

卫星导航

吴广华 张杏谷 编著



人民交通出版社

33450905

TN967.1

01

卫星导航

Weixing Daohang

吴广华 张杏谷 编著



H/K16/19



C0399394

人民交通出版社

内 容 提 要

本书共分为10章,其主要内容分别为:卫星导航系统基础,子午仪卫星导航系统,导航星全球定位系统,非差分的伪距精度改进,差分GPS, SA和GDOP影响的改进, GLONASS系统,全球导航卫星系统,以及卫星导航仪。

本书可作为高等院校有关专业的教学用书,也可供导航通信专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航/吴广华,张杏谷编著. —北京:人民交通出版社,1997.12

ISBN 7-114-02861-X

I. 卫… II. ①吴… ②张… III. 卫星导航
IV. TN967.1

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第29357号

卫 星 导 航

吴广华 张杏谷 编著

插图设计:秦淑珍 版式设计:刘晓方 责任校对:尹 静

责任印制:张 凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

新世纪印刷厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:9 字数:230千

1998年4月 第1版

1998年4月 第1版 第1次印刷

印数:0001~3500册 定价:18.00元

ISBN 7-114-02861-X

U·02039

前 言

从利用自然天体到发射人造卫星导航是人类导航史上从自然王国走向自由王国的重大里程碑。卫星导航,特别是 GPS 出现和广泛应用,实现了全球、全天候、高精度的连续的导航。为了进一步改善卫星定位的精度,提高导航的可靠性、完善性,多种卫星系统组合的新的系统正逐步发展。它将为人类征服海洋、征服太空、征服自然作出重大贡献。

本书曾在集美大学、厦门大学不同专业作为本科或研究生课教材使用多年。现根据船舶公司船长们及理论科技工作者提议,增补了卫星导航性能改善, GPS 和电子海图组合导航等内容。由于导航技术发展日新月异,增补的内容只是沧海之一粟。需要深入了解或研究者可参阅有关方面的文献。作教材使用时可根据专业需要有所侧重。

本书第一、二、八、九章和第三、四、十章的一、二节由张杏谷执笔,其余由吴广华执笔。

大连海事大学陈祖慰教授对本书给予了热情的关怀,袁安存教授先后两次审阅过本书的文稿,并提出过许多宝贵意见,在此深致谢意。作者亦感谢人民交通出版社、集美大学、集美航海学院给予的大力支持。

限于作者水平和篇幅,书中内容难免挂一漏万,作者只期能抛砖引玉,不当处请读者不吝赐教。

吴广华、张杏谷

一九九七年六月 于厦门

序

1957年10月4日前苏联第一颗人造卫星的升空暨1964年美国子午仪卫星导航系统的交付使用为无线电导航定位技术开创了新纪元,它标志着半个多世纪以来沿用的陆基无线电定位系统朝星基无线电定位系统的转变。

1943年由四个岸台组成的罗兰A导航台链结束了测向系统作为唯一的无线电定位方法的地位。尽管无线电测向仪用作海上搜救手段被规定为船舶必备的装备,但由于多种测距差无线电定位系统的出现迫使无线电测向系统在定位应用上退缩到无足轻重的境地。

事物的发展始终遵循着优胜劣汰的原则。性能更好的系统必然要替代性能较差的系统,或者使之降低到次要的、区域性的应用。

在技术上和应用上都比子午仪系统优越得多的全天候、高精度、全球性的定位系统GPS和GLONASS具有无可争辩地替代其它陆基和星基无线电定位系统的优势。根据美国联邦无线电导航计划子午仪系统、奥米伽系统和罗兰C系统将相继于1996年末,1997年9月和2000年关闭。但就罗兰C系统而言,在某些国家和地区或许还要延续更长的时间,何况从保障安全可靠的角度上往往要求多种手段并存或组合的配置。

航天和电子技术的进步,促进定位与通信信息资源的开发和应用。在子午仪系统、GPS和GLONASS试验或研制的同时,科技人员还积极开展利用静止定点卫星进行区域性或全球性的定位与通信相综合的方案探讨和研制,如ATS、GEOSTAR、GRANAS、NAVSAT等等。在如此种目纷繁的星基无线电导航定位系统中,本书作者择应用最为广泛、国际上普遍关注的GPS系统为重点。在信号结构,定位原理,误差分析(第四章);提高伪距测量精度的方法,包括非差分法和差分法(第五、六章);抗SA技术和几何因子改善(第七章)方面作了详细的阐述。而对即将淘汰的第一代卫星定位系统——子午仪系统仅作了一般性的介绍(第三章)。鉴于GLONASS系统与GPS系统原理相同,作者仅就两者的差别,如卫星网结构;多址方式;坐标系统和伪随机噪声码码率等作了扼要的交待(第八章)。

