



“十二五”国家重点图书出版规划项目
电子与信息工程系列

PRINCIPLES OF SATELLITE NAVIGATION AND POSITIONING

卫星定位导航原理

● 孟维晓 韩帅 迟永钢 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



“十二五”国家重点图书出版规划项目
电子与信息工程系列

PRINCIPLES OF SATELLITE NAVIGATION AND POSITIONING

卫星定位导航原理

● 孟维晓 韩帅 迟永钢 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

本书全面讲述了全球卫星定位导航系统的基本组成和原理、导航卫星星座及其轨道、导航卫星信号与传输、定位接收机天线与前端器件和性能、接收机基带信号处理方法、捕获跟踪过程、定位信息解算原理、定位误差分析、辅助增强与组合导航技术。并适当给出应用实例,使读者能全面掌握多种全球卫星导航系统的基本原理和关键技术。同时,本书还给出实验指导,结合教学和实验的各个环节,让读者在学到知识的同时,通过动手实验环节获得更多直观感性的认识,培养综合应用知识的能力,从而为我国的卫星定位导航领域培养优秀的理论研究和工程技术人才。

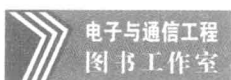
本书可以作为高等院校信息通信、航空航天、测绘遥感和自动控制等学科的本科和研究生教材,也可以作为相关行业工程师和研究人员的参考工具书籍。

图书在版编目(CIP)数据

卫星定位导航原理/孟维晓,韩帅,迟永钢编著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2013.9
ISBN 978-7-5603-4221-4

I. ①卫… II. ①孟…②韩…③迟… III. ①全球定位系统-卫星导航-研究 IV. ①P228.4②TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 197416 号



责任编辑 刘瑶 李长波

封面设计 刘洪涛

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006

传真 0451-86414749

网址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18.75 字数 452千字

版次 2013年9月第1版 2013年9月第1次印刷

书号 ISBN 978-7-5603-4221-4

定价 35.00元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

“十二五”国家重点图书 电子与信息工程系列

编 审 委 员 会

顾 问 张乃通

主 任 顾学迈

副 主 任 张 晔

秘 书 长 赵雅琴

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 钢 邓维波 任广辉 沙学军

张钧萍 吴芝路 吴 群 谷延锋

孟维晓 赵洪林 赵雅琴 姜义成

郭 庆 宿富林 谢俊好 冀振元

序

FOREWORD

教材建设一直是高校教学建设和教学改革的主要内容之一。针对目前高校电子与信息工程教材存在的基础课教材偏重数学理论,而数学模型和物理模型脱节,专业课教材对最新知识增长点和研究成果跟踪较少等问题,及创新型人才的培养目标和各学科、专业课程建设全面需求,哈尔滨工业大学出版社与哈尔滨工业大学电子与信息工程学院的各位老师策划出版了电子与信息工程系列精品教材。

该系列教材是以“寓军于民,军民并举”为需求前提,以信息与通信工程学科发展为背景,以电子线路和信号处理知识为平台,以培养基础理论扎实、实践动手能力强的创新型人才为主线,将基础理论、电信技术实际发展趋势、相关科研开发的实际经验密切结合,注重理论联系实际,将学科前沿技术渗透其中,反映电子信息领域最新知识增长点和研究成果,因材施教,重点加强学生的理论基础水平及分析问题、解决问题的能力。

本系列教材具有以下特色:

(1) **强调平台化完整的知识体系。**该系列教材涵盖电子与信息工程专业技术理论基础课程,对现有课程及教学体系不断优化,形成以电子线路、信号处理、电波传播为平台课程,与专业应用课程的四个知识脉络有机结合,构成了一个通识教育和专业教育的完整教学课程体系。

(2) **物理模型和数学模型有机结合。**该系列教材侧重在经典理论与技术的基础上,将实际工程实践中的物理系统模型和算法理论模型紧密结合,加强物理概念和物理模型的建立、分析、应用,在此基础上总结牵引出相应的数学模型,以加强学生对算法理论的理解,提高实践应用能力。

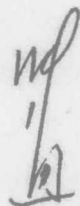
(3) **宽口径培养需求与专业特色兼备。**结合多年来有关科研项目的科研经验及丰硕成果,以及紧缺专业教学中的丰富经验,在专业课教材编写过程中,在兼顾电子与信息工程毕业生宽口径培养需求的基础上,突出军民兼用特色,在

