 1 月将开始发射 Block II F 卫星,它们将增加 GPS 第三导航定位信号(L5)。因此,在第 2 章中,增加了“GPS L5 导航电文及其特点”一节;而且,依据 2008 年 5 月的资料,给出了 Block I / II 卫星的在轨工作寿命和 GPS 工作星座基本状况,其中包括 5 颗 Block II R-M 卫星的在轨状况。

3. 在第 3 章中,强化了 GPS 信号及其伪噪声码的相关论述。2005 年 9 月 26 日发射的第一颗 Block II R-M 卫星,开始在 GPS 第二导航定位信号上增设第二个民用测距码(L2-C 码)和新的军用伪噪声码,对此作了实用介绍;并依据我们最新的相关课题研究成果,订正和补充了原书中的有关论述,增添了相关实例,以供读者拓宽应用。此外,除了增加了现行的 GPS 管理机构等框图外,还介绍了 GLO-NASS-M 卫星导航电文所增加的 8 个新参数。

4. 依据 GPS 信号接收机的最新发展,对第 4 章做了较多的增修;例如,增写了“GPS 信号接收机的软件化”一节;介绍了蓝牙(Bluetooth)技术及其在 GPS 信号接收机中的作用与影响;综述了基于虚拟基准站(VRS)的网络 RTK GPS 测量技术。

5. 从 GPS 技术应用的发展趋势可见,GPS 在航天器上的应用将成为一个新的研究热点。因此,在第 5 章中,增加了“GPS 伪距测量在航天器自主导航中的应用”一节,给出了星载 GPS 测量自主定轨软件概述及其数据处理的实例,而得到了星载 GPS 测量自主定轨能够达到 $\pm 1\text{m}$ 精度的结果(取自王甫红博士的研究成果)。

6. 根据 GPS 现代化的新进展,对 2013 年开始发射的 Block III 卫星所增加的

新测距码—— $L1-C$ 码作了介绍,并综述了 Block III 卫星对 GPS 导航定位精度的改善。

对本书中的另外一些章节,也做了必要的修改和补充,此处不再赘述。

编著者

2008年5月

第一版前言

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

第二版前言

第一版前言

第 1 章 卫星导航定位系统概论	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	10
1.3 GLONASS 全球导航卫星系统	22
1.4 GPS 外部增强系统	29
1.5 GPS 航天飞机测图系统	36
1.6 地球同步卫星导航定位系统.....	41
1.7 建设中的 Galileo 卫星导航定位系统	50
第 2 章 GPS 卫星及其轨道	59
2.1 导航卫星的正常轨道.....	59
2.2 导航卫星的摄动轨道.....	72
2.3 GPS 卫星工作星座	83
2.4 GPS 地面监控系统的作用	93
2.5 GPS 卫星的导航电文	100
2.6 GPS 卫星在轨位置的计算	110
2.7 GPS L5 导航电文及其特点	116
第 3 章 GPS 卫星的导航定位信号	125
3.1 概述	125
3.2 伪噪声码及其生成	129
3.3 几种特殊伪噪声码	138
3.4 GPS 卫星的伪噪声码	143
3.5 GPS 信号的 SA 影响	154
3.6 GLONASS 信号与导航电文	160
第 4 章 GPS 信号接收机	173
4.1 GPS 信号接收机的类型与发展	173
4.2 GPS 信号接收机的基本结构	182
4.3 微带天线	190
4.4 GPS 信号接收机的工作原理	196
4.5 GPS 观测测量及其测量	203
4.6 GPS/GLONASS 集成接收机.....	208