具有提供全球定位能力的系统由一、二个国家管理与控制,特别是受军事部门控制的状况,难以在国际社会中赢得对其可靠性的信赖。何况美国在其GPS系统中引入了人为降低非特许用户定位精度的“SA”技术和对精测码P码引入了“AS”技术。在全球定位系统国际化和民间化的普遍要求下,国际海事卫星组织规划了由各国联合投资,共同经营管理的全球导航卫星系统(GNSS)。作者在第九章中介绍了这项分两步进行的规划,并指出在21世纪GNSS在民用范围内将替代GPS和GLONASS的前景。

作者还在第十章中具体介绍了GP-500型卫导仪,GPS/GLONASS组合导航仪和带电子海图的GPS接收机。

除此之外,作者在绪论中介绍了卫星导航的发展、分类和应用;在第二章及附录中提供了理解卫星导航系统原理所必需的天体运行规律及数学基础知识。

本书可作为高等航海学院驾驶通信专业教材,也可供导航通信专业工程技术人员参考。

陈祖恩
1997.6.12.

目 录

第一章 绪论	1
第一节 卫星导航发展概况.....	1
第二节 卫星导航系统的特点及分类.....	3
第三节 卫星导航系统的应用.....	4
第二章 卫星导航系统基础知识	7
第一节 空间直角坐标和地理坐标系.....	7
第二节 不同坐标系间的变换.....	9
第三节 卫星运行规律及基本轨道参数.....	11
第四节 伪码技术简介.....	13
第三章 子午仪卫星导航系统	19
第一节 地面支持网.....	19
第二节 卫星网提供的导航信息.....	20
第三节 导航仪定位原理.....	22
第四节 定位误差.....	27
第四章 导航星全球定位系统	29
第一节 地面支持网.....	29
第二节 卫星提供的导航信息.....	31
第三节 GPS 导航仪定位原理.....	36
第四节 GPS 定位误差.....	45
第五章 非差分的伪距精度改进	49
第一节 综合伪距、伪距率法.....	50
第二节 综合伪距、伪距率和载波相位法.....	53
第三节 综合伪距与积分多普勒法.....	60
第六章 差分 GPS	62
第一节 差分基准站.....	63
第二节 用户差分 GPS 接收机.....	69
第三节 差分 GPS 定位精度.....	73
第四节 差分 GPS 的发展.....	75
第七章 SA 和 GDOP 影响的改进	76
第一节 SA 影响的改进.....	76
第二节 GDOP 影响的改进.....	79
第八章 GLONASS 系统	82
第一节 地面支持网.....	82
第二节 卫星网及其导航信息.....	82

第三节	GLONASS 导航仪定位原理	86
第九章	全球导航卫星系统(GNSS)	89
第一节	国际海事卫星系统(INMARSAT)	89
第二节	INMARSAT-3 型卫星的导航功能	93
第三节	GPS/GLONASS 组合导航	95
第四节	第二代 GNSS	96
第十章	卫星导航仪	98
第一节	GPS 导航仪	98
第二节	GPS/GLONASS 组合导航仪	107
第三节	带电子海图的 GPS 接收机	110
附录 I	矩阵的概念和运算	128
附录 II	离散系统的数学描述	130
附录 III	估计理论简介	131
参考文献	134

第一章 绪 论

无线电导航是用无线电设备测定船舶、飞机及其它运载体的地理坐标,引导它们有目的地从一地向另一地运动的一门技术。

在民用上,飞机和船舶为完成运输任务,都必须选择经济、安全的航线。保证飞机和船舶的安全是航行中的首要任务,特别是大型油船的航行安全是关系到国际利益大事,一旦发生事故,则对海洋的污染将严重损害生物生态环境。飞机在上升、下降、着陆过程中,需要有安全的引导,以保障人身和财产不受损失。

电子技术的迅速发展,电子计算机、集成电路、新的电子元器件、电波传播的研究、信息论、自动控制理论、系统工程论在导航中的应用,促使导航技术、无线电导航设备及导航系统日新月异。目前,用于船舶中远程无线电导航系统有罗兰 C(LORAN-C)、奥米伽(OMEGA)、卫星导航等。

罗兰 C 是工作频率为 100kHz 的脉冲相位双曲线定位系统。一个导航台组的工作区域约 2000km,一般每个台组由 3~5 个地面导航台组成。为了覆盖全球,需设置 120 多个庞大的地面导航台。由于受地理及其它条件限制,地面导航台不是想建在哪里就能建的,因此该系统不能全球覆盖。其定位精度又受电波传播条件的限制,一般定位误差约为 200m~300m。定位精度还与用户和导航台组的相对位置有关,离导航台组越远,误差越大。

奥米伽是工作频率为 10kHz 左右的相位双曲线定位系统。奥米伽导航台的工作区域比罗兰 C 大得多,建八个地面导航台就可提供全球覆盖。因工作频率低,地面导航台的天线和地网更加庞大。由于极区异常,突然的电离层扰动等将使系统不能提供 24h 的全球覆盖。该系统的定位误差约 2km~3km。

