



卫星导航系列丛书

卫星导航定位工程

(第2版)

The Engineering of Satellite Navigation and Positioning



谭述森 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

卫星导航系列丛书

卫星导航定位工程

The Engineering of Satellite
Navigation and Positioning

(第2版)

谭述森 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航定位工程/谭述森编著. —2版. —北京:
国防工业出版社, 2010. 7

(卫星导航系列丛书)

ISBN 978-7-118-06711-8

I. ①卫... II. ①谭... III. ①卫星导航—全球
定位系统(GPS) IV. ①TN967. 1②P228. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 121509 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 700 × 1000 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 276 千字

2010 年 7 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 42.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

序

卫星导航系统已成为当今发达国家国防及经济基础的重要组成部分,是国家综合国力及科学技术发展水平的重要标志之一。自 20 世纪 50 年代人造地球卫星上天以来,最具有经济实力和空间技术水平的美国 and 苏联/俄罗斯先后建成了两代卫星导航系统。今天, GPS 和 GLONASS 不但是导航史上的重大贡献,成为国防和国家兴旺发达最具影响力的因素,而且已步入人们的生活,成为方便交通、繁荣物流、丰富生活的工具。21 世纪以来,以德国、法国、意大利为代表的欧盟,亚洲的日本、印度以及非洲的大国先后启动了卫星导航计划,形成了对空间导航资源的激烈竞争局面,以快速手段建成自己的导航系统,从而站在世界经济一体化的前列已成为共识。在卫星导航领域,世界各国的目标大体相同,但建设什么样的系统? 如何建设卫星导航系统? 各国有不同的答案。中国从 20 世纪 90 年代步入卫星导航领域以来,制定了适合中国国情的卫星导航发展计划和策略。希望在卫星导航理论、科学及工程实践方面能高瞻远瞩、勇于创新,也希望卫星导航知识迅速普及,让人们共同分享这一重大成果带来的喜悦。本书阐述了建设先进卫星导航系统的观点、理论及工程实践,可供卫星导航系统及应用科技人员参考。

张松林

前 言

当代卫星导航系统已成为主要发达国家的重要基础设施。美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)和俄罗斯的全球卫星无线电导航系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)均于20世纪90年代中期建成。这两大系统不但已成为重要军事装备,而且在全球导航定位、高精度时间传递、航天器测控等领域获得广泛应用。欧盟从20世纪末开始建设伽利略卫星导航系统。我国于20世纪90年代中期开始建设中国北斗卫星导航系统。由于不断增长的用户需求和各国国情的差异,当代卫星导航系统在工作体制、定位原理、集成功能、主要性能指标等方面向多样化、高需求发展。不但有工作在卫星无线电导航(RNSS)原理下的GPS、GLONASS,还有工作在无线电测定(RDSS)与RNSS集成方式下的中国北斗卫星导航系统。从单一的定位功能向导航、通信、识别高度集成方向发展。为了向卫星导航用户和科技人员介绍当代卫星导航系统技术和应用技术,从工程建设实际出发,编写了这本《卫星导航定位工程》(第2版)。

本书共分14章。第1章介绍了当代主要卫星导航系统的诞生,发展及未来计划。第2章~第6章介绍了工作在卫星无线电测定原理的卫星定位工程,内容包括业务类型、定位原理、系统工程设计、系统完好性与安全性、抗干扰与低暴露技术等,有助于读者了解中国卫星导航系统的起步与发展思路。从第7章~第12章,系统介绍了工作在RNSS原理下的卫星导航系统,帮助读者系统了解GPS、GLONASS等的定位测速原理、系统性能需求与总体设计、导航体制设计、运行控制系统设计、导航卫星及导航载荷设计、用户机设计;介绍了集RDSS与RNSS为一体的新型集成设计思路;提出了集导航、通信、识别为一体的发展方向。第13章通过对国外应用资料的编译,介绍了国外应用技术实例,包括惯性导航速度辅助、时域滤波抗干扰技术、调零天线抗干扰技术、卫星导航与惯导组合系统、美国在战术导弹防御系统拦截导弹上的应用技术、导弹投放与制导应用技术,通过上述内容的介绍可以帮助读者了解当代卫星导航应用水平。第14章为用户机测试技术,介绍了用户机模拟测试的基本方案。