4.7	GPS 信号接收机的基本性能检验	214
4.8	GPS 信号接收机的软件化	223
第 5 章	GPS 伪距测量定位	228
5.1	GPS 伪距单点定位	228
5.2	GPS 伪距差分定位	237
5.3	DGPS 数据链	247
5.4	RTCM SC-104 数据格式及其应用	252
5.5	GPS 伪距测量在航天器自主导航中的应用	259
第 6 章	GPS 载波相位测量定位	270
6.1	GPS 载波相位测量	270
6.2	GPS 载波相位测量的单点定位问题	280
6.3	GPS 载波相位测量的 DGPS 模型	284
6.4	GPS 载波相位测量与伪距测量的组合解算	290
6.5	GPS 载波相位测量的姿态测定应用	295
第 7 章	GPS 动态载波相位测量的数据处理方法	306
7.1	概论	306
7.2	卡尔曼滤波数据处理模型	312
7.3	附加模糊度参数滤波模型	330
7.4	整周跳变的探测与修复	337
7.5	整周模糊度的在航解算	347
7.6	GPS 动态载波相位测量的工程实施	359
第 8 章	GPS 导航定位误差	375
8.1	GPS 卫星导航定位的精度、误差与偏差	375
8.2	GPS 卫星导航定位的主要误差	379
8.3	电离层效应的距离偏差及其改正误差	387
8.4	对流层效应的距离偏差及其改正误差	394
8.5	多路径误差	399
8.6	GPS 现代化的作用与影响	405
第 9 章	GPS 测量成果的实用问题	420
9.1	WGS-84 坐标变换成本地实用坐标	420
9.2	WGS-84 坐标的变换基础	434
9.3	大地坐标变换成高斯平面直角坐标	439
9.4	GPS 定轨的激光测距校验	443
9.5	机载 GPS/激光测深系统	454
附录 A	中文参考资料	468
附录 B	英文参考资料	472
附录 C	Internet 英文参考资料	478

Contents

The Second Edition Preface

The First Edition Preface

1	Introduction of Satellite Navigation/Positioning Systems	1
1.1	Development Briefing of Satellite Navigation/Positioning Systems	1
1.2	Navigation by Satellite Timing and Ranging Global Positioning System	10
1.3	Global Orbiting Navigation Satellite System	22
1.4	GPS External Augmentation Systems	29
1.5	GPS Shuttle Mapping System	36
1.6	Geostationary Satellite Navigation/Positioning System	41
1.7	Galileo Satellite Navigation/Positioning System	50
2	GPS Satellites and Their Orbits	59
2.1	Normal Orbit of Satellites	59
2.2	Perturbed Orbit of Satellites	72
2.3	GPS Operational Constellation	83
2.4	Function of GPS Ground Control System	93
2.5	Navigation Message of GPS Satellites	100
2.6	Position Calculation for GPS Orbiting Satellites	110
2.7	Navigation Message and its Characteristic of GPS L5 Signal	116
3	Navigation/Positioning Signals of GPS Satellites	125
3.1	Elements	125
3.2	Pseudo Random Noise Code and its Generation	129
3.3	Especially PRN Codes	138
3.4	PRN Codes of GPS Satellites	143
3.5	Influence of Selective Availability on GPS Signals	154
3.6	GLONASS Signals and Navigation Message	160
4	GPS Signal Receiver	173
4.1	Types and Developments of GPS Signal Receiver	173
4.2	Fundamental Element of GPS Signal Receiver	182
4.3	Microstrip Antenna	190
4.4	Operational Principle of GPS Signal Receiver	196
4.5	GPS Observables and Their Surveys	203
4.6	GPS/GLONASS Integrated Receiver	208
4.7	Inspection on Fundamental Performance of GPS Signal Receiver	214
4.8	Software-based GPS Receivers	223

5	Positioning with GPS Pseudo-range Observations	228
5.1	Single Point Positioning with GPS Pseudo-range Observations	228
5.2	Differential Positioning with GPS Pseudo-range Observations	237
5.3	DGPS Data links	247
5.4	RTCM SC-104 Data Format and Applications	252
5.5	Autonomous Navigation of Spacecrafts using GPS Pseudo-range Observations	259
6	Positioning with GPS Carrier Phase Measurements	270
6.1	GPS Carrier Phase Measurements	270
6.2	Problem on Single Point Positioning with GPS Carrier Phase Measurements	280
6.3	DGPS Equations of GPS Carrier Phase Measurements	284
6.4	Combinatory Solution with GPS Carrier Phase Measurements/Pseudo-range Observations	290
6.5	Attitude Determinations Using GPS Carrier Phase Measurements	295
7	Data Processing on GPS Kinematical Carrier Phase Measurements	306
7.1	Introduction	306
7.2	Kalman Filter Model for Data Processing	312
7.3	Kalman Filter Model with Additional Ambiguity Parameters	330
7.4	Detection and Repair of Cycle Slips	337
7.5	Ambiguity Solution On-The-Fly	347
7.6	Engineering Practice on GPS Kinematical Carrier Phase Measurements	359
8	Errors in GPS Navigation/Positioning	375
8.1	Accuracy, Error and Bias in GPS Navigation/Positioning	375
8.2	Major Errors in GPS Navigation/Positioning	379
8.3	Ranging Bias and Correction Error for Ionosphere Effect	387
8.4	Ranging Bias and Correction Error for Troposphere Effect	394
8.5	Error from Multipath Effects	399
8.6	Impact and Influence of GPS Modernization	405
9	Application Problem on GPS Surveying Results	420
9.1	Datum Transformation from WGS-84 Coordinates to Local Coordinates	420
9.2	Surveying Method for WGS-84 Coordinate Transformation	434
9.3	Transformation from Geodetic Coordinates to Gauss-Krügger Plane Coordinates	439
9.4	Laser Ranging Check on GPS Orbit Determinations	443
9.5	Airborne GPS/Laser Sounding System	454
Supplement A	Chinese references	468
Supplement B	English references	472
Supplement C	Internet English references	478