罗兰 C 精度尚好,但系统覆盖区域受限制。奥米伽虽能全球覆盖,但精度较差,因此,这些系统越来越不能满足人们的需要。随着科学技术发展,人们从利用自然天体定位,逐步发展到设置人造天体来导航,即通过发射卫星群,由地面支持网测定卫星轨道等资料并发送给卫星,卫星将其位置和供测量的其它信息发送给用户,用户利用这种位置可知的空中航标,测得自己的位置。

卫星导航系统提供了全球、全天候、高精度的导航服务,越来越受到人们的欢迎。卫星导航系统之所以能实现,主要有以下两个原因:人们认识到卫星导航系统在提供导航定位信息方面具有巨大的优越性;使用部门已开始注意到其它各种导航系统的局限性。

第一节 卫星导航发展概况

美国子午仪卫星导航系统,也称海军卫星导航系统(NNSS)是世界上最早研制并试验成功的卫星导航系统,该系统由美国海军和约翰·霍普金斯大学应用物理实验室研制。1957 年应用物理实验室的研究人员在对前苏联发射的第一颗人造地球卫星进行观测时,发现地面接收站的位置一定时,在卫星通过接收站视界的时间内,所接收的无线电信号的多普勒频移曲线

与卫星的轨道有一一对应关系。这意味固定于地面的接收站,只要测得卫星通过其视界期间的多普勒频移曲线,就可确定卫星的轨道。若卫星运行轨道是已知的,那么根据接收站测得的多普勒频移曲线,便能确定接收站在地面的位置。于是提出了研制卫星导航系统的建议。1958年12月正式开始研制定名为海军导航卫星系统(NNSS)。1964年1月该系统正式投入使用,1967年7月美国政府宣布该系统兼供民用。该系统能在全世界范围内,全天候提供二维(经度、纬度)定位,定位精度 $0.1n\text{ mile}\sim 0.3n\text{ mile}$ 。但它不能连续定位,一次定位时间又较长,且不能确定用户的位置高度,因此使用受到限制。

1973年美国开始研制导航星系统(NAVSTAR),也称全球定位系统(GPS)。此系统比起子午仪系统有更高的全球定位精度,且能连续提供三维位置(经度、纬度、高度)、三维速度和精确时间,实现连续实时的导航定位。

GPS系统的研制分为三个阶段,第一阶段(1973年~1978年)是方案论证阶段,第二阶段(1979年~1985年)工程研制和系统试验阶段,测试结果表明系统达到预定设计目标。第三阶段为改善系统性能,整个系统投入使用阶段。1993年12月系统达到初始运行能力,1995年4月系统达到全运行能力。该系统建成运行后,将成为美国主要的无线电导航系统,子午仪系统及其它导航系统将由它替代。美国把发展GPS系统作为促进整个无线电导航系统现代化的核心,把建成GPS系统作为无线电导航领域进入21世纪的重要标志。

自从子午仪系统应用以来,卫星导航显示出巨大的优越性,促使世界各国都积极参与研究和开展工作,各国间也进行广泛的国际合作,联合研制各种卫星通信、导航系统。前苏联在1967年~1968年建立类似子午仪系统的奇卡达(Tsikada)卫星导航系统,它由6颗卫星组成卫星网,卫星轨道高度约1000km,绕地球一周105min,工作频率为400MHz和150MHz,该系统计划用到本世纪末。1978年前苏联又开始研制全球卫星导航系统(GLONASS),它类似于GPS系统。该系统1996年1月完成3个轨道24颗卫星星座的建设。这改变了由美国GPS一统天下的局面,建立一个多系统兼容共用的无线电导航新局面。

欧洲空间局1982年提出通过国际合作,建立一种民用的全球卫星导航系统,以满足海、空导航、搜索、营救、船舶进出港、民航飞机着陆等需要。其定位方法有两种:高精度用户采用编码测距法,定位精度可达10m;一般用户利用导航信号中的连续波载波分量,进行多普勒定位,定位精度约100m。1994年12月欧洲联盟理事会发出法令:一个泛欧卫星导航开发项目即全球民用导航卫星系统GNSS的建设将开始进行。第一步采用欧洲静止卫星导航重叠服务,即对现有GPS和GLONASS的星基进行增强,同时利用静止卫星广播进行区域增强服务。它具有三种服务:测距服务(把静止卫星作为附加的导航星);完善性广播(向用户广播完善性电文);差分修正服务(向用户广播差分修正数据)。该计划在1999年实现初始运行能力,2002年实现全运行能力。利用INMARSAT-3卫星上的测距服务开发工作已于1995年7月起动。

日本也正在研究发射一种区域性多功能卫星。计划1999年开始发射,其服务目标包括移动通信、导航、气象广播和科学研究。该系统也作为一种增强系统。其地面网由6个监测站、2个主控站、2个测距站、2个导航岸站、1个中央处理设施组成。其卫星发射与GPS卫星相似的伪码调制的 L_1 频率信号。载波频率和伪码时钟利用地面监测和测距台网进行闭环时基补偿。该系统计划在2001年达到初始运行,2005年达到全面运行。

国际民航组织正致力于建设一个包括GPS、GLONASS和国际海事卫星(INMARSAT)在内的国际性的全球卫星导航系统,用于提高卫星导航精度,弥补各个卫星导航系统的不足之

处,摆脱对少数国家的依赖,为国际商用航空飞行提供全球性服务。

总之,卫星导航还处于发展阶段,新的系统不断在研制,其目标是建立高性能、可同时满足多种要求的、安全可靠的卫星导航系统。

第二节 卫星导航系统的特点及分类

卫星导航系统是以卫星作为导航台的无线电导航系统,它通常由三部分组成:

1. 卫星:它是空间导航台,其功能是接收和贮存地面站制备的导航信息,再顺序向用户发射。它还接收来自地面站的控制指令并向地面站发射卫星的遥测数据。

2. 地面支持网:它由多种地面站和计算中心组成。其功能是收集来自卫星及与系统工作有关的信息源的数据,并对数据进行处理计算,产生导航信号和控制指令,再由地面注入站注入卫星。

3. 用户设备:其功能是接收和处理导航信号,进行定位计算,对用户进行导航。

卫星导航系统是一个庞大而又极复杂的系统,其主要的性能特点是:

1. 全球全天候导航

导航卫星的运行轨道一般离地面很高,如图 1-2-1 所示,卫星离地面越高,可见的地球表面越大。表 1-1 示出卫星高度、中心角、可见地面占地球总面积的百分比。

H :卫星离地面高度;

R :地球半径;

φ : \widehat{AB} 弧所对中心角。

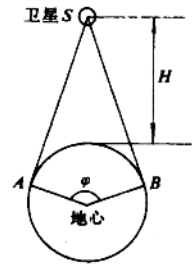


图 1-2-1

表 1-1

卫星种类	低高度卫星	中高度卫星		高高度卫星
卫星高度 H (km)	1 000	10 000	20 000	36 000
中心角 φ (°)	80	134	152	162
百分数(%)	6.7	30	38	42

卫星可见的地球表面称为卫星覆盖区域。由上可知,只需几颗高高度的卫星就可同时覆盖全球。卫星导航系统不象罗兰 C、奥米伽等系统受地理条件限制,它可按需要在各种轨道上配置要求数量的卫星。导航范围可从地面、水面、近地空间延伸到外层空间。它还不受气象条件、昼夜和地形地物的影响。大部分卫星导航系统的工作频率为甚高频或 L 波段,电波受电离层、对流层吸收衰减很小,所以卫星离地面虽然很高,且卫星辐射的平均功率一般也只有几瓦到几十瓦,但地面的用户仍可以接收到足够强的信号。

2. 高精度

一个导航系统的导航定位精度是说明该系统性能优劣的最重要指标。罗兰 C、奥米伽等导航系统的定位精度还与用户相对于导航台组的几何位置有关,而卫星导航系统可通过配置适当的卫星轨道和轨道上的卫星数目,使用户可选用几何位置配合得最好的一些卫星来进行导航定位,地球上任何地点的用户都可以这样做。这使卫星导航系统在全球都保持几乎同样良好的精度。

一般靠地面导航台进行导航的系统,其定位精度还受到地波、天波相互干扰的影响,而卫星导航系统利用直射波工作,不存在这类问题。但电离层和对流层对卫星发射的电波传播将产生附加延时,对电离层,对流层中传播规律的深入研究,已可给出精确模型,它们造成的误差可利用模型计算和实测有效地予以校正。

3. 多功能

多功能是指一种设备具有多种用途。卫星导航系统可综合成具有通信、导航、识别、授时等多种功能系统。

4. 庞复性

整个卫星导航系统庞大而复杂,卫星在宇宙环境中要连续工作数年。目前还不能在轨道上维修,因此要求卫星应具备极高的可靠性。地面支持网工程也很庞大,设备昂贵,为保证系统正常运行,需可观的维持费用。卫星导航系统涉及当今世界上的一些最先进的科学技术领域,因此建立这种系统需要巨额投资、强有力的科学技术组织领导、各科学技术部门的通力协作并通过反复的科学试验才能实现。

卫星导航系统的种类很多。按其测量的导航定位参数可分为:测角系统;测距、测距差及测距和系统;测速或测距离变化率系统。测角系统是利用测量电波传播方向来测定用户相对于某基准方向的夹角。为了提高精度,就必须有高精度的方向基准。测距、测距差及测距和系统都是通过测量电波在空间传播所需的时间来测定用户和卫星之间的距离、用户和卫星之间的距离差或用户到卫星及地面站的距离和。为了精确地测量电波在空间传播的时间,系统中必须有精确的时间基准——精密时钟。测速或测距离变化率系统是通过测量用户和卫星之间相对运动产生的电波频率的多普勒频移来测定用户和卫星之间的相对位置,为了准确测量多普勒频移,系统中应有准确的频率基准。精密的时钟也是一种高精度频率源。

按其工作方式可分有源系统和无源系统。有源系统是指用户不单接收信号还要发射信号,即用户设备通过卫星接收地面控制站发来的询问信号后,发出应答信号,经卫星转发给地面控制站,地面站再将用户所需要的导航数据通过卫星送给用户。这种系统用户、卫星设备简单,但地面控制站要接收和处理用户的信号,容量受限制。无源系统是指用户只接收而不发射信号。用户设备必须处理接收的导航信号,从中提取需要的信息并进行定位计算,所以用户设备复杂。但用户数量不受限制,且隐蔽性好。

按卫星运行轨道的高度可分为低轨、中轨、高轨系统。它们的轨道高度分别是 900km~2 700km、13 000km~20 000km、36 000km。卫星轨道越低,其覆盖区域越小且受大气阻力大,受地球影响大,因此卫星星历的精度较低。卫星轨道越高,其覆盖区域越大,星历精度也越高。当卫星运行轨道周期与地球自转周期相同,称这种轨道为同步轨道。当同步轨道与地球赤道面重合时,轨道上的卫星相对于地球是不动的,这种卫星称为静止卫星。

按其工作区域可分为全球覆盖系统和区域覆盖系统。

按用户的导航定位数据的情况,可分为间断和连续导航系统、实时和非实时导航系统。间断导航系统指用户在进行一次定位后,要间隔若干时间才能进行下一次定位,例如 NNSS 系统。连续导航系统指用户可连续进行定位,例如 GPS 系统。

第三节 卫星导航系统的应用

全球卫星导航的实现,使海上、陆地、空间的定位与导航发生了划时代的变革。全球卫星

导航系统可在全球范围内全天候地为海、陆、空用户提供高精度、连续的三维位置、速度和时间信息，其应用非常广泛。

一、海上应用

由于全球卫星导航系统可提供连续、高精度定位，使从事海洋运输的船舶可按最佳的航线航行，从而节省时间和燃料，提高航运效率。同时能够确保远洋船舶的安全航行，减少海洋事故。特别是通过海事卫星，可以使远离基地千万公里之遥的远洋船舶，时刻保持与基地的紧密通信联系，实时报告船舶在途精确位置，使远洋船舶更有安全保障。

全球卫星导航系统提供的精确船位加上电子海图将有助于海上船舶交通管理及港口的船舶导航。卫星提供的精密定位服务，有助于海底管路铺设的精确测量。

据报道，卫星导航不仅能提供船舶位置、速度，还可进行航向测量，即采用姿态测量系统，测出船舶的航向、横摇角、纵摇角，精度达毫弧度量级，可解决了传统磁罗经、陀螺罗经造价高，维修困难、精度较低的问题。

二、陆地应用

车辆作为人类活动的工具，起着越来越重要的作用，其发展速度也越来越快。智能汽车的出现是汽车工业史上的一个新的跃进。智能汽车主要利用了卫星导航定位系统和数字地图。这为驾驶员提供足够的交通、服务、安全等信息，特别是动态交通信息，使车辆可以有效利用现有道路设施，减少交通拥挤，提高运输效率。同时可以实现对特种车辆进行不间断跟踪监控，对车辆的安全提供保障。

全球卫星导航系统的导航技术为移动机器人的自主导航提供了强有力的手段，使之可以准确地移动在预定路径或目标上。在人类的探险活动中，卫星导航系统提供快速精确的定位，保证探险者不迷失方向。GPS 联合收割机系统，不仅用于引导收割机，而且辅助监测农作物产量。通过分析监测资料来确定如何在每个地块里变更作物和改良土壤，以增加产量。GPS 景点导游系统，可以实时为游客介绍已入景区的风光和景点。GPS 技术应用于地震监测，可提供精确的监测预报数据，以减少灾害造成的损失。

全球卫星导航系统在测绘行业中的应用，将能够更精确地测量地球和描述地球，获取精确的科学信息，为科学研究和经济建设提供更好的服务。

三、空中和空间的应用

国际民航组织已确定：卫星导航系统将成为空中交通管制(ATC)、导航(包括航路导航、终端区域导航)、监视、数据通信、非精密进场和着陆的唯一手段；卫星导航系统与其它系统的组合也是实现精密进场的主要方法。1995年9月，新西兰成为世界上航空界第一个全面使用卫星导航系统的国家。它利用GPS和数据通信卫星，解决了雷达盲区、HF无线电通信低效造成的问题。飞机上的GPS接收机确定飞机位置，并将其信息通过通信卫星传输到控制中心，则飞机的位置一目了然地显示在控制中心终端显示器上。