满足一般重点院校相关专业理论技术需求的基础上,也满足军民并举特色的要求。

电子与信息工程系列教材是哈尔滨工业大学多年来从事教学科研工作的各位教授、专家们集体智慧的结晶,也是他们长期教学经验、工作成果的总结与展示。同时该系列教材的出版也得到了兄弟院校的支持,提出了许多建设性的意见。

我相信:这套教材的出版,对于推动电子与信息工程领域的教学改革、提高人才培养质量必将起到重要推动作用。

哈尔滨工业大学教授 张乃通
中国工程院院士



2013年8月于哈工大

前 言

PREFACE

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellites System, GNSS)是当前全球发展最快的三大信息产业之一。目前世界上有三个已经投入运行的卫星导航系统:美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 和我国的北斗卫星导航系统,另外,欧盟正在积极建设自己的 Galileo 系统。全球卫星导航系统能够在全世界范围内提供全天候位置、速度和定时服务。从最初的设计到今天已深入到众多专业应用领域,除了军事活动和武器装备外,包括网络定时、车载导航、地质探测、大气监测、航海,等等,同时还在关键的公众安全领域和航空航天载体导航领域起到越来越无可替代的作用,尤其在人们的日常生活中的广泛应用,不但带来了巨大的经济效益,同时一定程度上改变了人们的生活方式。

卫星导航系统是重要的空间信息基础设施。我国高度重视卫星导航系统的建设,一直在努力探索和发展拥有自主知识产权的卫星导航系统。2000 年,首先建成北斗导航试验系统,使我国成为继美、俄之后世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家。该系统已成功应用于测绘、电信、水利、渔业、交通运输、森林防火、减灾救灾和公共安全等诸多领域,产生显著的经济效益和社会效益。特别是在 2008 年北京奥运会、汶川抗震救灾中发挥了重要作用。为更好地服务于国家建设与发展,满足全球应用需求,我国启动实施了面向全球服务的北斗卫星导航系统建设〔BeiDou Navigation Satellite System〕。北斗卫星导航系统是中国正在实施的自主发展、独立运行的全球卫星导航系统。系统建设目标是:建成独立自主、开放兼容、技术先进、稳定可靠、覆盖全球的北斗卫星导航系统,促进卫星导航产业链形成,形成完善的国家卫星导航应用产业支撑、推广和保障体系,推动卫星导航在国民经济社会各行业的广泛应用。北斗卫星导航系统的出现,打破卫星导航产业由美俄垄断的格局,显著提升了我国在空间卫星应用领域的地位,有效保护了我国位置信息安全,大大推动了科技进步和相关产业的发展。

随着卫星导航产业的蓬勃发展,作为技术支持的高等教育体系也应运而生,很多高等院校已开展或即将开展相关教学和研究。相对很多传统学科,卫星导航系统是一个崭新的学科体系,具有显著的交叉学科特色。由于历史发展的缘故,现有的相关书籍大多是从测绘、控制和卫星应用角度出发,在星地间信息传输和定位终端信号处理方面的讲述相对薄弱。本书出版的目的是想弥补这个不足,在全面阐述全球卫星导航系统的同时,从信息通信领

域拓展应用的角度,让读者对导航卫星信号结构、空间传输、信号接收和信息处理解算过程有更深入的理解。

全书共分8章,孟维晓教授负责全书的整体结构规划,第1~3章的撰写以及全书的校对,迟永钢负责第4~6章的撰写,韩帅负责第7~8章和附录的撰写。本书的编写过程,得到了哈尔滨工业大学电子与信息工程学院、通信技术研究所和通信工程系的大力支持,另外在本书的编写过程中研究生张光华、刘恩晓、马若飞、邹德岳、陈雷、李琳、吴萌、史雨薇、赵聪、张德坤、巩紫君、李亚添、高书莹和骆之皓等同学协助完成了大量前期工作,在此一并表示衷心的感谢!

由于作者的时间、水平和能力所限,书中难免存在疏漏和不足,敬请读者不吝斧正!

编者

2013年8月

目 录

CONTENTS

第1章 绪论	1
1.1 导航系统概述	1
1.1.1 导航系统的主要技术指标	2
1.1.2 典型导航技术简介	3
1.2 无线电导航技术	4
1.2.1 无线电定位导航的基本原理	5
1.2.2 典型无线电导航系统	6
1.3 全球卫星导航系统	8
1.3.1 GNSS 系统的发展	8
1.3.2 主流 GNSS 系统	10
1.3.3 GNSS 系统的构成	14
1.3.4 GNSS 系统的应用	20
1.4 GNSS 现代化	21
1.4.1 GPS 的现代化需求	22
1.4.2 GPS 的现代化措施	24
1.4.3 GLONASS 系统的现代化	29
1.4.4 现代化的 Galileo 系统	30
1.5 本章小结	33
参考文献	33
第2章 卫星定位导航基础知识	35
2.1 卫星定位的基本原理	35
2.2 导航卫星的轨道	37
2.2.1 卫星轨道的影响因素	37
2.2.2 卫星的无摄运动	38
2.2.3 卫星的受摄运动	42
2.3 导航卫星的坐标系	43
2.3.1 协议天球坐标系	44
2.3.2 协议地球坐标系	46

2.3.3	天球坐标系与地球坐标系的转换	47
2.3.4	卫星的参考系——WGS-84	48
2.4	导航卫星的时间系统	49
2.5	导航电文	52
2.5.1	导航电文的组成	52
2.5.2	遥测字与转换字	54
2.5.3	数据块	54
2.6	卫星在轨位置的计算	59
2.7	卫星速度解算	64
2.8	本章小结	64
	参考文献	65
第3章	卫星导航信号及其传输	67
3.1	导航卫星信号工作频率	67
3.1.1	频点选择依据	67
3.1.2	导航卫星信号带宽	68
3.2	伪噪声码的基本知识	69
3.2.1	伪噪声码概述	69
3.2.2	伪噪声码产生	70
3.2.3	几种特殊的伪噪声码	73
3.3	GPS 卫星的信号及其伪噪声码	76
3.3.1	GPS 卫星的信号	76
3.3.2	GPS 卫星的伪噪声码	79
3.3.3	GPS 信号的 AS 和 SA 的影响	85
3.4	北斗导航系统的卫星信号及伪噪声码	90
3.4.1	北斗导航系统的伪噪声码	91
3.4.2	北斗导航系统的导航电文	93
3.5	GLONASS 系统和伽利略系统的信号	94
3.5.1	GLONASS 系统的信号	94
3.5.2	伽利略系统的信号	98
3.6	星地信号传输的无线链路计算方法	104
3.6.1	基本概念	104
3.6.2	传输损耗	105
3.7	本章小结	108
	参考文献	108
第4章	卫星定位接收机原理	110
4.1	卫星定位接收机的组成与分类	110
4.2	接收机的射频部分组成及工作原理	113

4.2.1	天线	113
4.2.2	射频前端	116
4.3	GNSS 接收机的信号捕获	120
4.3.1	捕获技术的基本原理	120
4.3.2	时域搜索	122
4.3.3	频域搜索	124
4.3.4	GNSS 弱信号的捕获	126
4.3.5	信号确认算法	129
4.3.6	精细频率估计	131
4.4	GNSS 接收机的信号跟踪	131
4.4.1	载波跟踪环	131
4.4.2	码跟踪环	134
4.4.3	载波环辅助码环	138
4.5	定位导航解算方法	139
4.5.1	定位导航解算流程	140
4.5.4	用户位置计算	141
4.5.5	误差修正	143
4.6	卫星导航软件接收机原理和架构	145
4.7	本章小结	146
	参考文献	146
第 5 章	定位解算原理	148
5.1	伪距单点定位	148
5.1.1	伪距测量	149
5.1.2	伪距单点定位	150
5.1.3	载波相位测量平滑伪距的单点定位	153
5.2	伪距差分定位	154
5.2.1	DGPS 测量的类型	154
5.2.2	位置 DGPS 测量	155
5.2.3	单基准站伪距 DGPS 测量	156
5.2.4	基准站载波相位 DGPS 测量	159
5.3	载波相位测量	160
5.3.1	载波相位测量	160
5.3.2	GPS 载波相位测量的单点定位问题	166
5.4	载波相位测量的 DGPS 模型	168
5.4.1	四个单差分测量值	169
5.4.2	两个双差分测量值	170
5.4.3	一个三差分测量值	171
5.5	载波相位测量与伪距测量的组合解算	173

