



国家出版基金项目

“十三五”国家重点出版物  
出版规划项目



卫星导航工程技术丛书

主编 杨元喜 副主编 蔚保国



# GNSS反射测量原理与应用

GNSS-Reflectometry Principle and Applications



金双根 吴学睿 邱辉◎著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



“十三五”国家重点出版物

出版规划项目

卫星导航工程技术丛书

主 编 杨元喜  
副主编 蔚保国

---

# GNSS 反射测量原理 与应用

GNSS – Reflectometry Principle and Applications

金双根 吴学睿 邱辉 著

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书以卫星导航和环境遥感为对象,详细全面介绍 GNSS 反射测量(GNSS-R)的原理、方法及应用,包括全球卫星导航系统(GNSS)反射信号特性、地基 GNSS 多路径反射测量方法、干涉模式技术、多普勒时延图、空基 GNSS 反射测量理论、海洋测高、海冰监测、水文遥感、植被监测、冰冻圈遥感等。本书绝大部分内容为著者原创性的理论、方法和应用研究进展,反映该方向最新最前沿动态。

本书为从事卫星导航、卫星遥感、大地测量、海洋环境、气象服务和全球变化等专业的技术人员、研究生和科研人员提供重要的参考,同时为从事工程研究和转化应用的技术人员,特别是从事卫星导航应用开发和环境遥感应用的科技人员提供技术支持。

### 图书在版编目(CIP)数据

GNSS 反射测量原理与应用 / 金双根, 吴学睿, 邱辉  
著. —北京: 国防工业出版社, 2021. 3  
(卫星导航工程技术丛书)  
ISBN 978-7-118-12158-2

I. ①G… II. ①金… ②吴… ③邱… III. ①卫星导航—全球定位系统—应用—环境遥感—研究 IV. ①X87

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 140677 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 插页 28 印张 17 $\frac{3}{4}$  字数 324 千字  
2021 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 158.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

书店传真:(010)88540776

发行业务:(010)88540717

发行传真:(010)88540762

---

## 孙家栋院士为本套丛书致辞

---

### 探索中国北斗自主创新之路 凝练卫星导航工程技术之果

当今世界,卫星导航系统覆盖全球,应用服务广泛渗透,科技影响如日中天。

我国卫星导航事业从北斗一号工程开始到北斗三号工程,已经走过了二十六个春秋。在长达四分之一世纪的艰辛发展历程中,北斗卫星导航系统从无到有,从小到大,从弱到强,从区域到全球,从单一星座到高中轨混合星座,从RDSS到RNSS,从定位授时到位置报告,从差分增强到精密单点定位,从星地站间组网到星间链路组网,不断演进和升级,形成了包括卫星导航及其增强系统的研究规划、研制生产、测试运行及产业化应用的综合体系,培养造就了一支高水平、高素质的专业队伍,为我国卫星导航事业的蓬勃发展奠定了坚实基础。

如今北斗已开启全球时代,打造“天上好用,地上用好”的自主卫星导航系统任务已初步实现,我国卫星导航事业也已跻身于国际先进水平,领域专家们认为有必要对以往的工作进行回顾和总结,将积累的工程技术、管理成果进行系统的梳理、凝练和提高,以利再战,同时也有必要充分利用前期积累的成果指导工程研制、系统应用和人才培养,因此决定撰写一套卫星导航工程技术丛书,为国家导航事业,也为参与者留下宝贵的知识财富和经验积淀。

在各位北斗专家及国防工业出版社的共同努力下,历经八年时间,这套导航丛书终于得以顺利出版。这是一件十分可喜可贺的大事!丛书展示了从北斗二号到北斗三号的历史性跨越,体系完整,理论与工程实践相

结合,突出北斗卫星导航自主创新精神,注意与国际先进技术融合与接轨,展现了“中国的北斗,世界的北斗,一流的北斗”之大气!每一本书都是作者亲身工作成果的凝练和升华,相信能够为相关领域的发展和人才培养做出贡献。

“只要你管这件事,就要认认真真负责到底。”这是中国航天界的习惯,也是本套丛书作者的特点。我与丛书作者多有相识与共事,深知他们在北斗卫星导航科研和工程实践中取得了巨大成就,并积累了丰富经验。现在他们又在百忙之中牺牲休息时间来著书立说,继续弘扬“自主创新、开放融合、万众一心、追求卓越”的北斗精神,力争在学术出版界再现北斗的光辉形象,为北斗事业的后续发展鼎力相助,为导航技术的代代相传添砖加瓦。为他们喝彩!更由衷地感谢他们的巨大付出!由这些科研骨干潜心写成的著作,内蓄十足的含金量!我相信这套丛书一定具有鲜明的中国北斗特色,一定经得起时间的考验。

我一辈子都在航天战线工作,虽然已年逾九旬,但仍愿为北斗卫星导航事业的发展而思考和实践。人才培养是我国科技发展第一要事,令人欣慰的是,这套丛书非常及时地全面总结了我国北斗卫星导航的工程经验、理论方法、技术成果,可谓承前启后,必将有助于我国卫星导航系统的推广应用以及人才培养。我推荐从事这方面工作的科研人员以及在校师生都能读好这套丛书,它一定能给你启发和帮助,有助于你的进步与成长,从而为我国全球北斗卫星导航事业又好又快发展做出更多更大的贡献。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李真' (Li Zhen), written in a cursive style.