随着空间技术的应用和发展，现有的地面集中式空间飞行器测控体系越来越不适应日益频繁的空间飞行要求。全球卫星导航系统的应用和发展为空间飞行器提供了更为丰富和精确的导航信息，促使空间飞行器向自主化、智能化发展，从而使整个空间测量、控制体系从集中式向分布式转变。利用全球卫星导航系统，空间飞行器可以精确确定自身轨道和实时星历，从而

快速修正轨道偏差,减少对地面跟踪网的依赖。精确的时间信息可作为空间——地面时分多址通信的同步标准,实现所有空间飞行系统享用统一的时间标准。因此全球卫星导航系统的应用将有利于航天事业的发展 and 空间技术的广泛应用。

四、军事上的应用

全球卫星导航技术的应用和发展,对军队现代化建设的影响日益扩大。例如在军事指挥方面,全球卫星导航系统提供了统一的时间标准、目标精确的空间坐标及实时位置,因而对协同作战具有重要意义。可以为各级指挥系统提供各种目标和事件所发生的时间和地点。在统一的时间标准下实现快速同步通信,进行有效的电子战和反干扰。由于其高精度特性,可以在扫布雷、引导舰载飞机、提高导弹发射精度、测绘精确的军事地图、机动炮兵的定位和测量、车辆坦克的导航定位、搜索救援、作战人员野外定位等方面起可靠的保证作用。

总之,全球卫星导航系统是一个高精度、全天候和全球性的无线电导航、定位和定时的多功能系统。其技术已发展成多领域(陆地、海洋、航空、航天等)、多用途(在途导航、精密定位、精确定时、卫星定轨、资源调查、工程建设、海洋开发、交通管制等)、多机型(可持型、车载型、船载型、机载型、星载型、弹载型、测地型等)。它的发展趋势将成为跨学科、跨行业、用途广、高效益的综合性、国际性高新技术产业。

第二章 卫星导航系统基础知识

为了便于了解卫星导航系统,这里先介绍与卫星导航系统有关的基础知识。

第一节 空间直角坐标和地理坐标系

一、空间直角坐标系

卫星导航系统最基本的任务和其它导航系统一样是确定用户在地球上的位置。系统中地面支持网的台、站和用户的位置通常用地理坐标表示,卫星在空间的位置则通过轨道参数来表示。卫星在轨道运行,地球也在自转,选择的坐标系应便于将地理坐标、轨道参数、导航定位参数联系起来;应便于计及卫星在空间的复杂运动、地球自转等因素的影响,便于全球范围的定位计算。因此卫星导航系统常采用与地球牢固联接,也就是随着地球旋转的空间直角坐标系,如图 2-1-1 所示。坐标原点 O 在地心, XOY 面与地球赤道重合, OX 轴正向指向格林尼治午线与赤道的交点, OZ 轴与地球的极轴重合。

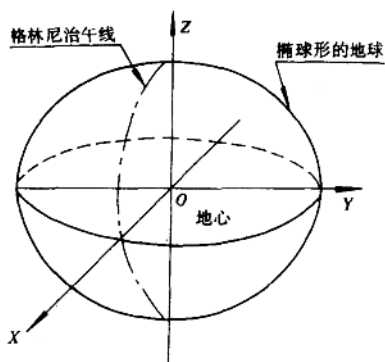


图 2-1-1

二、地理坐标系

用户或地面站在地球上的位置常用地理坐标,即经度、纬度、高度来表示。由于地球并非圆球,地球的赤道直径比地球两极间距离约大 20 多公里,以圆球来代替地球,误差就太大了。为了高精度定位,必须用与地球最吻合的椭球体来代替地球。最吻合是指所选取的椭球面和大地水准面之间的高度差的平方和最小。这个代表地球形状的椭球体称为基准椭球。大地水准面是指一个假设的无潮汐、无温差、无风、无盐的海面。实际地形、大地水准面、基准椭球的关系如图 2-1-2 所示。

地理坐标的基准圈是赤道,北极是基准圈的极。格林尼治午线,即通过英国伦敦格林尼治天文台的午线,作为计算经度的起始午线或称零度经线,它与赤道的交点是地理坐标的起算点。地面上某点的经度按下述方法来确定,以格林尼治子午线为基准,用格林尼治子午线与该点子午线之间所截之赤道短弧所对之球心角作为该点的经度,用 λ 表示。其计算方法:从格林尼治子午线起算,向东或向西,由 $0^\circ \sim 180^\circ$ 计量。向东计算的称作东经,用 E 标示;向西计算的称作西经,用 W 标示。地面上某点的纬度按下述方法确定:以赤道为基准,以子午线在该点的法线与赤道面的交角,作为该点的纬度,用 φ 表示。其计算方法是:从赤道起算,向北或向南,由 $0^\circ \sim 90^\circ$ 计量。在赤道以北的称作北纬,用 N 标示;在赤道以南的称作南纬,用 S 标示。