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，不仅带来了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。

独立国家联合体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 3.7~7.4km),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,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

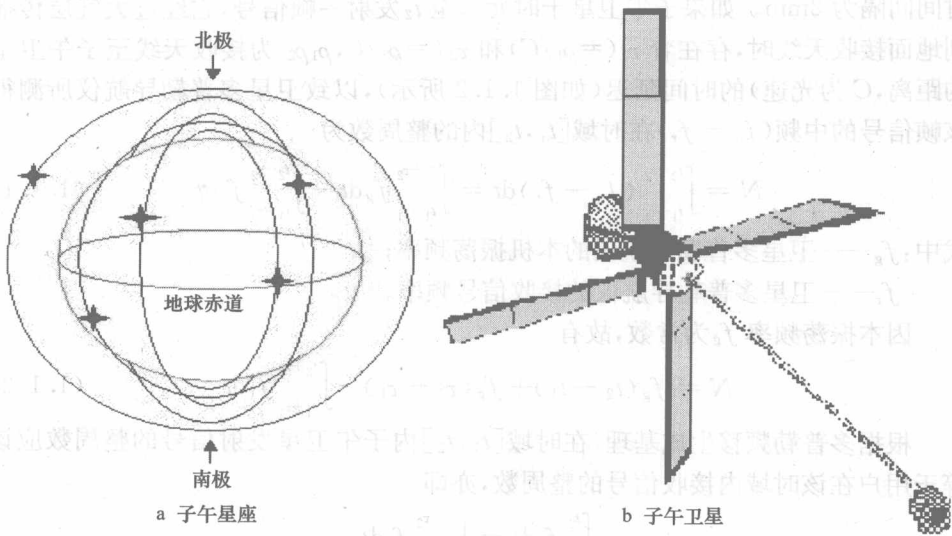


图 1.1.1 子午卫星星座与工作卫星

星多普勒导航仪不是直接测量某一时刻的多普勒频移,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,每帧信号的起始时刻 t_1, t_2, t_3, \dots 都是2min的整数倍,亦即 t_1 与 t_2, t_2 与 t_3 的

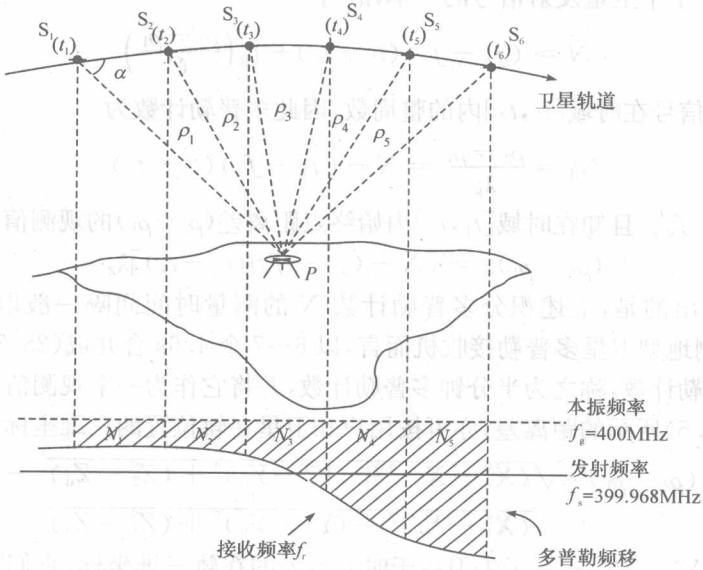


图 1.1.2 多普勒计数测量图示

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 所示),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 ρ_1, ρ_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 ν_{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

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

依据上列方程, 按最小二乘法原理可列出下述法方程式: