



航天科技图书出版基金资助出版

# 卫星导航系统概论

刘天雄 编著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

# 卫星导航系统概论

刘天雄 编著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

卫星导航系统概论 / 刘天雄编著. -- 北京 : 中国  
宇航出版社, 2018. 11

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1564 - 7

I. ①卫… II. ①刘… III. ①卫星导航—全球定位系  
统—高等学校—教材 IV. ①P228. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 282882 号

责任编辑 侯丽平 封面设计 宇星文化

出 版  
发 行

中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830  
(010)60286808 (010)68768548

网 址 [www.caphbook.com](http://www.caphbook.com)

经 销 新华书店

发行部 (010)60286888 (010)68371900  
(010)60286887 (010)60286804(传真)

零售店 读者服务部 (010)68371105

承 印 河北画中国画印刷科技有限公司

版 次 2018 年 11 月第 1 版  
2018 年 11 月第 1 次印刷

规 格 787 × 1092

开 本 1/16

印 张 40.75

字 数 988 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1564 - 7

定 价 268.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

## 航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快的发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助20~30项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

## 序 一

我国在 2000 年建成北斗一号双星定位系统，成为世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家，到 2012 年北斗二号卫星导航系统对亚太地区提供定位、导航和授时服务，再到 2017 年发射第一组北斗三号卫星，我国开启了北斗三号全球组网的新时代。从北斗一号 RDSS 有源定位，到北斗二号 RNSS 无源定位，再到北斗三号利用星间链路实现全球组网导航卫星之间信息的互联互通，为全球用户免费提供基本导航+星基增强+报文通信+搜索救援四大服务，北斗卫星导航系统达到了世界一流卫星导航系统的水平。北斗卫星导航系统不仅解决了“我在哪里”的问题，而且解决了“让别人知道我在哪里”的难题，卫星导航与卫星通信一体化的技术体制使得北斗系统在救灾减灾、搜索救援、应急广播、指挥调度、航路跟踪、态势感知等领域发挥了无以伦比的作用。

北斗卫星导航系统是我国重要的时间和空间信息基础设施，已成为现代信息产业、大数据服务和人工智能技术的重大技术支撑，是具有巨大带动力的时代产业发展引擎，与国家安全、国民经济和社会民生密切相关，是实现航天强国梦和军民融合发展的典型代表。作为国家重大科技工程，北斗卫星导航系统的应用服务是我们建设北斗系统的出发点和落脚点，只有应用服务于国计民生，才能产生真正的价值，才能不忘初心，方得始终。北斗卫星导航系统要打造“天上好用、地上用好”的格局与态势，要广泛推广应用，要天上地上配合好、建好用好、发挥好系统的作用，要不断进步、强化军民融合发展引领作用，构建好时空服务体系，形成智能信息服务的巨大产业。

目前，世界上有美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 Galileo 以及中国的 BDS 四大全球卫星导航系统，还有日本的 QZSS 以及印度的 IRNSS 两小区域卫星导航系统，卫星导航应用领域的竞争是不可避免的。北斗系统能否顺利成长并赢得国内外市场，取决于国内广大用户、行业管理人员和科研队伍对卫星导航技术的认识，对北斗系统的理解。GPS 等国外系统能做的事情，我们的北斗系统也能做，而且还有自己的特色服务。因此，编写一本全面介绍卫星导航系统的专著是十分迫切和必要的。

全书分为原理篇、系统篇、工程篇、性能篇、应用篇、展望篇六个部分，系统地阐述了卫星导航系统相关技术，各篇内容自成体系，内容完整，从事卫星导航系统建设的科研人员 and 开展卫星导航专业学习的师生以及从事卫星导航系统科研管理的人员可以根据需

要，选择阅读相关的内容。相信本书的出版，将会对我国卫星导航技术的发展、北斗卫星导航系统的建设和推广应用起到积极的促进作用。自主创新、攻坚克难、团结协作、追求卓越的北斗精神一定会继续发扬光大！



“两弹一星”功勋奖章获得者

中国科学院院士

2018年2月16日

## 序 二

“日月安属，列星安陈？”当千年前的屈原仰望苍穹问天时，可曾想到千年后一个全新的“北斗”星群高悬于九天之际？这个“北斗”就是中国科技创新的新名片——北斗卫星导航系统。

卫星导航系统自诞生以来，为地球表面和近地空间用户提供了定位、导航和授时服务，成为人类活动、社会经济发展及国防建设的重要空间信息基础设施，极大地改变了人类的生产和生活方式。卫星导航系统是政治大国、经济强国、军事强国和科技强国的重要标志。正在运行的卫星导航系统有美国的全球定位系统（GPS）、俄罗斯的全球导航卫星系统（GLONASS）、欧洲的 Galileo 全球卫星导航系统、日本的准天顶卫星系统（QZSS）以及印度的区域卫星导航系统（IRNSS）。我国 21 世纪初开始建设独立自主的卫星导航系统，取名为“北斗卫星导航系统”（简称 BDS），并已先后建成北斗实验验证系统（简称 BDS-I）和北斗区域卫星导航系统（简称 BDS-II），目前正在建设北斗全球卫星导航系统（简称 BDS-III），预计 2020 年完成北斗全球卫星导航系统星座的建设，并投入运行。

BDS-I 卫星导航系统采用透明转发体制，除了为用户提供定位、导航和授时服务外，还具有独特的双向数字报文通信功能，可实现用户与主管部门、用户与用户之间的短报文通信，创造性地扩展了系统的应用范围，在公共安全、减灾救灾、搜索救援、森林防火、气象探测、应急通信、指挥调度、态势感知、信息采集、车辆监控等特殊领域发挥了巨大作用。BDS-II 除直接提供定位、导航和授时服务外，也保留 BDS-I 的透明转发定位能力，并提供短报文通信服务。BDS-III 继承了 BDS-II 的全部服务功能，还增加了新的全球短报文服务、标准搜救服务以及星基增强服务功能。

2017 年 11 月 5 日，北斗三号卫星导航系统发射了第一组 MEO 双星，开启了北斗三号全球组网的新时代。卫星导航系统的发展，不仅涉及到航天科学、空间科学、地球科学，也涉及电子、通信、时间频率、测绘等学科，因此，中国北斗卫星导航系统的建设不仅促进了中国导航事业的发展，也有力促进了其他相关学科的发展。

本书作者来自中国空间技术研究院总体设计部，是北斗卫星导航系统建设团队的核心成员。本书内容全面，技术总结到位、精准，涵盖了北斗卫星导航系统工作原理、星座构成、有效载荷、卫星轨道、时间频率、系统性能等内容，是一部全面反映卫星导航系统工程著作。该书的出版不仅是北斗卫星导航系统建设相关理论与技术的总结，也是北斗卫

星导航系统工程建设经验的总结；不仅有利于广大读者分享北斗卫星导航系统建设成就，也有利于广大工程建设人员和院校师生更好地理解北斗、推广北斗和应用北斗。

天河漫漫，人间俯仰千年。中国的北斗卫星导航系统志在寥廓，相信它的发展将“鸿鹄一再高举，天地睹方圆”，也相信本书的出版发行，一定会对我国卫星导航技术的发展、北斗卫星导航系统的建设和应用起到促进作用。



中国科学院院士

2018年1月18日



## 前 言

卫星导航系统能够为地球表面和近地空间的广大用户提供全天时、全天候、高精度的定位、导航和授时服务，是拓展人类活动、促进社会发展的重要空间基础设施。卫星导航正在使世界政治、经济、军事、科技、文化发生革命性的变化。

北斗七星，自古以来就是我国神话中永恒的神圣象征，《晋书天文志》说北斗七星在大微北，枢为天，璇为地，玑为人，权为时，衡为音，开阳为律，摇光为星。我们的祖先利用北斗七星来确定北极星的方位，再通过观测北极星辨别方向，所以汉乐府有诗云“玉衡指孟冬，众星何历历”。