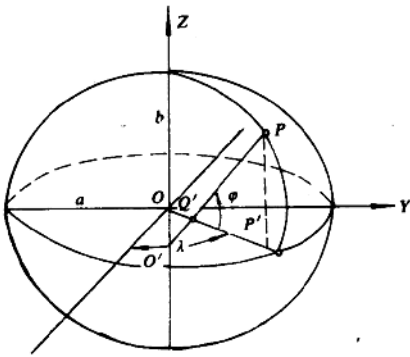


图 2-1-2

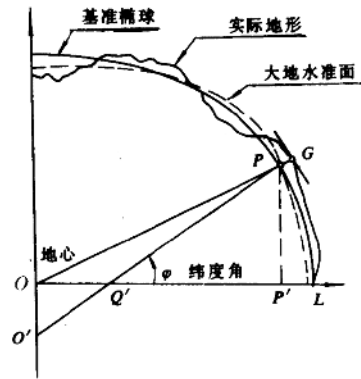


图 2-1-3

三、空间直角坐标与地理坐标的关系

由图 2-1-3 可见,基准椭球上任何一点 P 的经度、纬度分别为 λ 、 φ 。 P 点在空间直角坐标系的坐标为 X 、 Y 、 Z , 它们之间的关系可表示为:

$$\begin{aligned} X &= OP' \cos \lambda \\ Y &= OP' \sin \lambda \\ Z &= PP' \end{aligned} \quad (2-1)$$

因 $\triangle OO'Q'$ 与 $\triangle PP'Q'$ 相似, 所以

$$\begin{aligned} \frac{OO'}{PP'} &= \frac{O'Q'}{Q'P} \text{ 或 } \frac{OO' + PP'}{PP'} = \frac{O'Q' + Q'P}{Q'P} \\ O'P &= O'Q' + Q'P \\ Z' &= OO' + PP' \end{aligned}$$

则有
$$\frac{Z}{Z'} = \frac{Q'P}{O'P} \quad (2-2)$$

可证明:
$$\frac{Q'P}{O'P} = \frac{b^2}{a^2} = (1-f)^2 \quad (2-3)$$

a 、 b 分别为椭球半长轴和半短轴:

f 为扁平系数, $f = \frac{a-b}{a}$

从图 2-1-3 还可得到:

$$\begin{aligned} OP' &= O'P \cos \varphi \\ Z' &= O'P \sin \varphi \end{aligned} \quad (2-4)$$

综合(2-1)、(2-2)、(2-3)、(2-4)可得:

$$\begin{aligned} X &= O'P \cos \varphi \cos \lambda \\ Y &= O'P \cos \varphi \sin \lambda \\ Z &= O'P (1-f)^2 \sin \varphi \end{aligned} \quad (2-5)$$

设 $O'P$ 为 r ,

可证明
$$r = \frac{a}{\sqrt{\cos^2 \varphi + (1-f)^2 \sin^2 \varphi}} \quad (2-6)$$

若用户离基准椭球面的高度为 h , 则(2-5)可写为:

$$\begin{aligned} X &= (r+h)\cos\varphi\cos\lambda \\ Y &= (r+h)\cos\varphi\sin\lambda \\ Z &= [r(1-f)^2+h]\sin\varphi \end{aligned} \quad (2-7)$$

由下面公式也可根据空间直角坐标求出经度、纬度和高度。

$$\begin{aligned} \lambda &= \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{X}{Y}\right) \\ \varphi &= \operatorname{tg}^{-1}\frac{Z+(e')^2b\sin^2\theta}{P-e^2a\cos^2\theta} \\ h &= \frac{P}{\cos\varphi} - r \end{aligned} \quad (2-8)$$

式中:

$$\begin{aligned} P &= (X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}} \\ \theta &= \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{Za}{Pb}\right) \\ e^2 &= \frac{a^2 - b^2}{a^2} \\ (e')^2 &= \frac{a^2 - b^2}{b^2} \end{aligned}$$

第二节 不同坐标系间的变换

各种导航系统, 各国编制的海图及生产的导航仪, 选用了不同的基准椭球体, 即椭球体的参数不同, 从而形成了各种不同的坐标系。例如 NNSS 导航系统采用 1972 年的世界大地测量系统(WGS-72), GPS 导航系统从 1987 年 1 月 10 日起采用 WGS-84 系统。WGS-72 系统的椭球参数 $a=6\,378.135\text{km}$, $f=1/298.26$, WGS-84 系统的椭球参数 $a=6\,378.137\text{km}$, $f=1/298.257223563$, 这样同一目标在不同坐标系, 就会得出不同的经度、纬度值。为了高精度定位, 且定位结果具有共同的坐标系, 需要进行坐标系之间的变换。