5.5.1	载波相位测量的简易方程	174
5.5.2	宽巷载波相位测量方程式	175
5.5.3	窄巷载波相位测量方程式	175
5.5.4	L1-P/L2-P 码伪距测量的简易方程	175
5.5.5	宽、窄巷载波相位与伪距测量的组合解算	176
5.6	本章小结	177
	参考文献	177
第 6 章	定位导航误差	179
6.1	卫星导航定位的精度、误差与偏差	179
6.1.1	均方根差	179
6.1.2	圆概率误差	179
6.1.3	相互关系	180
6.1.4	偏差	181
6.1.5	精度	182
6.2	卫星导航定位的主要误差	184
6.2.1	卫星星历误差	185
6.2.2	电离层效应的距离偏差分析	187
6.2.3	对流层效应的距离偏差分析	191
6.2.4	多路径误差分析	193
6.3	卫星定位的其他误差及分析	195
6.3.1	相对论效应误差	195
6.3.2	地球自转效应误差	196
6.3.3	内时延误差	196
6.3.4	观测噪声误差	196
6.4	本章小结	198
	参考文献	198
第 7 章	GPS 辅助系统和增强系统	200
7.1	GPS 系统的缺陷	200
7.1.1	信号强度问题	200
7.1.2	信号捕获问题	201
7.1.3	系统完好性问题	201
7.2	辅助全球定位系统	202
7.2.1	冷启动、温启动和热启动	202
7.2.2	辅助 GPS(A-GPS) 系统	205
7.2.3	A-GPS 频率辅助	207
7.2.4	A-GPS 码延迟的时间辅助	211
7.2.5	A-GPS 高灵敏度辅助	214

7.2.6	A-GPS 典型搜索案例	217
7.3	GPS 增强系统	220
7.3.1	SBAS 的组成和功能	220
7.3.2	SBAS 差分定位方法	223
7.3.3	SBAS 完善性监测	229
7.3.4	WAAS 增强系统	232
7.3.5	GBAS 的组成和工作流程	234
7.3.6	GBAS 完善性监测	238
7.4	本章小结	245
	参考文献	245
第 8 章	组合导航定位技术	247
8.1	组合导航定位技术原理	247
8.2	卡尔曼滤波技术及组合方法	248
8.2.1	卡尔曼滤波技术原理	248
8.2.2	卡尔曼滤波在 GPS/INS 组合导航系统中的应用	250
8.3	GPS/INS 组合导航系统	252
8.3.1	GPS/INS 松耦合组合导航系统	252
8.3.2	GPS/INS 紧耦合组合导航系统	253
8.3.3	INS 辅助 GPS 接收机环路	256
8.4	其他组合导航系统简介	257
8.4.1	GPS/Loran-C 组合导航系统	257
8.4.2	GPS/Laser 组合导航系统	259
8.4.3	GPS/DR 组合导航系统	260
8.4.4	GPS/伪卫星组合导航系统	260
8.4.5	GPS/蜂窝组合导航系统	261
8.5	本章小结	262
	参考文献	262
附录	卫星定位导航原理实验指导	263

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)接收导航卫星发送的导航定位信号,并以导航卫星为动态已知点,实时测定运动载体在航位置和速度,进而完成导航。当今的GPS、Galileo、GLONASS和北斗系统都属于GNSS系统。1957年10月,第一颗人造地球卫星入轨运行。1958年,美国科学家开始了卫星导航系统的研究。人造地球卫星的最重要应用之一就是全球无线电导航,1963年12月,第一颗导航卫星入轨运行,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——全球卫星定位系统(Global Positioning System,GPS)全面建成,不仅带来了一场无线电导航的深刻技术革命,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,卫星导航系统已成为名副其实的跨学科、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最新的技术与应用。本章介绍导航的基本任务和性能指标,同时为方便后续章节的学习,还介绍其他典型的导航系统原理以及部分无线电导航系统的概况,用作背景知识的同时也作为开阔思路的有益补充。GNSS系统作为本书的核心内容,在本章的1.3节将对GNSS系统的发展现状和应用进行介绍。

1.1 导航系统概述

导航,译自navigation,原为“航行”之意,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”。为方便后续知识的讲解,这里需要将如下概念进行区分,并阐明它们之间的关系。