2020年8月



祝贺卫星导航工程技术丛书

国防出版

杨东晓







期待卫星导航工程技术丛书

助力中国北斗系统发展

周承基







# 卫星导航工程技术丛书

## 编审委员会

|                                |                              |           |     |     |     |     |     |  |  |
|--------------------------------|------------------------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| 主<br>副<br>院士学术顾问<br><br>委<br>员 | 任<br>主<br>任<br>学术顾问<br><br>员 | 杨元喜       | 杨长风 | 冉承其 | 蔚保国 | 张明高 | 戚发轫 |  |  |
|                                |                              | 魏子卿       | 刘经南 | 沈荣骏 | 范本尧 | 周成虎 |     |  |  |
|                                |                              | 许其凤       | 李天初 | 谭述森 |     |     |     |  |  |
|                                |                              | 张军        |     |     |     |     |     |  |  |
|                                |                              | (按姓氏笔画排序) |     |     |     |     |     |  |  |
|                                |                              | 丁群        | 王刚  | 王岗  | 王志鹏 | 王京涛 |     |  |  |
|                                |                              | 王宝华       | 王晓光 | 王清太 | 牛飞  | 毛悦  |     |  |  |
|                                |                              | 尹继凯       | 卢晓春 | 吕小平 | 朱衍波 | 伍蔡伦 |     |  |  |
|                                |                              | 任立明       | 刘成  | 刘华  | 刘利  | 刘天雄 |     |  |  |
|                                |                              | 刘迎春       | 许西安 | 许丽丽 | 孙倩  | 孙汉荣 |     |  |  |
|                                |                              | 孙越强       | 严颂华 | 李星  | 李罡  | 李隽  |     |  |  |
|                                |                              | 李锐        | 李孝辉 | 李建文 | 李建利 | 李博峰 |     |  |  |
|                                |                              | 杨俊        | 杨慧  | 杨东凯 | 何海波 | 汪勃  |     |  |  |
|                                |                              | 汪陶胜       | 宋小勇 | 张小红 | 张国柱 | 张爱敏 |     |  |  |
|                                |                              | 陆明泉       | 陈晶  | 陈金平 | 陈建云 | 陈韬鸣 |     |  |  |
|                                |                              | 林宝军       | 金双根 | 郑晋军 | 赵文军 | 赵齐乐 |     |  |  |
|                                |                              | 郝刚        | 胡刚  | 胡小工 | 俄广西 | 姜毅  |     |  |  |
|                                |                              | 袁洪        | 袁运斌 | 党亚民 | 徐彦田 | 高为广 |     |  |  |
|                                |                              | 郭树人       | 郭海荣 | 唐歌实 | 黄文德 | 黄观文 |     |  |  |
|                                |                              | 黄佩诚       | 韩春好 | 焦文海 | 谢军  | 蔡毅  |     |  |  |
|                                |                              | 蔡志武       | 蔡洪亮 | 裴凌  |     |     |     |  |  |
|                                |                              | 王晓光       |     |     |     |     |     |  |  |

丛书策划



# 卫星导航工程技术丛书

## 编写委员会

主 编 杨元喜  
副 主 编 蔚保国  
委 员 (按姓氏笔画排序)

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 尹继凯 | 朱衍波 | 伍蔡伦 | 刘 利 |
| 刘天雄 | 李 隽 | 杨 慧 | 宋小勇 |
| 张小红 | 陈金平 | 陈建云 | 陈韬鸣 |
| 金双根 | 赵文军 | 姜 毅 | 袁 洪 |
| 袁运斌 | 徐彦田 | 黄文德 | 谢 军 |
| 蔡志武 |     |     |     |



宇宙浩瀚、海洋无际、大漠无垠、丛林层密、山峦叠嶂,这就是我们生活的空间,这就是我们探索的远方。我在何处?我之去向?这是我们每天都必须面对的问题。从原始人巡游狩猎、航行海洋,到近代人周游世界、遨游太空,无一不需要定位和导航。

正如《北斗赋》所描述,乘舟而惑,不知东西,见斗则寤矣。又戒之,瀚海识途,昼则观日,夜则观星矣。我们的祖先不仅为后人指明了“昼观日,夜观星”的天文导航法,而且还发明了“司南”或“指南针”定向法。我们为祖先的聪颖智慧而自豪,但是又不得不面临新的定位、导航与授时(PNT)需求。信息化社会、智能化建设、智慧城市、数字地球、物联网、大数据等,无一不需要统一时间、空间信息的支持。为顺应新的需求,“卫星导航”应运而生。

卫星导航始于美国子午仪系统,成形于美国的全球定位系统(GPS)和俄罗斯的全球卫星导航系统(GLONASS),发展于中国的北斗卫星导航系统(BDS)(简称“北斗系统”)和欧盟的伽利略卫星导航系统(简称“Galileo系统”),补充于印度及日本的区域卫星导航系统。卫星导航系统是时间、空间信息服务的基础设施,是国防建设和国家经济建设的基础设施,也是政治大国、经济强国、科技强国的基本象征。

中国的北斗系统不仅是我国PNT体系的重要基础设施,也是国家经济、科技与社会发展的重要标志,是改革开放的重要成果之一。北斗系统不仅“标新”“立异”,而且“特色”鲜明。标新于设计(混合星座、信号调制、云平台运控、星间链路、全球报文通信等),立异于功能(一体化星基增强、嵌入式精密单点定位、嵌入式全球搜救等服务),特色于应用(报文通信、精密位置服务等)。标新立异和特色服务是北斗系统的立身之本,也是北斗系统推广应用的基础。

2020年6月23日,北斗系统最后一颗卫星发射升空,标志着中国北斗全球卫星导航系统卫星组网完成;2020年7月31日,北斗系统正式向全球用户开通服务,标

标志着中国北斗全球卫星导航系统进入运行维护阶段。为了全面反映中国北斗系统建设成果,同时也为了推进北斗系统的广泛应用,我们紧跟北斗工程的成功进展,组织北斗系统建设的部分技术骨干,撰写了卫星导航工程技术丛书,系统地描述北斗系统的最新发展、创新设计和特色应用成果。丛书共 26 个分册,分别介绍如下:

卫星导航定位遵循几何交会原理,但又涉及无线电信号传输的大气物理特性以及卫星动力学效应。《卫星导航定位原理》全面阐述卫星导航定位的基本概念和基本原理,侧重卫星导航概念描述和理论论述,包括北斗系统的卫星无线电测定业务(RDSS)原理、卫星无线电导航业务(RNSS)原理、北斗三频信号最优组合、精密定轨与时间同步、精密定位模型和自主导航理论与算法等。其中北斗三频信号最优组合、自适应卫星轨道测定、自主定轨理论与方法、自适应导航定位等均是作者团队近年来的研究成果。此外,该书第一次较详细地描述了“综合 PNT”、“微 PNT”和“弹性 PNT”基本框架,这些都可望成为未来 PNT 的主要发展方向。

北斗系统由空间段、地面运行控制系统和用户段三部分构成,其中空间段的组网卫星是系统建设最核心的核心组成部分。《北斗导航卫星》描述我国北斗导航卫星研制历程及其取得的成果,论述导航卫星环境和任务要求、导航卫星总体设计、导航卫星平台、卫星有效载荷和星间链路等内容,并对未来卫星导航系统和关键技术的发展进行展望,特色的载荷、特色的功能设计、特色的组网,成就了特色的北斗导航卫星星座。