一、空间直角坐标系间的变换

两个不同坐标系的空间直角坐标变换要综合考虑坐标原点的平移, 坐标轴之间的旋转以及由于两空间直角坐标系尺度因子不尽相同而引起的尺度变化。

若两坐标的原点不重合, 并已知由坐标原点平移引起的差值 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ , 则地球上某点在两坐标系中的直角坐标可用下式进行变换:

$$\begin{aligned} X_2 &= X_1 + \Delta X \\ Y_2 &= Y_1 + \Delta Y \\ Z_2 &= Z_1 + \Delta Z \end{aligned} \quad (2-9)$$

式中 X_1 、 Y_1 、 Z_1 是某点在坐标系 1 中的直角坐标; X_2 、 Y_2 、 Z_2 是某点在坐标系 2 中的直角坐标。

在两坐标原点重合情况下, 由于坐标轴旋转, 所引起的坐标变换有如下的关系式:

$$\begin{aligned}
 X_2 &= (\cos\Omega_Y \cos\Omega_Z - \sin\Omega_X \sin\Omega_Y \sin\Omega_Z) X_1 + (\sin\Omega_Z \cos\Omega_Y + \sin\Omega_X \sin\Omega_Y \cos\Omega_Z) \\
 &\quad \cdot Y_1 - (\sin\Omega_Y \cos\Omega_Z) Z_1 \\
 Y_2 &= -(\sin\Omega_Z \cos\Omega_X) X_1 + (\cos\Omega_Z \cos\Omega_Y) Y_1 + (\sin\Omega_X) Z_1 \\
 Z_2 &= (\cos\Omega_Z \sin\Omega_Y - \sin\Omega_X \cos\Omega_Y \sin\Omega_Z) X_1 + (\sin\Omega_Z \sin\Omega_Y - \sin\Omega_X \cos\Omega_Y \cos\Omega_Z) \\
 &\quad \cdot Y_1 - (\cos\Omega_Y \cos\Omega_Z) Z_1
 \end{aligned}$$

式中 $\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z$ 为旋转角。

当旋转角很小时, 上式可简化成

$$\begin{aligned}
 X_2 &= X_1 + \Omega_Z Y_1 - \Omega_Y Z_1 \\
 Y_2 &= -\Omega_Z Y_1 + Y_1 + \Omega_X Z_1 \\
 Z_2 &= \Omega_Y X_1 - \Omega_X Y_1 + Z_1
 \end{aligned} \tag{2-10}$$

可用矩阵形式来表示:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Omega_Z & -\Omega_Y \\ -\Omega_Z & 1 & \Omega_X \\ \Omega_Y & -\Omega_X & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \tag{2-11}$$

两个不同的坐标系统间的空间直角坐标变换可用下面的公式:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1+k) \begin{bmatrix} 1 & \Omega_Z & -\Omega_Y \\ -\Omega_Z & 1 & \Omega_X \\ \Omega_Y & -\Omega_X & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \tag{2-12}$$

式中: $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 是坐标原点平移引起的。

k 是尺度因子, 它表明两坐标系统间的长度标准不同。

$$\begin{bmatrix} 1 & \Omega_Z & -\Omega_Y \\ -\Omega_Z & 1 & \Omega_X \\ \Omega_Y & -\Omega_X & 1 \end{bmatrix} \text{ 是旋转矩阵。}$$

二、地理坐标的变换

如果已知原点移动量($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)后, 可以用下式计算地理坐标的修正值。

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi'' &= \frac{1}{M \sin^2 \lambda} [(a \Delta e^2 + e^2 \Delta a) \sin\varphi \cos\varphi + a e^2 \Delta e^2 \sin^3 \varphi \cos\varphi - \sin\varphi \cos\lambda \Delta X \\
 &\quad - \sin\varphi \sin\lambda \Delta Y + \cos\varphi \Delta Z] \\
 \Delta\lambda'' &= \frac{1}{\lambda \cos\varphi \sin^2 \lambda} (\cos\lambda \Delta Y - \sin\lambda \Delta X) \\
 \Delta h &= \cos\varphi \cos\lambda \Delta X + \cos\varphi \sin\lambda \Delta Y + \sin\varphi \Delta Z - r (1 - e^2 \sin^2 \varphi) \frac{\Delta a}{a} \\
 &\quad + M (1 - e^2 \sin^2 \varphi) \sin^2 \varphi \frac{\Delta e^2}{2(1-a)}
 \end{aligned} \tag{2-13}$$

式中: φ, λ 为原坐标系的经、纬度;

$M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}$, 为原坐标系子午圈曲率半径;

$r = \frac{a}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}}$, 为原坐标系东西圆曲率半径;

$\Delta a = a_{\text{新}} - a$, a 为半长轴;