测距——显而易见,测距指的是测量两点之间的直线距离。之所以将如此基本的概念加以强调,是因为目前大多数定位原理都是基于测距完成的。

定位——测定物体在一个特定坐标系中的位置,此时物体被视作一个质点。

姿态——指遥感器或遥感平台对某一参考系所处的角方位。

导航——确定载体的位置与姿态,引导载体到达目的地的过程。

制导——制导是控制引导的意思,是导航的重要应用。其与导航的主要区别是:制导系统不仅提供载体的姿态、位置及速度信息,还直接参与载体的控制,是一个闭环的过程。

同时,大地测量等概念也是与导航定位相关的,由于其自身特点鲜明,在这里不一一详述。上述概念间的关系如图1.1所示。

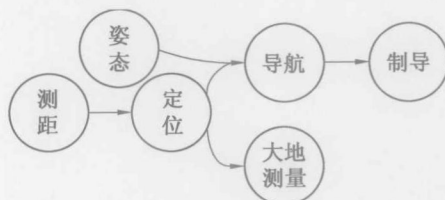


图 1.1 各种相关技术间的关系

如图 1.1 中所示,测距在大多数时候是定位的基础,而定位则与姿态测量一同构成了导航的基础。导航信息又为制导提供了基础,而大地观测等其他应用,则是由定位技术提供支持的。

1.1.1 导航系统的主要技术指标

在设计或评价一个导航系统时,其定位精度、工作可靠性、覆盖范围以及用户容量是应关心的重点。下面给出部分具有代表意义的导航系统参数的定义。

1. 定位精度

定位精度是导航定位系统最为重要的参数,也是对一个导航系统定位能力最为直接的衡量。影响定位精度的因素主要来自两个方面,一是由系统设计原因造成的定位误差,如信号扩频码的相关峰的陡峭程度、卫星测控能力、大气参数修正模型的设计、卫星原子钟稳定性等因素;二是环境变化造成的误差,如建筑物或地形造成的多径效应、大气情况的变化等因素。

衡量定位精度的参数主要包括:均方误差(Root Mean Square Error, RMS)和圆概率误差(Circular Error Probable, CEP)。关于上述精度指标将在后续章节详述。

2. 覆盖范围

导航用户能够得到符合规定的定位精度的定位服务的地理范围称为覆盖范围。

对于无线电导航来说,根据覆盖范围可将无线电导航系统分为:

(1) 近程导航系统(对飞行器为 100 ~ 500 km,对舰船为 50 ~ 100 海里),如台卡系统(英国)、塔康系统(美国)及拉娜系统(法国)。

(2) 中程导航系统(对飞行器为 500 ~ 1 000 km,对舰船为 300 ~ 600 海里),如罗兰 A 系统(美国)。

(3) 远程导航系统(对飞行器为 2 000 ~ 3 000 km,对舰船约为 1 500 海里),如罗兰 C 系统(美国)及长河二号(中国)。

(4) 超远程导航系统(大于 10 000 km),如奥米茄系统(美国)。

(5) 全球导航系统(覆盖全球),如 GPS、北斗二代、Galileo 及 GLONASS。

值得注意的是,并非所有卫星定位系统都是全球导航系统,中国的北斗卫星导航试验系统(北斗一代)、日本的准天顶卫星系统(QZSS)都属于区域定位系统,不能覆盖全球。

3. 系统容量

导航系统所能够提供服务的最大用户数称为系统容量。对于 GNSS 系统而言,根据其定位原理不同,有些有用户数量的限制,如北斗一代;有些则没有用户数量的限制,如 GPS、



北斗二代等。

4. 系统可靠性

系统可靠性是指导航系统在规定时间内能够持续完成规定功能的能力。可靠性可以用可靠度、平均无故障工作时间、平均故障间隔时间、可用性和维修度等参数衡量。

5. 系统完好性

系统完好性也称系统完备性或完善性等,表示系统在出现故障、不能正常发挥功能时向用户发出告警的能力,该指标是通过以下 3 个参数衡量的。

(1) 报警限制。报警限制指系统发出告警所需满足的最小定位误差值,当系统发现定位误差将会大于此门限时,即会发出报警。

(2) 报警反应时间。报警反应时间指系统判定需要实时告警到用户接到警报的时间。

(3) 完备性风险。完备性风险指系统误差达到了预定门限,但未准确发出告警的概率。

6. 定位速率

定位速率描述了从系统开机直至得到准确位置信息的时间间隔,常用首次定位时间(Time to First Fix, TTFF)来描述。同时,不同的系统在不同的工作模式下,会有不同的定位速度。比如 GNSS 系统在冷启动、温启动和热启动下的时间就有所不同,详见本书第 7 章。