在本书的编写过程中,得到各级部门和有关专家的关怀与支持。王刚研究员

提供了静态用户相对运动的特性模拟计算结果,航天科技集团提供了 GLONASS 译文资料,陈向东博士、赵文军高工、张爱勇、莫中秋、瞿稳科、沈菲、杨华、魏刚、李艳艳、焦诚、朱伟刚、赵静、侯莉、闫建华、罗可可等为文稿录入、打印、插图绘制付出了辛勤劳动。许其凤院士和谢有才研究员对本书进行了认真的审改,并提出了宝贵的修改意见。在此,一并表示衷心感谢。

由于编写者水平和工程经验有限,书中错误在所难免,敬请广大读者指正。

作者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 历史资料	1
1.2 GPS 进展和未来计划	4
1.3 GLONASS 进展和未来计划	6
1.4 中国卫星导航系统进展和未来	9
1.5 伽利略卫星导航系统	11
第 2 章 卫星定位工程概念与应用前景	12
2.1 卫星定位业务	12
2.2 业务类型与频率分配	13
2.3 系统干扰分析及对策	15
2.3.1 L 频段干扰分析	15
2.3.2 S 频段干扰分析	16
2.4 卫星定位工程的业务优化	16
2.4.1 RDSS 与 MSS 集成	17
2.4.2 RDSS 与广域增强系统(WAAS)集成	17
2.4.3 RDSS 与中继卫星系统(TDRSS)集成	17
2.5 RDSS 应用	18
2.5.1 航空应用	18
2.5.2 航天应用	19
2.5.3 航海应用	20
2.5.4 陆上交通应用	20
2.5.5 危险困难场地监控	20

第3章 卫星定位基本原理	21
3.1 定位理论	21
3.2 影响定位精度的主要因素	25
3.3 MCC 时延测量精度	25
3.4 空间传播时延误差	26
3.5 几何图形与定位精度 ^[3]	27
3.6 用户高程与定位精度	28
第4章 卫星定位系统工程设计	31
4.1 系统组成	31
4.2 系统功能设计	32
4.2.1 出站功能设计	32
4.2.2 进站功能设计	33
4.2.3 系统处理能力	34
4.3 系统技术指标设计	34
4.3.1 系统覆盖区域	34
4.3.2 系统容量设计	35
4.3.3 系统定位精度设计	37
4.4 系统信号体制设计 ^[1]	38
4.4.1 出站信号设计	38
4.4.2 进站信号设计	39
4.5 系统频率设计	40
4.5.1 转发器频率稳定性对系统性能的影响	40
4.5.2 星地校频方案	41
4.6 定位卫星工程设计	42
4.7 测量控制中心 MCC 工程设计	44
4.7.1 MCC 出站链路设计	44
4.7.2 MCC 进站链路设计	44
4.7.3 卫星轨道确定和预报	45
4.7.4 双星广域差分处理	46
4.7.5 MCC 业务处理	48
4.8 RDSS 应用系统设计	49

4.8.1	单址型用户机	49
4.8.2	多址型用户机	49
第5章	RDSS 系统完好性及安全性	50
5.1	完好性监测可行性	50
5.2	完好性监测与报告流程	51
5.2.1	完好性系统基本组成	51
5.2.2	定位精度完好性	51
5.2.3	定时完好性	51
5.3	RDSS 系统安全性	52
5.3.1	传输链路的信息安全性	52
5.3.2	传输链路的系统安全性	52
第6章	卫星定位用户抗干扰与低暴露技术	53
6.1	自适应空域滤波的原理	53
6.2	自适应滤波的基本算法	54
6.3	自适应调零天线工程设计	57
6.4	低暴露发射阵列天线设计	57
第7章	卫星导航概念与定位测速原理	59
7.1	卫星导航概念	59
7.2	卫星导航原理	63
7.2.1	导航任务的解决方法	63
7.2.2	伪距的概念与定义	64
7.2.3	导航定位方程 ^[3]	65
7.3	几何精度因子	67
7.4	卫星导航测速原理 ^[3]	69
7.5	定位测速精度	71
7.5.1	全球系统的定位精度	71
7.5.2	全球+区域增强系统定位精度	71
7.5.3	全球+区域+本地增强定位精度	72
7.6	距离差分与径向速度差分	72
7.7	组合方法	73