卫星导航信号的连续可用是卫星导航系统的根本要求。《北斗导航卫星可靠性工程》描述北斗导航卫星在工程研制中的系列可靠性研究成果和经验。围绕高可靠性、高可用性,论述导航卫星及星座的可靠性定性定量要求、可靠性设计、可靠性建模与分析等,侧重描述可靠性指标论证和分解、星座及卫星可用性设计、中断及可用性分析、可靠性试验、可靠性专项实施等内容。围绕导航卫星批量研制,分析可靠性工作的特殊性,介绍工艺可靠性、过程故障模式及其影响、贮存可靠性、备份星论证等批产可靠性保证技术内容。

卫星导航系统的运行与服务需要精密的时间同步和高精度的卫星轨道支持。《卫星导航时间同步与精密定轨》侧重描述北斗导航卫星高精度时间同步与精密定轨相关理论与方法,包括:相对论框架下时间比对基本原理、星地/站间各种时间比对技术及误差分析、高精度钟差预报方法、常规状态下导航卫星轨道精密测定与预报等;围绕北斗系统独有的技术体制和运行服务特点,详细论述星地无线电双向时间比对、地球静止轨道/倾斜地球同步轨道/中圆地球轨道(GEO/IGSO/MEO)混合星座精

精密定轨及轨道快速恢复、基于星间链路的时间同步与精密定轨、多源数据系统性偏差综合解算等前沿技术与方法；同时，从系统信息生成者角度，给出用户使用北斗卫星导航电文的具体建议。

北斗卫星发射与早期轨道段测控、长期运行段卫星及星座高效测控是北斗卫星发射组网、补网，系统连续、稳定、可靠运行与服务的核心要素之一。《导航星座测控管理系统》详细描述北斗系统的卫星/星座测控管理总体设计、系列关键技术及其解决途径，如测控系统总体设计、地面测控网总体设计、基于轨道参数偏置的 MEO 和 IGSO 卫星摄动补偿方法、MEO 卫星轨道构型重构控制评价指标体系及优化方案、分布式数据中心设计方法、数据一体化存储与多级共享自动迁移设计等。

波束测量是卫星测控的重要创新技术。《卫星导航数字多波束测量系统》阐述数字波束形成与扩频测量传输深度融合机理，梳理数字多波束多星测量技术体制的最新成果，包括全分散式数字多波束测量装备体系架构、单站系统对多星的高效测量管理技术、数字波束时延概念、数字多波束时延综合处理方法、收发链路波束时延误差控制、数字波束时延在线精确标校管理等，描述复杂星座时空测量的地面基准确定、恒相位中心多波束动态优化算法、多波束相位中心恒定解决方案、数字波束合成条件下高精度星地链路测量、数字多波束测量系统性能测试方法等。

工程测试是北斗系统建设与应用的重要环节。《卫星导航系统工程测试技术》结合我国北斗三号工程建设中的重大测试、联试及试验，成体系地介绍卫星导航系统工程的测试评估技术，既包括卫星导航工程的卫星、地面运行控制、应用三大组成部分的测试技术及系统间大型测试与试验，也包括工程测试中的组织管理、基础理论和时延测量等关键技术。其中星地对接试验、卫星在轨测试技术、地面运行控制系统测试等内容都是我国北斗三号工程建设的实践成果。

卫星之间的星间链路体系是北斗三号卫星导航系统的重要标志之一，为北斗系统的全球服务奠定了坚实基础，也为构建未来天基信息网络提供了技术支撑。《卫星导航系统星间链路测量与通信原理》介绍卫星导航系统星间链路测量通信概念、理论与方法，论述星间链路在星历预报、卫星之间数据传输、动态无线组网、卫星导航系统性能提升等方面的重要作用，反映了我国全球卫星导航系统星间链路测量通信技术的最新成果。

自主导航技术是保证北斗地面系统应对突发灾难事件、可靠维持系统常规服务性能的重要手段。《北斗导航卫星自主导航原理与方法》详细介绍了自主导航的基本理论、星座自主定轨与时间同步技术、卫星自主完好性监测技术等自主导航关键技



术及解决方法。内容既有理论分析,也有仿真和实测数据验证。其中在自主时空基准维持、自主定轨与时间同步算法设计等方面的研究成果,反映了北斗自主导航理论和工程应用方面的新进展。

卫星导航“完好性”是安全导航定位的核心指标之一。《卫星导航系统完好性原理与方法》全面阐述系统基本完好性监测、接收机自主完好性监测、星基增强系统完好性监测、地基增强系统完好性监测、卫星自主完好性监测等原理和方法,重点介绍相应的系统方案设计、监测处理方法、算法原理、完好性性能保证等内容,详细描述我国北斗系统完好性设计与实现技术,如基于地面运行控制系统的基本完好性的监测体系、顾及卫星自主完好性的监测体系、系统基本完好性和用户端有机结合的监测体系、完好性性能测试评估方法等。

时间是卫星导航的基础,也是卫星导航服务的重要内容。《时间基准与授时服务》从时间的概念形成开始:阐述从古代到现代人类关于时间的基本认识,时间频率的理论形成、技术发展、工程应用及未来前景等;介绍早期的牛顿绝对时空观、现代的爱因斯坦相对时空观及以霍金为代表的宇宙学时空观等;总结梳理各类时空观的内涵、特点、关系,重点分析相对论框架下的常用理论时标,并给出相互转换关系;重点阐述针对我国北斗系统的时间频率体系研究、体制设计、工程应用等关键问题,特别对时间频率与卫星导航系统地面、卫星、用户等各部分之间的密切关系进行了较深入的理论分析。

卫星导航系统本质上是一种高精度的时间频率测量系统,通过对时间信号的测量实现精密测距,进而实现高精度的定位、导航和授时服务。《卫星导航精密时间传递系统及应用》以卫星导航系统中的时间为切入点,全面系统地阐述卫星导航系统中的高精度时间传递技术,包括卫星导航授时技术、星地时间传递技术、卫星双向时间传递技术、光纤时间频率传递技术、卫星共视时间传递技术,以及时间传递技术在多个领域中的应用案例。