今天我们不再需要通过观测天象去判断时间和位置。2000年，我国相继发射两颗北斗一号卫星，基于无线电测定业务（RDSS），利用两颗地球静止轨道卫星为中国及周边地区提供有源定位、授时和短报文通信服务，建成了北斗双星定位系统，我国成为世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家。2012年，完成5颗GEO、5颗IGSO和4颗MEO北斗卫星的发射并组成混合星座，建成了北斗二号卫星导航系统，基于无线电导航业务（RNSS）和RDSS，为国土及部分亚太地区提供定位、导航、授时和短报文通信服务。北斗二号区域卫星导航系统一方面继承了北斗双星定位系统的有源定位服务，另一方面对标国际一流卫星导航系统，同时为用户提供无源定位服务，北斗短报文通信服务解决了用户告知别人自己“在哪儿，干什么”的难题。目前正在开展北斗三号全球卫星导航系统建设，计划2020年前后建成世界一流的全球卫星导航系统。

本人有幸参加了我国北斗一号、北斗二号和北斗三号卫星导航系统的建设工作，从事导航卫星总体设计工作。在工作中，注重与团队不同专业设计师研讨相关技术问题，向高校老师学习相关理论知识，同用户交流相关指标的理解。一流的事业，需要一流的队伍和一流的管理，在北斗全球卫星导航系统的建设过程中，需要设计师系统掌握卫星导航相关业务知识，推动北斗卫星导航系统的应用。2012年12月27日，北斗二号卫星导航系统正式向亚太地区提供公开服务，具备了与GPS、GLONASS、Galileo等卫星导航系统同台竞争的条件。作者期望借此书出版的机会，与国内外同行开展交流，共同推进全球卫星导航系统的建设和应用。

全书分为原理篇、系统篇、工程篇、性能篇、应用篇、展望篇六个部分，系统地阐述了卫星导航系统的前世今生、定位原理、系统组成、功能性能、误差分析、工程实现、行

业应用以及发展趋势。各篇内容自成体系，内容完整，从事卫星导航系统建设的科研人员、从事卫星导航专业学习的师生以及从事卫星导航系统科研管理的工作人员可以根据需要，选择阅读相关的内容，初学者应按顺序系统地学习各篇内容。

原理篇包括第1章概述、第2章定位原理、第3章时空基准三章。本篇翔实地介绍了卫星导航系统的光辉历史、闪耀的今天，阐明了卫星导航系统的定位原理，时间与空间参考基准对卫星导航系统的重要性，读者可以在本篇找到最权威的说明。

第1章阐述了卫星导航系统的前世今生。苏联发射的世界第一颗人造卫星触发了美国科学家研制卫星定位系统的灵感。斗转星移，卫星导航系统已走过了60年的光辉历程。目前，世界上有美国的GPS、俄罗斯的GLONASS、欧洲的Galileo以及中国的BDS四大全球卫星导航系统，也有日本的QZSS和印度的IRNSS区域卫星导航系统。卫星导航系统已成为当今信息产业的时空基准，正如GPS之父，美国工程院院士，斯坦福大学教授Parkinson先生所言“卫星导航应用只受想象力的限制”。关心当今卫星导航系统现状的朋友可以在本章找到最清晰的说明。

第2章解读了卫星导航系统的定位原理。信号到达时间(TOA)测距是卫星导航系统确定用户位置的数学基础，精密时间测量是卫星导航系统确定用户位置的物理基础。地面用户接收到导航卫星播发的导航信号后，计算导航信号从卫星到接收机的传播时间，再乘以无线电信号传播速度，得到星地之间的距离。通过导航信号的电文，可得到卫星的位置坐标，以卫星为球心、信号传播的距离为半径画球面，用户接收机一定在球面上。当接收机分别测量出与4颗导航卫星之间的距离时，4个球面相交于一点，即可以确定用户的空间位置。

第3章阐明了卫星导航系统的时间基准和空间参考框架，描述卫星在地球附近的运动规律时，必须相对某个参照物来描述卫星在空间的位置和运动，对地理空间中的要素进行定位和导航也必须嵌入到一个时间和空间参照系统中。自治的卫星导航系统时间和空间基准确保了定位、导航和授时服务过程中各个环节空间坐标和时间参考系统的统一。