7.8	载波相位差分法	73
第8章	卫星导航系统性能需求与总体设计	75
8.1	RNSS 的必备性能	75
8.1.1	RNSS 增值性能	80
8.1.2	RNSS 高维性能	80
8.2	总体设计的任务与流程	81
8.3	工程设计的任务与流程	83
第9章	卫星导航体制设计	85
9.1	体制设计原则及设计内容	85
9.1.1	设计原则	86
9.1.2	设计内容	87
9.2	服务方式及内容	87
9.3	卫星轨道及星座选择	89
9.3.1	轨道高度	89
9.3.2	星下点轨迹及其对测控方案的影响	90
9.3.3	轨道平面及星座卫星数量	91
9.3.4	卫星轨道种类的选择	96
9.4	信号频率与调制编码方式	97
9.4.1	导航信号频率选择原则	97
9.4.2	国际电信联盟推荐的导航频率	97
9.4.3	信号频率及带宽选择	100
9.4.4	卫星多址识别与测距码设计	101
9.4.5	导航信号调制方式	108
9.4.6	导航电文有选择的纠错编码	113
9.4.7	北斗操作者对卫星导航频率兼容的主张及北斗信号 结构	115
9.5	卫星导航的时间标准与计时方式	116
9.5.1	卫星导航时间系统	117
9.5.2	世界时 UT	117
9.5.3	协调世界时	117
9.5.4	儒略周期	118

9.5.5	卫星导航时(SATNAV T)的计时方法	118
9.6	导航卫星运动轨迹与星历表达方式 ^[13]	120
第10章	卫星导航运行控制系统设计	127
10.1	卫星导航运行控制系统的任务与组成	127
10.2	卫星时间同步与定时	128
10.2.1	星地时间同步方法	128
10.2.2	站间时间同步方法	131
10.2.3	用户定时服务	132
10.2.4	卫星钟差预报模型	132
10.3	导航信号空间传播时延校正	133
10.4	精密定轨与轨道修正	138
10.5	完好性监测与预报	140
10.5.1	星地双向伪距时间同步分离卫星完好性	141
10.5.2	DLL 相关监测卫星载荷完好性	141
10.6	运行控制系统集成	143
10.6.1	RNSS 与 RDSS 相结合实现导航通信与识别三大功能集成	143
10.6.2	多系统信息融合与国外系统的集成	145
10.7	多系统联合广域增强系统的运行与控制	145
10.7.1	系统组成	145
10.7.2	系统工作原理	146
10.7.3	GEOs 卫星校正参数及完好性广播电文	148
10.7.4	卫星完好性监测	149
10.7.5	监测站组成	150
10.7.6	主控站联合广域差分软件功能	151
第11章	导航卫星和导航载荷	155
11.1	卫星和导航载荷历史	155
11.2	导航卫星平台	161
11.3	导航载荷要求	162
11.4	GPS 卫星导航载荷 ^[13]	163
11.4.1	原子频标	163