空间导航信号是连接导航卫星、地面运行控制系统和用户之间的纽带,其质量的好坏直接关系到全球卫星导航系统(GNSS)的定位、测速和授时性能。《GNSS空间信号质量监测评估》从卫星导航系统地面运行控制和测试角度出发,介绍导航信号生成、空间传播、接收处理等环节的数学模型,并从时域、频域、测量域、调制域和相关域监测评估等方面,系统描述工程实现算法,分析实测数据,重点阐述低失真接收、交替采样、信号重构与监测评估等关键技术,最后对空间信号质量监测评估系统体系结构、工作原理、工作模式等进行论述,同时对空间信号质量监测评估应用实践进行总结。

北斗系统地面运行控制系统建设与维护是一项极其复杂的工程。地面运行控制系统的仿真测试与模拟训练是北斗系统建设的重要支撑。《卫星导航地面运行控制系统仿真测试与模拟训练技术》详细阐述地面运行控制系统主要业务的仿真测试理论与方法,系统分析全球主要卫星导航系统地面控制段的功能组成及特点,描述地面控制段一整套仿真测试理论和方法,包括卫星导航数学建模与仿真方法、仿真模型的有效性验证方法、虚-实结合的仿真测试方法、面向协议测试的通用接口仿真方法、复杂仿真系统的开放式体系架构设计方法等。最后分析了地面运行控制系统操作人员岗前培训对训练环境和训练设备的需求,提出利用仿真系统支持地面操作人员岗前培训的技术和具体实施方法。

卫星导航信号严重受制于地球空间电离层延迟的影响,利用该影响可实现电离层变化的精细监测,进而提升卫星导航电离层延迟修正效果。《卫星导航电离层建模与应用》结合北斗系统建设和应用需求,重点论述了北斗系统广播电离层延迟及区域增强电离层延迟改正模型、码偏差处理方法及电离层模型精化与电离层变化监测等内容,主要包括北斗全球广播电离层时延改正模型、北斗全球卫星导航差分码偏差处理方法、面向我国低纬地区的北斗区域增强电离层延迟修正模型、卫星导航全球广播电离层模型改进、卫星导航全球与区域电离层延迟精确建模、卫星导航电离层层析反演及扰动探测方法、卫星导航定位电离层时延修正的典型方法等,体系化地阐述和总结了北斗系统电离层建模的理论、方法与应用成果及特色。

卫星导航终端是卫星导航系统服务的端点,也是体现系统服务性能的重要载体,所以卫星导航终端本身必须具备良好的性能。《卫星导航终端测试系统原理与应用》详细介绍并分析卫星导航终端测试系统的分类和实现原理,包括卫星导航终端的室内测试、室外测试、抗干扰测试等系统的构成和实现方法以及我国第一个大型室外导航终端测试环境的设计技术,并详述各种测试系统的工程实践技术,形成卫星导航终端测试系统理论研究和工程应用的较完整体系。

卫星导航系统 PNT 服务的精度、完好性、连续性、可用性是系统的关键指标,而卫星导航系统必然存在卫星轨道误差、钟差以及信号大气传播误差,需要增强系统来提高服务精度和完好性等关键指标。卫星导航增强系统是有效削弱大多数系统误差的重要手段。《卫星导航增强系统原理与应用》根据国际民航组织有关全球卫星导航系统服务的标准和操作规范,详细阐述了卫星导航系统的星基增强系统、地基增强系统、空基增强系统以及差分系统和低轨移动卫星导航增强系统的原理与应用。

与卫星导航增强系统原理相似,实时动态(RTK)定位也采用差分定位原理削弱各类系统误差的影响。《GNSS 网络 RTK 技术原理与工程应用》侧重介绍网络 RTK 技术原理和工作模式。结合北斗系统发展应用,详细分析网络 RTK 定位模型和各类误差特性以及处理方法、基于基准站的大气延迟和整周模糊度估计与北斗三频模糊度快速固定算法等,论述空间相关误差区域建模原理、基准站双差模糊度转换为非差模糊度相关技术途径以及基准站双差和非差一体化定位方法,综合介绍网络 RTK 技术在测绘、精准农业、变形监测等方面的应用。

GNSS 精密单点定位(PPP)技术是在卫星导航增强原理和 RTK 原理的基础上发展起来的精密定位技术,PPP 方法一经提出即得到同行的极大关注。《GNSS 精密单点定位理论方法及其应用》是国内第一本全面系统论述 GNSS 精密单点定位理论、模型、技术方法和应用的学术专著。该书从非差观测方程出发,推导并建立 BDS/GNSS 单频、双频、三频及多频 PPP 的函数模型和随机模型,详细讨论非差观测数据预处理及各类误差处理策略、缩短 PPP 收敛时间的系列创新模型和技术,介绍 PPP 质量控制与质量评估方法、PPP 整周模糊度解算理论和方法,包括基于原始观测模型的北斗三频载波相位小数偏差的分离、估计和外推问题,以及利用连续运行参考站网增强 PPP 的概念和方法,阐述实时精密单点定位的关键技术和典型应用。

GNSS 信号到达地表产生多路径延迟,是 GNSS 导航定位的主要误差源之一,反过来可以估计地表介质特征,即 GNSS 反射测量。《GNSS 反射测量原理与应用》详细、全面地介绍全球卫星导航系统反射测量原理、方法及应用,包括 GNSS 反射信号特征、多路径反射测量、干涉模式技术、多普勒时延图、空基 GNSS 反射测量理论、海洋遥感、水文遥感、植被遥感和冰川遥感等,其中利用 BDS/GNSS 反射测量估计海平面变化、海面风场、有效波高、积雪变化、土壤湿度、冻土变化和植被生长量等内容都是作者的最新研究成果。

伪卫星定位系统是卫星导航系统的重要补充和增强手段。《GNSS 伪卫星定位系统原理与应用》首先系统总结国际上伪卫星定位系统发展的历程,进而系统描述北斗伪卫星导航系统的应用需求和相关理论方法,涵盖信号传输与多路径效应、测量误差模型等多个方面,系统描述 GNSS 伪卫星定位系统(中国伽利略测试场测试型伪卫星)、自组网伪卫星系统(Locata 伪卫星和转发式伪卫星)、GNSS 伪卫星增强系统(闭环同步伪卫星和非同步伪卫星)等体系结构、组网与高精度时间同步技术、测量与定位方法等,系统总结 GNSS 伪卫星在各个领域的成功应用案例,包括测绘、工业