系统篇包括第4章系统组成、第5章轨道和星座、第6章导航电文、第7章导航信号四章，为了给用户提供连续、完好、可用的定位、导航和授时服务，本篇介绍了卫星导航系统空间段、控制段和用户段的组成及任务分工。导航卫星应该运行在什么轨道？在空间应该组成什么样的星座？参与位置解算的导航卫星的空间几何构形对定位精度有什么影响？导航电文应该涉及哪些信息？导航信号应该如何调制导航电文和伪随机测距码？本篇涉及卫星导航系统的know-how，需要系统掌握卫星导航系统知识的朋友有必要深入研读本篇内容。

第4章说明了卫星导航系统组成及任务分工。空间段卫星导航系统是整个卫星导航系

统的关键，要求连续、稳定、可靠地生成并播发导航信号；控制段地面运行控制系统是整个卫星导航系统的核心，负责生成卫星轨道、钟差、电离层延迟等导航数据；用户段应用系统是整个卫星导航系统的要素，导航应用的程度决定了系统生存空间。当然导航卫星组网运行离不开运载火箭的助推，离不开航天发射场的支持，离不开航天测控网的支撑。卫星导航系统作为典型的大国航天工程，体现着一个国家的政治、经济和军事的综合实力，美国曾把 GPS 系统定义为继载人登月和航天飞机之后的第三大航天工程正是源于这点。

第 5 章论述了导航卫星的轨道和卫星导航的星座，利用导航卫星进行定位，先决条件是用户要知道卫星的空间位置，即运行轨道。其次要求用户必须要能够同时接收到 4 颗以上导航卫星播发的信号，也就是说导航卫星对地要四重覆盖。那么设计导航卫星轨道时需要解决的第一个问题是确定导航卫星轨道的类型。确定导航卫星的轨道后，如何做到用户视界范围内有 4 颗以上导航卫星的基本要求呢？那么需要解决的第二个问题是确定空间导航卫星的数量和星座结构。

第 6 章说明了卫星导航系统导航电文数据的内容和数据结构，用户机只有解调出导航信号发射时刻卫星的轨道位置、星上时间以及电离层改正数等导航数据，才能解算出用户和卫星之间的伪距，这是解算用户位置的基础之一。

第 7 章阐述了导航信号的频率范围、调制方式、复用方案，导航信号是系统向用户播发导航数据和实现星地测距的唯一手段，是联系卫星导航系统各个环节的纽带。导航信号设计是卫星导航系统建设的顶层任务，用户的定位精度可以转化为对用户和卫星之间伪距测量的精度要求，以及对导航信号发射时刻的卫星轨道位置和星上时钟的精度要求。一定程度上说，导航信号的性能决定了整个卫星导航系统的性能。在无线电导航信号频段有限且拥挤的情况下，如何保证系统内导航信号的平稳过渡、系统间的兼容互操作、军用与民用信号的频谱分离、在战时复杂电磁环境下导航信号的可用性，是我们开展新一代卫星导航信号设计过程中必须要解决的问题。

工程篇包括第 8 章导航卫星和导航信号播发、第 9 章运控系统和导航电文生成、第 10 章接收机和 PVT 解算三章。本篇以导航信号为主线，阐明了作为代表一个国家航天工程水平的卫星导航系统如何为用户提供定位、导航和授时服务，空间段导航卫星如何生成导航信号并将导航信号播发给用户，控制段地面运控系统如何开展星地时间同步与导航卫星的轨道测量，用户段的导航接收机如何实现伪距观测和位置解算。本篇涉及卫星导航系统工程实现层面的 know-how，需要深入理解卫星导航系统工作机制和 workflows 的朋友可以研读本篇内容。

第 8 章介绍了导航卫星平台和有效载荷的组成与功能，给出了导航信号的生成与播发过程，导航卫星只有可靠地接收地面运控系统上注的导航数据，连续、稳定地生成并播发

下行导航信号, 卫星导航系统才能实现为用户提供定位、导航和授时服务。

第9章说明了地面运控系统的组成和功能, 介绍了导航数据的生成与上注过程、上注策略、数据校正、数据预测、覆盖范围等任务。系统的定位、导航和授时服务是以包含在导航信号中的卫星轨道位置和星上时钟信息为基础的, 运控系统的导航数据生成精度与更新速率决定了整个系统的服务精度。