11.4.2	星上处理	164
11.4.3	频段系统	164
11.4.4	横向链路	165
11.4.5	自主导航	165
11.5	GLONASS 导航卫星及导航载荷	168
11.5.1	GLONASS 导航卫星功能	168
11.5.2	卫星组成	169
11.6	伽利略导航卫星及导航载荷可选方案 ^[15]	171
11.6.1	卫星定义	173
11.6.2	MEO 卫星配置	173
11.6.3	MEO 卫星导航有效载荷	176
11.6.4	GEO 卫星及导航载荷	177
11.7	北斗卫星导航载荷	177
11.8	导航载荷比较与发展方向	177
第 12 章	卫星导航用户机	179
12.1	用户与卫星间相对运动特性	179
12.2	伪距测量及误差分析	185
12.2.1	伪距误差类型及特性	186
12.2.2	动态应力误差	186
12.2.3	伪距随机误差	187
12.2.4	伪距平滑技术	189
12.3	定位与滤波处理	189
12.3.1	α/β 跟踪器 ^[12]	189
12.3.2	卡尔曼滤波器 ^[12]	193
第 13 章	导航用户机应用实例	200
13.1	航天用户机的捕获与跟踪	200
13.1.1	码跟踪极限	200
13.1.2	载波跟踪极限	201
13.1.3	仅有码捕获跟踪模式	201
13.1.4	捕获处理理论	203
13.1.5	仅有码的捕获模型	205

13.1.6	仅有码的轨道自主导航	206
13.1.7	DIOGENE 精密 GPS 导航仪	207
13.1.8	TOPSTAR 3000 接收机	208
13.2	用户机的惯导速度辅助技术 ^[25]	208
13.2.1	DLL 传递函数	209
13.2.2	等效噪声带宽	210
13.2.3	跟踪环性能分析	212
13.2.4	过渡响应时间	212
13.3	用户机时域滤波器抗干扰技术 ^[23]	214
13.3.1	干扰对卫星导航完好性的威胁	214
13.3.2	解除用户机威胁的方案综述	214
13.3.3	利用时间滤波器抗干扰的实用考虑	216
13.3.4	Mayflower AIC _s 介绍	217
13.4	用户机调零天线抗干扰技术 ^[24]	220
13.4.1	基于算法的最佳权和梯度	220
13.4.2	导航接收机自适应相位圆阵列	221
13.5	卫星导航兼容接收机 ^[1]	225
13.5.1	多系统兼容的可行性	225
13.5.2	兼容机工作模式及性能设计	231
13.5.3	兼容机的基本组成及工作原理	232
13.6	卫星导航多模用户机	237
13.6.1	多模用户机的基本组成与工作模式	237
13.6.2	基本工作原理	239
13.7	卫星导航与惯性导航组合系统	240
13.7.1	非耦合方式	241
13.7.2	松耦合方式	242
13.7.3	紧耦合方式	242
13.7.4	组合算法	242
13.8	接收机自主完好性	245
13.8.1	RAIM 概念	245
13.8.2	CAT - I 完好性计算基本依据	246
13.9	卫星导航在战术导弹防御系统拦截导弹上的应用	247
13.9.1	任务概述	247

13.9.2	GAINS 概况	247
13.9.3	导航和雷达对准处理	249
13.9.4	性能评估处理	250
13.9.5	GAINS 实验室及野外测试及结论	254
13.10	卫星导航在导弹投放与制导上的应用	254
13.10.1	性能概述	254
13.10.2	GPS/GYRO/DOP 制导及导航和控制系统	255
13.10.3	协方差分析	256
13.10.4	结论	259
第 14 章	卫星导航用户机模拟测试系统	260
14.1	测试系统基本输入条件	260
14.1.1	星座	260
14.1.2	传播时延	260
14.1.3	用户动态性能	261
14.1.4	数字模拟量	261
14.1.5	信号模拟量	261
14.2	伪距测试基本方案	261
14.3	用户机测试基本方案	262
14.3.1	用户机测试的基本任务	262
14.3.2	用户机模拟测试基本方案	262
14.3.3	仿真关键技术	263
14.4	用户机模拟测试评价系统	265
14.4.1	仿真系统数据输出	265
14.4.2	被测用户机输出数据	265
14.4.3	误差计算方法	266
参考文献		267

第1章 概述

卫星导航定位是卫星无线电导航定位的简称。利用卫星发射的无线电信号确定用户的位置矢量 $\mathbf{R} = (X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}, T)$ 的方法称为卫星无线电导航定位技术。 (X, Y, Z) 为用户在地固坐标系中的位置坐标, $(\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$ 为用户的速度分量, T 为用户处于 (X, Y, Z) 坐标的时刻。实现卫星无线电导航定位目标的卫星、地面运行控制系统和应用系统三大部分组成卫星导航定位系统。