控制、军事导航和 GNSS 测试试验等,充分体现出 GNSS 伪卫星的“高精度、高完好性、高连续性和高可用性”的应用特性和应用趋势。

GNSS 存在易受干扰和欺骗的缺点,但若与惯性导航系统(INS)组合,则能发挥两者的优势,提高导航系统的综合性能。《高精度 GNSS/INS 组合定位及测姿技术》系统描述北斗卫星导航/惯性导航相结合的组合定位基础理论、关键技术以及工程实践,重点阐述不同方式组合定位的基本原理、误差建模、关键技术以及工程实践等,并将组合定位与高精度定位相互融合,依托移动测绘车组合定位系统进行典型设计,然后详细介绍组合定位系统的多种应用。

未来 PNT 应用需求逐渐呈现出多样化的特征,单一导航源在可用性、连续性和稳健性方面通常不能全面满足需求,多源信息融合能够实现不同导航源的优势互补,提升 PNT 服务的连续性和可靠性。《多源融合导航技术及其演进》系统分析现有主要导航手段的特点、多源融合导航终端的总体构架、多源导航信息时空基准统一方法、导航源质量评估与故障检测方法、多源融合导航场景感知技术、多源融合数据处理方法等,依托车辆的室内外无缝定位应用进行典型设计,探讨多源融合导航技术未来发展趋势,以及多源融合导航在 PNT 体系中的作用和地位等。

卫星导航系统是典型的军民两用系统,一定程度上改变了人类的生产、生活和斗争方式。《卫星导航系统典型应用》从定位服务、位置报告、导航服务、授时服务和军事应用 5 个维度系统阐述卫星导航系统的应用范例。“天上好用,地上用好”,北斗卫星导航系统只有服务于国计民生,才能产生价值。

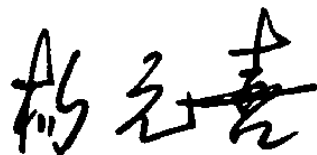
海洋定位、导航、授时、报文通信以及搜救是北斗系统对海事应用的重要特色贡献。《北斗卫星导航系统海事应用》梳理分析国际海事组织、国际电信联盟、国际海事无线电技术委员会等相关国际组织发布的 GNSS 在海事领域应用的相关技术标准,详细阐述全球海上遇险与安全系统、船舶自动识别系统、船舶动态监控系统、船舶远程识别与跟踪系统以及海事增强系统等的工作原理及在海事导航领域的具体应用。

将卫星导航技术应用于民用航空,并满足飞行安全性对导航完好性的严格要求,其核心是卫星导航增强技术。未来的全球卫星导航系统将呈现多个星座共同运行的局面,每个星座均向民航用户提供至少 2 个频率的导航信号。双频多星座卫星导航增强技术已经成为国际民航下一代航空运输系统的核心技术。《民用航空卫星导航增强新技术与应用》系统阐述多星座卫星导航系统的运行概念、先进接收机自主完好性监测技术、双频多星座星基增强技术、双频多星座地基增强技术和实时精密定位

技术等的原理和方法,介绍双频多星座卫星导航系统在民航领域应用的关键技术、算法实现和应用实施等。

本丛书全面反映了我国北斗系统建设工程的主要成就,包括导航定位原理,工程实现技术,卫星平台和各类载荷技术,信号传输与处理理论及技术,用户定位、导航、授时处理技术等。各分册:虽有侧重,但又相互衔接;虽自成体系,又避免大量重复。整套丛书力求理论严密、方法实用,工程建设内容力求系统,应用领域力求全面,适合从事卫星导航工程建设、科研与教学人员学习参考,同时也为从事北斗系统应用研究和开发的广大科技人员提供技术借鉴,从而为建成更加完善的北斗综合 PNT 体系做出贡献。

最后,让我们从中国科技发展史的角度,来评价编撰和出版本丛书的深远意义,那就是:将中国卫星导航事业发展的重要的里程碑式的阶段永远地铭刻在历史的丰碑上!



2020年8月

全球卫星导航系统(GNSS)能在地球表面或近地空间的任何地点为用户提供全天候的三维坐标和速度信息,包括美国全球定位系统(GPS)、中国北斗卫星导航系统(BDS)、俄罗斯全球卫星导航系统(GLONASS)和欧盟伽利略卫星导航系统(Galileo系统),以及区域增强系统,具有全天候、全天时、高精度的特点,广泛应用于定位、导航与授时(PNT)。随着各卫星导航系统的逐渐完善,星座的增多,观测站的增加,其应用领域越来越广泛。GNSS不仅应用于定位、导航和授时,还可以利用其表面反射信号进行遥感观测。GNSS卫星持续向地球播发无线电信号,其中部分信号会被地球表面反射回来。从粗糙表面反射回来的GNSS延迟信号可以提供直射和反射信号不同的信息。这些信息包括反射信号的波形、幅值、相位和频率等变化,极化特征的变化直接与反射面相关,结合接收机天线位置和介质信息,利用延迟测量观测和反射表面属性可以确定表面粗糙度和表面特性,即GNSS反射测量(GNSS-R)。

GNSS反射测量由欧洲空间局(ESA) Martin-Neira于1993年提出,即GNSS地表反射信号和直射信号一起被接收机接收,它们之间的延迟可以用于干涉测量,即被动反射和干涉测量系统(PARIS)。随后各国利用双频GPS信号进行海面 and 陆面各种试验,对其反射信号的相关函数特性进行研究,表明反射信号相关函数与反射面的粗糙度有密切关系。如2000年10月,美国国家海洋与大气管理局(NOAA)的“飓风猎人”号飞机搭载了GNSS-R设备从南卡来罗纳州海岸飞入“迈克尔”飓风内,通过分析从热带气旋海面上反射回来的GPS信号得到了风速结果。2003年,英国灾害监测星座(UK-DMC)卫星利用搭载的GNSS-R设备成功获得了海面粗糙度等地球表面物理系数,静海区域的GPS反射信号同样可以得到高精度的测高结果。2014年第一颗技术验证卫星(TDS-1)发射,提供时延-多普勒图像(DDM)数据产品,开启了星载GNSS反射测量的应用。此外,许多其他科研机构也开展了一系列GNSS反射信号的理论研究和试验、新型GNSS-R接收机的研制,以及基于地基、海岸、桥梁、飞机等不同平台的试验,同时还进行了测试信号接收、原理验证,以及检验利用GNSS-R估计海面状况(如海面高和风速)和陆面参数等研究,获得了一些初步结果和进展。