第10章分析了导航接收机如何捕获、跟踪、解扩、解调、译码导航信号, 如何实现伪距观测和位置、速度和时间解算的过程。一个卫星导航系统生存和发展的前提是能为各个领域、各个行业的用户提供可靠的定位、导航和授时服务, 并得到大量的应用。为此, 本章也系统地给出了接收机的性能指标以及各组成环节的特点和技术要求。

性能篇包括第11章系统关键性能、第12章误差分析两章。本篇系统地论述了卫星导航系统的关键性能及其指标, 分析了影响用户定位精度的因素, 给出了进一步提高系统服务性能的措施等内容。建议那些准备和正在开展卫星导航应用的朋友阅读了解本篇相关内容。

第11章论述了卫星导航系统覆盖范围、定位精度、连续性、完好性、可用性等关键特性的定义及内涵。本章引用了斯坦福大学教授 Parkinson 先生关于卫星导航系统 3A 特性的说明材料, 只有深刻理解卫星导航系统的关键特性, 才能更好地开展相关的导航应用。

第12章分析了影响卫星导航系统定位、导航和授时服务精度的主要因素, 从卫星导航信号生成与播发、导航信号传播、导航信号接收三个环节, 给出了如何采取相应措施以减缓或者避免造成误差的方法。

应用篇包括第13章定位服务、第14章导航服务、第15章授时服务、第16章其他服务四章。卫星导航系统作为典型的军民两用系统, 战略作用与商业利益并举, 已广泛应用于交通运输、武器制导、精确打击、地理测绘、水文监测、通信时统、电力调度、气象预报、应急通信、搜索救援、救灾减灾、森林防火、海洋渔业、精准农业等领域, 为军民融合奠定了技术基础。本篇以典型示例方式, 简明地介绍了卫星导航系统的应用。

第13章以形变监测为例, 简要说明卫星导航系统定位服务的定位模式、工作原理、实施方案等内容。第14章以车载导航和 GNSS/INS 组合导航为例, 简要介绍卫星导航系统导航服务的工作模式、工作原理、实施方案等内容。第15章以互联网时间同步、移动通信网络时间同步、电力系统网络时间同步以及铁路时间网络同步为例, 简要说明卫星导航系统的授时服务在各个领域的工作模式、工作原理、实施方案等内容。第16章给出了搜索救援、自动相关监视、报文通信等卫星导航系统的非典型应用, 这些应用也进一步拓展了卫星导航系统的发展方向, 卫星导航系统全球组网运行, 是典型的天地一体化运行的

信息系统。期望本篇能够引发读者的灵感，共同促进卫星导航系统的发展与应用。

展望篇包括第 17 章卫星导航技术发展趋势、第 18 章 Micro-PNT 系统与综合 PNT 体系两章。卫星导航系统在时间和空间的覆盖性上，在定位、导航和授时的服务精度上，都取得了革命性的进步，彻底改变了人们的生产、生活和斗争方式，追求无止境，新的需求、新的技术也将促进卫星导航系统新的发展。

第 17 章以专题的方式阐述了卫星导航技术的发展趋势，兼容互操作技术是多个卫星导航系统协同为用户提供更好的定位、导航和授时服务的必由之路。世界并不太平，信息化和网络化战争都离不开时间与空间基准的支撑，未来，导航战是不可回避的问题，从事卫星导航系统建设的同志们一定要未雨绸缪。卫星导航系统与通信系统和惯性导航系统的信息融合技术、新的调制方式以及新的导航信号恒包络复用方案、新一代导航信号体制设计等专题是当前值得我们研究的课题。