以上给出的只是衡量导航系统性能的一部分指标,根据不同的情况,还需要考虑诸如导航信息多值性、导航信息的维数等指标。同时,不同的导航系统有不同的衡量方式,比如在惯性导航系统中,累积误差就是一条非常重要的指标,而在其他系统中并不存在;同时也以惯性导航系统为例,它根本不存在用户容量的问题。

1.1.2 典型导航技术简介

导航系统种类繁多,GNSS 系统是其中之一。由于在实际工程中 GNSS 系统经常需要与其他导航系统联合工作,以形成互补。这里简要介绍一些 GNSS 系统外的典型导航系统及其工作原理。

1. 惯性导航系统

惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)简称惯导系统,惯导是基于陀螺仪和加速计这两种器件搭建而成的。

加速计的理论基础是牛顿第一定律,将一个质量已知的物块置于载体内,若想要物块跟随载体加速,则必然需要由载体对其施加一个作用力,通过这个作用力的大小,就可以感知出当前载体的加速度。而在载体初始状态已知的情况下,通过对加速度进行积分,即可得到速度,对速度积分又可以得到位移。

陀螺仪利用了物体的转动惯量——当一个陀螺绕一个轴旋转时,若想改变这条轴的方向,则需要对陀螺施加一个外力,通过感知这个外力,就可以感知载体的旋转情况,即姿态变化。

惯导系统又可以分为平台式和捷联式。平台式惯导系统将陀螺仪和加速计放置于一个可以保持水平的平台上工作,以消除地心引力和姿态变化带来的影响。而捷联式惯导系统将两种传感器直接固定到载体上,通过数学手段消除地心引力、地转偏向力以及姿态变化的



影响。

惯导系统不依赖其他设备,具有自主导航的能力,抗干扰性高,无法被侦测,一直以来都是军用领域不可或缺的关键技术。但其工作时需要精确地给出初始的位置、速度及姿态,此时需要其他方式的辅助。而且 INS 具有累积误差特性,使用时间越长,定位精度越差。

2. 天文导航

天文导航也称星光导航。其通过观察天空中特定的天体的俯仰角,结合时间信息,解算得到用户的位置。天文导航的历史可以追溯到2 000多年前,我们熟知的六分仪就是用来实现星光导航的。星光导航具有隐蔽性高、自主性强的特点,至今在航海、航空航天及制导武器等领域发挥作用,但其缺点就是受气象环境的限制,阴雨环境下难以应用。

3. 多普勒雷达导航

多普勒雷达导航能够用来感知目标位置,提供预警和火控,因此也可以应用于导航。飞行器通过多普勒雷达向地面发射电磁波,通过反射波的多普勒频移情况测定自身对地速度,再通过对速度的积分得到位移及本身位置。

4. 地图匹配导航

地图匹配是数字地球技术、计算机技术和图形处理技术的综合产物,分为地形匹配和景象匹配技术。前者通过将载体路径区域划分为多个小格,将其主要特征进行存储,构成数字地图,用户通过无线高度表等传感器来感知地形特征,并与地图比对,得到当前位置。后者则直接高空拍摄之后将图像存储在终端中,通过与摄像机采集到的图像进行对比,得到当前位置。

地图匹配技术由于具有高度的军事价值,常用于巡航导弹等武器装备中,近年来得到迅猛发展,常被用于辅助 INS。但其数据存储量大,景象匹配技术也同样受气象条件影响,同时其应用需要在已知载体大致路径的情况下完成,而且主要对高空用户有效,这限制其应用于民用的能力。

5. 无线电与卫星导航

基于无线电信号的导航是当前应用最为广泛的导航技术,尤其是星基全球卫星导航,本书后续将重点讨论。

1.2 无线电导航技术

目前的 GNSS 系统全部是通过无线电信号进行导航的,它是由传统无线电导航发展而来,并逐渐演进为一个独立的、应用最广阔的体系,故这里将无线电导航技术区别于其他类导航技术。

与其他技术相比,无线电导航有如下特点:

- ① 受外界条件(如昼夜、季节、气象等)的限制较小。
- ② 测量精度较高,测量速度快。
- ③ 系统轻小灵活,可靠性高。
- ④ 成本低廉,易于推广。

下面简要介绍无线电导航的基本原理以及一些历史上的或在役的导航系统及基本原理。