GNSS-R技术属于双基雷达观测,具有如下特点:①利用直射信号进行定位解算,具有自定位定时能力;②接收机直射信号与反射信号之间误差较小;③可全天候

工作,不受云雨等天气影响;④使用 L 频段电磁波,其信号穿透力强,可穿透植被、雪、沙土等,对土壤中水分尤其敏感;⑤L 频段电磁波信号反射时衰减明显,高达 29 ~ 30dB,且在反射时极化方向会发生改变,如右旋直射信号会变成以左旋反射信号为主,根据极化方向可分离直射信号与反射信号。利用 GNSS-R 技术可获得地表粗糙特征和地球物理参数,即利用 GNSS 直射信号与地表镜面反射信号之间的延迟(时间延迟或相位延迟),以及根据 GNSS 卫星、接收机和镜面反射点之间的几何位置关系,反演地表特征。GNSS-R 技术包括传统型 GNSS-R (cGNSS-R)测高和干涉型 GNSS-R (iGNSS-R)测高。前者是配置左右圆极化天线并利用接收机记录的直射信号与反射信号的载波相位数据,通过固定模糊度和解算接收机钟差等方式,确定两者之间的传播路径延迟,进而计算天线至水面的高度;后者是利用直射信号与反射信号功率波形相关的原理,测得信号时延,进而计算得到天线到海面的垂直距离,但其涉及复杂的多普勒时延算法,数据处理方法复杂。海平面高度(SSH)变化范围广,对海洋学和气候学等研究都具有重要意义,如海洋环流、海洋潮汐模型建立、海啸预警以及中尺度气候研究。按照接收机放置的测量平台,GNSS-R 测高可分为地基、机载和星载 GNSS-R 测高。

GNSS-R 遥感技术是利用 GNSS 反射信号对海洋、陆地或冰川进行遥感探测的新兴手段。GNSS 卫星提供免费且长期稳定的 L 频段信号源,可充分发挥自身优势——全天候、全天时、覆盖范围广、时空分辨率高等。在海洋遥感上,可以进行海洋测高、反演海面风场、估计海水盐度以及海面溢油;在陆地遥感上,利用微波波段对水分敏感的特性,可以估计土壤湿度和植物生长量;在冰川遥感上,充分利用 GNSS 在时空分辨率上的优势,可以测量海冰厚度、积雪厚度、密度、粗糙度等。目前,GNSS-R 在海洋、土壤湿度和冰雪等遥感监测方面取得了较好的进展。随着 GNSS-R 技术的发展,将来或可能监测火山、地震形变和滑坡等自然灾害。

目前 GNSS 反射和散射信号作为一种遥感工具,被广泛应用于海洋、陆地、水文以及冰冻圈等研究领域。随着越来越多的全球永久国际 GNSS 服务(IGS)跟踪站和区域性 GNSS 连续跟踪站,多频多系统 GNSS 导航卫星星座以及空基增强系统,例如 GPS、BDS、GLONASS、Galileo 系统、日本准天顶卫星系统(QZSS)以及印度区域卫星导航系统(IRNSS)的投入使用,GNSS 地面跟踪站将能够获得更多的地表反射特征。随着将来越来越多的空基 GNSS 反射和折射实验计划的实施(如 FORMOSAT-7/COSMIC-2 和 CYGNSS 计划),人们将获取更多的高时空分辨率的地表特征信息。另外,相关人员正在研发更先进的 GNSS 接收机,以满足不同的应用需求,如未来空基高性能准实时数据处理能力(例如具备多模 GNSS 反射和折射测量功能的下一代 Tri-GNSS接收机)。未来几年里,公众使用一些大学等机构研发的低成本卫星将成为可能,GNSS 反射信号在遥感领域的应用也将扩展到全球范围。

本书详细和全面地介绍 GNSS-R 的原理、方法及应用,包括 GNSS-R 历史、反射信号特性、地基 GNSS 多路径反射测量、干涉模式技术、多普勒时延图、空基 GNSS 反

射测量理论、海洋测高、水文遥感、植被监测、冰冻圈遥感等。本书较好地反映了国内外该领域研究现状和最新应用进展,并具有一定的前瞻性。著者一直从事 GNSS-R 理论和方法研究及应用,本书的主要内容为作者多年的工作积累,绝大部分为原创性的理论方法和应用研究进展,这些内容逐渐得到同学科领域的专家认可,主要科研成果如 GNSS-R 散射机理、GNSS-R 新应用等反映了本学科的最前沿动态,达到国际同类学术/技术水平,对海洋环境监测、资源环境遥感、全球变化监测、冰川冻土监测、气象农业应用等具有重要的参考价值和应用前景。

全书共 14 章,其中:金双根撰写第 1~5 章、第 12 章、第 14 章,以及第 6~8 章和第 10 章节部分内容;吴学睿撰写第 11 章、第 13 章,以及第 10 章部分内容;邱辉撰写第 8 章节,以及第 6 章部分内容;董州楠撰写第 9 章,以及第 7 章部分内容;李君海、钱晓东和彭沁贡献了部分工作。另外,感谢中国航天科技集团公司的丛飞为本书局部内容进行了修正。