20 世纪 60 年代相继由美国、苏联建成的子午仪 (Transit) 和圣卡达只能获得用户在静态条件下的位置坐标 (X, Y, Z) , 如果获得运动过程中的位置坐标, 必须已知船舶的运动速度。由美国和俄罗斯建成的第二代卫星导航定位系统——GPS 和 GLONASS, 可以为包括地球上或近地空间任一点上的航天、航空、航海及地面用户连续实现非应答式高精度定时、空间三维定位及运动速度测量。与第一代卫星导航系统相比, 在系统的称呼、定位原理、定位方法等方面都有相当大的差异。中国的第一代卫星导航定位系统利用了与上述完全不同的定位原理。由用户以外的地面控制系统完成用户定位所需的无线电导航参数的确定和位置计算, 称为卫星无线电测定业务, 英文全称为 Radio-Determination Satellite Service (RDSS)。RDSS 与现代卫星导航技术相结合, 构成了集导航、通信、识别为一体的多功能航天应用系统。

在本书的相应章节, 将只能确定用户位置坐标的系统称为卫星定位系统。能完整确定用户位置矢量的系统称为卫星导航系统, 英文全称为 Radio Navigation Satellite System (RNSS)。

1.1 历史资料

在俄罗斯 B·H·哈里可夫等编辑、B·阿波金等撰写的《全球卫星无线电导航系统》中, B·Q·纳尔托布认为: 第一个利用人造地球卫星进行导航的科学设想诞生在 1957 年 10 月 4 日苏联第一颗人造卫星发射之前。在 1955 年—1957 年间, 列宁格勒马让斯基空军工程科学院在谢布萨维奇教授的领导下, 进行了用无线电天文

学方法实现飞机领航的可行性研究。研究资料在1957年10月发表于各部门间的讨论会和研讨班中。

在列宁格勒马让斯基空军工程科学院、苏联科学院理论天文研究所、苏联科学院电动机械研究所及有关院所完成的有关“卫星”的课题研究中(1958年—1959年),低轨道卫星无线电导航系统的科学基础取得了实质性进展。一些专家不仅在分析力学与轨道计算等方面取得了进展,并将注意力集中到提高导航定位的精度,保证使用的全球性、全天候性上面。上述工作的结果,使苏联于1963年转向了第一个低轨道系统的工程研制。并命名为“圣卡达”(Цикада),有的翻译为“蝉”。并于1967年11月27日发射了第一颗导航卫星——“宇宙”-192(Космос-192)。卫星及运载火箭由克拉斯纳亚尔斯克(Красноярский)的应用力学科研生产联合体研制。导航卫星采用150MHz和400MHz频率发射导航信号。这颗卫星的定位均方根误差为250m~300m。

1979年交付使用的第一代圣卡达导航系统由4颗导航卫星组成,位于高度在1000km的圆轨道上,倾角 83° ,轨道面沿赤道均匀分布。它允许用户平均每1.5h~2h与其中一颗导航卫星进行一次无线电联系,并在5min~6min的一次观测中确定自己的位置坐标。

在实验中发现,导航的主要误差来自于卫星广播的星历误差。卫星星历由地面综合控制设施测定并注入卫星。努力提高星历精度是提高定位精度的关键,因为电离层传播时延误差已有双频无线电导航信号予以削弱。在“宇宙”-842和“宇宙”-911上所进行的大地测量工作和地球物理研究工作的成果,促进了卫星导航的发展。将星历昼夜的预报精度提高到70m~80m,船舶的定位精度提高到80m~100m,在用户设备的研制方面,成功研制了“史胡娜”和“切恩”。其中,“切恩”还可为美国的子午仪无线电导航系统提供校正。

在后来的“圣卡达”卫星上还装备了用于发现灾祸目标的测量接收机。灾祸目标上装备了专门的无线电信标,它们可以发射频率在121MHz~406MHz的灾难信号。这些信号被“圣卡达”卫星接收后,传输到专门的地面站。在那里计算出发生灾祸的目标(船、飞机等)的准确位置坐标。