第 18 章简要介绍了可能会影响未来卫星导航系统发展的 PNT 技术和体系，在频谱对抗日趋激烈的战场电磁环境中，卫星导航信号发射功率低、穿透能力差等固有弱点，要求我们一方面要改善 GNSS 性能，一方面寻找 GNSS 的备份方案，以化解战时 PNT 服务不可用的风险。Micro-PNT 是十分引人注目的技术，新的导航技术和系统不会取代卫星导航系统，但是一定会促进卫星导航系统的进步。在互联网+时代，大数据技术、人工智能技术和云平台技术一定会助力 PNT 技术体系的发展。

本书系统地阐述了卫星导航系统相关技术，内容完整，材料翔实，结构清晰，逻辑合理，重点突出，同时也有有机地融入了学术界、工业部门在卫星导航技术领域的最新思想和成果，是一部学术与技术并重的专著，可以作为卫星导航系统相关领域的工程师、科研管理人员必备的参考书，也可以作为高等院校师生开展卫星导航系统学习的教材。相信本书的出版发行一定能够为我国北斗卫星导航系统的顶层设计、系统建设和推广应用踵事增华！

本书是作者从事北斗卫星导航工程导航卫星总体设计工作的总结，在成稿过程中，中国空间技术研究院总体部王海红高工和赵小鲂工程师编写了第 5 章轨道和星座，中国空间技术研究院总体部崔小准研究员和刘彬高工编写了第 7 章导航信号，中国空间技术研究院西安分院王岗研究员和郭媛媛工程师编写了第 8 章导航卫星和导航信号播发，中国东方红卫星股份有限公司的李晓梅研究员和中国空间技术研究院总体部赵欣工程师编写了第 9 章运控系统和导航电文生成，中国空间技术研究院航天恒星科技有限公司的俞能杰研究员和中国空间技术研究院总体部刘庆军高工编写了第 10 章接收机和 PVT 解算，中国空间技术研究院总体部张弓高工、徐峰高工及中国空间技术研究院航天恒星科技有限公司云岗地面站刘天惠工程师编写了应用篇，中国空间技术研究院航天恒星科技有限公司王盾研究员编

写了 17.2 节导航通信一体化, 清华大学陆明泉教授编写了 17.5 节卫星导航信号, 中国卫星导航工程中心的高为广高工编写了 18.3 节综合 PNT 体系。推动北斗卫星导航系统又好又快发展是编写本书的最大动力, 感谢他们对本书成稿所作的努力!

本书出版之际, 作者衷心感谢中国空间技术研究院范本尧院士、北京卫星导航中心谭述森院士、地理空间工程国家重点实验室杨元喜院士、北斗卫星导航系统前工程副总师现高级顾问李祖洪研究员、北斗卫星导航系统工程副总师谢军研究员、中国卫星导航定位协会首席专家曹冲研究员、南京大学刘林教授、清华大学陆明泉教授、国防科技大学王飞雪教授、北京卫星导航中心韩春好教授、周兵研究员及王宏兵高工、中国航天科技集团有限公司张广宇高工, 他们在百忙之中审阅了书稿并提出了建设性的修改意见。南京大学刘林教授重点审阅了第 5 章轨道和星座并提供了权威的参考资料。国防科技大学王飞雪教授和中国空间技术研究院航天恒星科技有限公司王盾研究员重点审阅了第 10 章接收机和 PVT 解算, 给出了修改意见并提供了权威的参考资料。清华大学陆明泉教授审阅了第 7 章导航信号和第 10 章接收机和 PVT 解算, 提出了系统的修改意见并提供了权威的参考资料。本书前后修改了三稿, 从章节的安排到内容的取舍, 均得到了范本尧院士、杨元喜院士、谭述森院士、陆明泉教授的悉心指导, 感谢中国宇航出版社对本书的出版给予了大力的支持, 感谢业内专家对作者的帮助与支持!