由于时间有限,书中难免存在错误或不足,敬请同仁批评指正。

著者

2020 年 8 月





|                              |    |
|------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....        | 1  |
| 1.1 全球卫星导航系统 .....           | 1  |
| 1.2 GNSS-R 技术 .....          | 3  |
| 1.2.1 GNSS-R 历史 .....        | 3  |
| 1.2.2 GNSS-R 特点 .....        | 4  |
| 1.3 GNSS-R 应用 .....          | 5  |
| 1.3.1 海洋测高 .....             | 5  |
| 1.3.2 海面测风 .....             | 5  |
| 1.3.3 土壤湿度探测 .....           | 6  |
| 1.3.4 植被监测 .....             | 7  |
| 1.3.5 积雪探测 .....             | 7  |
| 1.3.6 海冰探测 .....             | 8  |
| 1.4 结论 .....                 | 9  |
| 参考文献 .....                   | 9  |
| <b>第 2 章 GNSS 信号基础</b> ..... | 12 |
| 2.1 GNSS 信号结构 .....          | 12 |
| 2.1.1 载波信号 .....             | 12 |
| 2.1.2 伪随机噪声码 .....           | 13 |
| 2.1.3 导航电文 .....             | 16 |
| 2.2 GNSS 信号调制 .....          | 17 |
| 2.2.1 调制方式 .....             | 17 |
| 2.2.2 调制过程 .....             | 18 |
| 2.3 GNSS 信号捕获与跟踪 .....       | 21 |
| 2.3.1 捕获方法 .....             | 21 |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| 2.3.2 信号接收与解调 .....              | 22        |
| 参考文献 .....                       | 23        |
| <b>第3章 GNSS 反射信号特征</b> .....     | <b>24</b> |
| 3.1 电磁波极化与反射 .....               | 24        |
| 3.1.1 电磁波极化 .....                | 24        |
| 3.1.2 电磁波反射 .....                | 26        |
| 3.2 GNSS 反射信号基础 .....            | 28        |
| 3.2.1 GNSS 反射信号特征 .....          | 29        |
| 3.2.2 GNSS-R 反射系数 .....          | 31        |
| 3.3 反射信号描述 .....                 | 31        |
| 3.3.1 直射信号 .....                 | 31        |
| 3.3.2 反射信号 .....                 | 32        |
| 3.4 反射信号几何关系 .....               | 33        |
| 3.4.1 地基 GNSS-R .....            | 33        |
| 3.4.2 空基 GNSS-R .....            | 36        |
| 3.5 GNSS-R 观测模式 .....            | 39        |
| 3.5.1 双天线模式 .....                | 39        |
| 3.5.2 单天线模式 .....                | 40        |
| 3.6 结论 .....                     | 41        |
| 参考文献 .....                       | 41        |
| <b>第4章 地基 GNSS 多路径反射测量</b> ..... | <b>43</b> |
| 4.1 GNSS 多路径特征 .....             | 44        |
| 4.1.1 物理反射 .....                 | 44        |
| 4.1.2 反射特性 .....                 | 46        |
| 4.1.3 多路径变化 .....                | 47        |
| 4.2 多路径估计 .....                  | 48        |
| 4.2.1 SNR 方法 .....               | 48        |
| 4.2.2 L4 线性组合方法 .....            | 50        |
| 4.2.3 三频观测值组合方法 .....            | 50        |
| 4.3 地表参数估计 .....                 | 52        |
| 4.3.1 积雪厚度 .....                 | 52        |
| 4.3.2 土壤湿度 .....                 | 53        |
| 4.3.3 植被生长 .....                 | 53        |
| 4.3.4 海岸海平面变化 .....              | 54        |

|            |                    |           |
|------------|--------------------|-----------|
| 4.4        | 结论                 | 54        |
|            | 参考文献               | 54        |
| <b>第5章</b> | <b>干涉技术和多普勒时延图</b> | <b>56</b> |
| 5.1        | 干涉模式技术             | 56        |
| 5.1.1      | 互相干模型              | 56        |
| 5.1.2      | 极化影响               | 57        |
| 5.1.3      | 表面粗糙度影响            | 58        |
| 5.2        | IPT与SNR比较          | 58        |
| 5.3        | DDM理论与模型           | 59        |
| 5.3.1      | DDM理论              | 59        |
| 5.3.2      | 散射模型               | 59        |
| 5.3.3      | 散射系数               | 60        |
| 5.3.4      | 参数获取               | 61        |
| 5.4        | DDM应用              | 62        |
| 5.4.1      | 海洋遥感               | 62        |
| 5.4.2      | 土壤/植被监测            | 64        |
| 5.5        | 结论                 | 65        |
|            | 参考文献               | 66        |
| <b>第6章</b> | <b>测高理论与方法</b>     | <b>68</b> |
| 6.1        | GNSS-R测高原理         | 69        |
| 6.1.1      | 传统型GNSS-R测高        | 69        |
| 6.1.2      | 干涉型GNSS-R测高        | 71        |
| 6.2        | GNSS-R水面高估计        | 73        |
| 6.2.1      | 计算方法               | 73        |
| 6.2.2      | 反射点位置计算            | 75        |
| 6.2.3      | 分辨率和精度分析           | 78        |
| 6.3        | 有效波高测量             | 79        |
| 6.3.1      | SNR方法              | 80        |
| 6.3.2      | IPT方法              | 80        |
| 6.3.3      | ICF方法              | 81        |
| 6.3.4      | 反演模型               | 82        |
| 6.3.5      | 精度分析               | 83        |
| 6.4        | 潮汐测量               | 83        |
| 6.5        | 海冰监测               | 84        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 参考文献 .....                        | 87         |
| <b>第 7 章 空基 GNSS 反射测量理论 .....</b> | <b>91</b>  |
| 7.1 镜面反射和漫反射 .....                | 94         |
| 7.1.1 镜面反射 .....                  | 94         |
| 7.1.2 漫反射 .....                   | 95         |
| 7.2 延迟和多普勒频移 .....                | 95         |
| 7.3 反射率和极化信号 .....                | 96         |
| 7.3.1 海水菲涅耳系数 .....               | 96         |
| 7.3.2 土壤菲涅耳系数 .....               | 97         |
| 7.4 散射理论 .....                    | 98         |
| 7.5 表面建模 .....                    | 102        |
| 7.5.1 海洋波谱 .....                  | 102        |
| 7.5.2 表面坡度概率 .....                | 104        |
| 7.6 参数反演理论方法 .....                | 106        |
| 参考文献 .....                        | 109        |
| <b>第 8 章 海面高与有效波高估计 .....</b>     | <b>112</b> |
| 8.1 岸基 GNSS-R 海面高估计 .....         | 112        |
| 8.1.1 观测值和方法 .....                | 112        |
| 8.1.2 海平面变化 .....                 | 115        |
| 8.2 空基 GNSS-R 海面高估计 .....         | 120        |
| 8.2.1 观测数据与方法 .....               | 121        |
| 8.2.2 海面高计算 .....                 | 125        |
| 8.2.3 结果与评估 .....                 | 125        |
| 8.2.4 误差分析 .....                  | 129        |
| 8.2.5 小结 .....                    | 130        |
| 8.3 有效波高估计 .....                  | 130        |
| 8.3.1 观测和数据处理 .....               | 131        |
| 8.3.2 结果和评估 .....                 | 134        |
| 8.3.3 小结 .....                    | 139        |
| 8.4 结论 .....                      | 140        |
| 参考文献 .....                        | 140        |
| <b>第 9 章 海面风估计 .....</b>          | <b>143</b> |
| 9.1 星载 GNSS-R 风速反演理论与方法 .....     | 144        |