装备了灾祸发现设备的“圣卡达”卫星组成了“卡司帕司”(Коспас)系统。它和美国—法国—加拿大的“萨尔撒特”(Сарсар)系统共同形成了统一的发现灾祸的救助系统。

低轨道卫星导航系统的成功,吸引了包括航空、陆上车辆、海洋、飞船在内的用户的广泛关注,由于上述系统难以满足用户需求,于是开展了高度为20000km的卫星导航系统的研究,这就是GLONASS的诞生和发展史。

与此同时,美国在1958年建造第一代“水下导弹”巴列里斯时,建立了子午仪导航系统,于1964年服役。

GPS 联合办公室首次负责人帕金森撰写的“卫星导航历史”^[1,17] 文章中介绍,自 1957 年 10 月 4 日苏联第一颗人造卫星上天,在约翰霍普金斯大学应用物理研究所的弗兰克 T·麦柯卢尔利用了乔治 C·韦范巴赫和威廉 H·吉尔发现的多普勒效应,发明了第一个卫星导航系统。他们仔细地测量了由星载发射机与旋转地球上固定接收机间相对运动而产生的多普勒频移,通过对多普勒曲线的分析,就能相当准确地测定人造地球卫星的轨道,而麦克卢尔的概念就是让在轨卫星发射稳定的频率信号,地面固定接收机首先测出多普勒频率,为卫星精确定轨。而需要导航的用户测量多普勒频移,利用精确的轨道参数确定自己的位置,达到导航定位的目的。而且,卫星轨道参数是利用测量卫星发射的信号传播的,子午仪的卫星轨道高度为 1075km,轨道周期 167min,由 6 颗卫星组成的轨道犹如一个笼子,交点在两极的上空。同样采用 150MHz 和 400MHz 两个频率发射无线电导航信号。1960 年发射第一个子午仪卫星,1963 年系统建设成功,1967 年向民用开放。与苏联的“圣卡达”相比,先于 12 年投入使用。子午仪的名声和效率超过了“圣卡达”。截止 1996 年子午仪正式退役,连续为美国海军和民用用户服务了 33 年。

中国卫星导航系统的研究虽然在 20 世纪 60 年代末有过研制一个类似于“子午仪”的计划,直到 1983 年初才开始酝酿利用地球静止轨道卫星进行导航定位的技术方案,首先由中国学者陈芳允院士,提出了利用两颗地球静止轨道卫星测定用户位置的卫星无线电定位系统的概念,可见差距和难度之大。与此同时,美国 PRINLETON 大学物理学教授 Gerard K. o' Neill 博士进行了同样的研究,并于 1985 年 7 月,美国联邦通信委员会(FCC)以导航和个人通信为目标,命名为卫星无线电测定业务,英文全称为 Radio Determination Satellite Service(RDSS),1986 年 6 月, FCC 批准了这个标准,并得到国际电信联盟(ITU)的认可。中国的卫星导航在 RDSS 基础上起步,这种导航系统的特点是,由用户以外的中心控制系统,通过用户对卫星信号的询问、应答获得距离观测量,由中心控制系统计算用户的位置坐标,并将此信息传送给用户。这种具有定位和个人通信功能的系统,有效地将导航定位与通信相结合。在中国卫星导航起步的关键时刻,特别值得记忆的重要人物除以陈芳允院士为代表的科研工程专家外,还有时任国防科工委副主任的沈荣骏,参与军事测绘和航天技术部门领导的卜庆君、艾长春等,他们在推动卫星导航的迫切性和经济可行性的结合上发挥了重要作用。1994 年“双星导航定位系统”立项,2000 年 10 月 31 日、12 月 21 日成功发射了两颗北斗导航卫星,建成了中国第一代卫星导航定位系统,2003 年 5 月 25 日发射了第三颗北斗导航卫星,使系统进入稳定运行阶段。

在经历了第一代卫星导航系统研制与应用以后,各国在不同的条件下,开始了第二代卫星导航系统的研制与建设,ITU 成员国于 1979 年召开 WRC-79 大会