卫星导航系统涉及多个学科的专业知识, 卫星导航系统技术发展迅速, 限于作者专业水平有限, 工作之余成稿时间仓促, 本书难免出现不妥与疏漏之处, 敬请读者批评指正。

刘天雄

2017 年国庆节于北京

# 目 录

## 第 1 部分 原理篇

第 1 章 概 述 .....	3
1.1 导航起源 .....	3
1.2 前世今生 .....	8
1.2.1 第一颗人造地球卫星——Sputnik-1 触发的灵感 .....	9
1.2.2 第一代卫星导航系统——Transit 卫星导航系统 .....	12
1.2.3 第二代卫星导航系统——GPS 全球定位系统 .....	19
1.3 系统发展 .....	25
1.3.1 GPS .....	25
1.3.2 GLONASS .....	26
1.3.3 Galileo .....	27
1.3.4 BDS .....	28
1.3.5 QZSS .....	30
1.3.6 IRNSS .....	31
1.4 系统功能 .....	32
1.4.1 空间基准 .....	33
1.4.2 时间基准 .....	34
参考文献 .....	37
第 2 章 定位原理 .....	39
2.1 基本思想 .....	39
2.2 数学原理 .....	42
2.2.1 误差分析 .....	43
2.2.2 卫星无线电导航 .....	48
2.3 工程实现——伪距测量和位置解算 .....	49
2.3.1 时间参考系统 .....	53
2.3.2 空间坐标系统 .....	54
2.3.3 伪距测量 .....	54
2.3.4 位置解算 .....	59

2.3.5 定位精度 .....	60
参考文献 .....	63
<b>第3章 时空基准 .....</b>	<b>64</b>
3.1 概述 .....	64
3.2 空间坐标系统 .....	66
3.2.1 地心天球坐标系 .....	67
3.2.2 地心地固坐标系 .....	71
3.2.3 大地坐标系 .....	72
3.2.4 坐标系转换 .....	77
3.3 时间参考系统 .....	81
3.3.1 时间尺度 .....	81
3.3.2 时间基准 .....	82
3.3.3 时间系统 .....	83
3.3.4 时间系统的维持 .....	90
3.3.5 卫星导航系统时间 .....	91
3.3.6 导航卫星时间偏差 .....	95
参考文献 .....	96

## 第2部分 系统篇

<b>第4章 系统组成 .....</b>	<b>99</b>
4.1 概述 .....	99
4.2 空间段 .....	102
4.2.1 导航卫星 .....	102
4.2.2 轨道和星座 .....	105
4.2.3 空间环境 .....	112
4.3 控制段 .....	115
4.3.1 任务分析 .....	115
4.3.2 系统组成 .....	116
4.4 用户段 .....	121
4.4.1 任务分析 .....	121
4.4.2 接收机方案 .....	123
4.4.3 接收机类型 .....	124
参考文献 .....	126



第 5 章 轨道和星座 .....	128
5.1 概述 .....	128
5.2 人造地球卫星轨道 .....	128
5.2.1 开普勒轨道 .....	128
5.2.2 轨道摄动 .....	137
5.3 导航卫星轨道设计 .....	140
5.3.1 地球基准轨道的选择 .....	140
5.3.2 日地空间环境的影响 .....	142
5.4 导航卫星星座设计 .....	143
5.4.1 对地覆盖和星座结构 .....	143
5.4.2 导航卫星星座 .....	145
5.5 卫星几何精度因子 .....	148
5.5.1 几何精度因子定义 .....	149
5.5.2 几何精度因子计算 .....	151
5.6 导航卫星的广播星历 .....	154
5.6.1 导航卫星轨道确定 .....	155
5.6.2 系统时间同步 .....	158
5.6.3 广播星历参数 .....	160
5.7 广播星历参数的用户算法 .....	162
参考文献 .....	165
第 6 章 导航电文 .....	167
6.1 概述 .....	167
6.2 导航电文要求 .....	168
6.3 导航电文格式 .....	168
6.3.1 子帧同步 .....	170
6.3.2 时间计数 .....	171
6.4 导航电文内容 .....	174
6.4.1 时钟校正和精度测定参数 .....	174
6.4.2 星历参数 .....	178
6.4.3 历书、卫星状态和电离层模型参数 .....	183
6.5 系统时间转换 .....	189
6.6 实测导航电文说明 .....	190
6.6.1 原始电文数据 .....	190
6.6.2 解析电文参数 .....	193
参考文献 .....	198