|               |                            |            |
|---------------|----------------------------|------------|
| 9.1.1         | 双基雷达方程 .....               | 144        |
| 9.1.2         | GNSS-R 风速反演观测量 .....       | 145        |
| 9.1.3         | 经验风速反演算法 .....             | 146        |
| 9.2           | 结果与验证 .....                | 148        |
| 9.2.1         | 基于 ERA5 和 GDAS 的风速估计 ..... | 148        |
| 9.2.2         | 基于 CCMP 的风速估计 .....        | 150        |
| 9.2.3         | 浮标数据评估 .....               | 152        |
| 9.3           | 影响分析 .....                 | 153        |
| 9.4           | 误差源分析 .....                | 155        |
| 9.4.1         | 硬件误差 .....                 | 155        |
| 9.4.2         | 随机误差 .....                 | 156        |
| 9.4.3         | 海面状态误差 .....               | 156        |
| 9.4.4         | 大气衰减 .....                 | 156        |
| 9.4.5         | 反演算法误差 .....               | 157        |
| 9.5           | 结论 .....                   | 157        |
|               | 参考文献 .....                 | 158        |
| <b>第 10 章</b> | <b>土壤湿度遥感 .....</b>        | <b>160</b> |
| 10.1          | 地基 GNSS 估计土壤湿度 .....       | 162        |
| 10.1.1        | SNR 反演方法 .....             | 162        |
| 10.1.2        | 干涉模式技术方法 .....             | 164        |
| 10.2          | 塔基/机载 GNSS-R 土壤湿度反演 .....  | 166        |
| 10.2.1        | 塔基 BAO 塔观测 .....           | 166        |
| 10.2.2        | 机载实验 .....                 | 166        |
| 10.3          | 星载 GNSS-R 土壤湿度反演 .....     | 167        |
| 10.4          | 理论模拟与结果 .....              | 168        |
| 10.4.1        | 理论模拟 .....                 | 168        |
| 10.4.2        | 模拟结果 .....                 | 171        |
| 10.5          | 土壤湿度试验观测 .....             | 175        |
| 10.5.1        | 地基实验结果 .....               | 175        |
| 10.5.2        | 空基 GNSS-R 结果 .....         | 178        |
|               | 参考文献 .....                 | 179        |
| <b>第 11 章</b> | <b>植被遥感 .....</b>          | <b>183</b> |
| 11.1          | 散射模型 .....                 | 184        |
| 11.1.1        | Mimics 模型 .....            | 184        |

|               |                          |            |
|---------------|--------------------------|------------|
| 11.1.2        | Bi-Mimics 模型 .....       | 184        |
| 11.1.3        | 波形合成 .....               | 185        |
| 11.1.4        | 镜面散射 .....               | 186        |
| 11.1.5        | 模型验证 .....               | 186        |
| 11.2          | 森林冠层在镜像反射方向上的偏振特性 .....  | 187        |
| 11.2.1        | 圆极化 .....                | 187        |
| 11.2.2        | 其他交叉极化 .....             | 187        |
| 11.2.3        | 各分量对总散射的贡献 .....         | 188        |
| 11.2.4        | 讨论 .....                 | 189        |
| 11.3          | 灵敏度分析 .....              | 190        |
| 11.4          | 结论 .....                 | 192        |
|               | 参考文献 .....               | 192        |
| <b>第 12 章</b> | <b>冰雪遥感 .....</b>        | <b>194</b> |
| 12.1          | 干雪监测 .....               | 194        |
| 12.1.1        | 干雪反射模型 .....             | 194        |
| 12.1.2        | 干雪观测 .....               | 197        |
| 12.2          | 湿雪监测 .....               | 198        |
| 12.2.1        | 概述 .....                 | 198        |
| 12.2.2        | 反演理论与方法 .....            | 199        |
| 12.3          | GNSS 监测湿雪厚度 .....        | 205        |
| 12.3.1        | GPS 监测湿雪厚度 .....         | 205        |
| 12.3.2        | GLONASS 监测湿雪厚度 .....     | 211        |
| 12.3.3        | GPS 和 GLONASS 联合估计 ..... | 216        |
| 12.4          | 探测海冰状态 .....             | 221        |
|               | 参考文献 .....               | 222        |
| <b>第 13 章</b> | <b>监测地表冻融特性 .....</b>    | <b>224</b> |
| 13.1          | 理论模型 .....               | 225        |
| 13.1.1        | 介电常数模型 .....             | 225        |
| 13.1.2        | 反射率模型 .....              | 225        |
| 13.1.3        | 随机粗糙面散射模型 .....          | 226        |
| 13.1.4        | 极化合成 .....               | 226        |
| 13.1.5        | 前向 GPS 多路径模型 .....       | 226        |
| 13.1.6        | 全极化冻融地表时延-多普勒模型 .....    | 227        |
| 13.2          | 理论模拟结果 .....             | 227        |

|               |                       |            |
|---------------|-----------------------|------------|
| 13.2.1        | 冻融土介电常数差别 .....       | 227        |
| 13.2.2        | 地表反射率模拟 .....         | 228        |
| 13.2.3        | 冻/融转换时双基雷达截面的变化 ..... | 230        |
| 13.2.4        | 冻、融土 DDM 波形差 .....    | 231        |
| 13.3          | 实测结果与验证 .....         | 232        |
| 13.3.1        | 单天单星观测验证 .....        | 233        |
| 13.3.2        | 多天多星观测验证 .....        | 234        |
| 13.4          | 影响与讨论 .....           | 236        |
| 13.5          | 结论 .....              | 237        |
|               | 参考文献 .....            | 237        |
| <b>第 14 章</b> | <b>总结和机遇 .....</b>    | <b>240</b> |
| 14.1          | GNSS 遥感现状 .....       | 240        |
| 14.1.1        | 海洋遥感 .....            | 240        |
| 14.1.2        | 水文遥感 .....            | 240        |
| 14.1.3        | 冰冻圈遥感 .....           | 240        |
| 14.2          | 未来发展和机遇 .....         | 241        |
| 14.2.1        | 密集 GNSS 观测网和星座 .....  | 241        |
| 14.2.2        | 高级 GNSS 接收机 .....     | 241        |
| 14.2.3        | 新观测卫星计划 .....         | 242        |
| 14.2.4        | 新兴应用 .....            | 243        |
| 14.3          | 结论 .....              | 243        |
|               | 参考文献 .....            | 244        |
| <b>缩略语</b>    | .....                 | <b>246</b> |