

 **北斗开放实验室**
BDS/GNSS Open Laboratory

北斗技术与应用丛书

北斗卫星导航定位 原理与方法

黄文德 康娟 张利云 李靖 编著



科学出版社

北斗技术与应用丛书

北斗卫星导航定位原理与方法

黄文德 康娟 张利云 李靖 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本着“厚基础、重应用”的原则，本书详细阐述北斗卫星导航定位原理，使读者夯实卫星导航定位基础；重点介绍北斗卫星导航定位的应用方法、处理工具和开发技术，使读者能够灵活应用卫星导航技术和相关工具解决现实问题。全书包括北斗卫星导航系统发展历程、系统组成、运行原理、服务性能与优势特色，以及北斗坐标系统、时间系统、导航信号、导航电文、卫星轨道、接收机设计等基础内容；还包括单点定位、测速与授时、定位精度评估、差分定位、多系统融合定位、常见导航定位处理软件的应用以及导航定位应用程序开发等方法 and 技能。本书尤其注重给出具体步骤，让读者能够应用相关方法和工具解决实际问题。本书介绍了国外 GPS、GLONASS、Galileo 等卫星导航系统相关知识，以便读者学习比较、兼容并包。本书内容丰富、实用性强，力求反映我国北斗卫星导航系统建设和世界主要卫星导航系统建设最新成果以及卫星导航新技术与新应用。

本书既可作为卫星导航定位及相关领域本科生和研究生的教学用书，也可作为从事卫星导航定位的科技工作者和工程师的工具书与参考书。

图书在版编目(CIP)数据

北斗卫星导航定位原理与方法 / 黄文德等编著. —北京: 科学出版社, 2019.11

(北斗技术与应用丛书)

ISBN 978-7-03-060949-6

I. ①北… II. ①黄… III. ①卫星导航-全球定位系统

IV. ①TN967.1 ②P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 058774 号

责任编辑: 潘斯斯 任俊 董素芹 / 责任校对: 王萌萌

责任印制: 张伟 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年11月第一版 开本: 787×1092 1/16

2020年1月第二次印刷 印张: 25 1/2

字数: 618 000

定价: 158.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛书编委会

主 编:

谭述森

副 主 编(按姓氏笔画排序):

吴美平 吴光辉 杨 俊 周建华

赵文军 赵金贤 曹 冲

编 委(按姓氏笔画排序):

王礼亮 王永泉 王 辉 文援兰

史鹏亮 叶祥平 刘志俭 乔纯捷

向常淦 刘金长 何海波 李 峰

李 军 李明栋 张 华 孟川舒

明德祥 岳亚洲 钟小鹏 胡 斌

唐大泉 郭 敏 高关根 黄文德

温日红 彭 明

本书作者:

黄文德 康 娟 张利云 李 靖

北斗卫星导航系统是我国定位、导航和授时(PNT)的重要基础设施。我国着眼于国家安全和经济社会发展需要,自主研制、自主建设、独立运行北斗卫星导航系统,可实现全球用户全天候、全天时、高精度的 PNT 服务。我国于 20 世纪 90 年代开始自行研制北斗卫星导航系统;2000 年底,北斗一号系统建成,使我国成为世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家;到 2012 年,建成了覆盖亚太地区的北斗二号区域卫星导航系统;计划到 2020 年前后,建成覆盖全球的北斗三号全球卫星导航系统,向全球用户提供高精度 PNT 服务,并在此基础上加快构建稳健可靠的国家综合 PNT 服务体系。北斗卫星导航系统正与云计算、物联网、大数据,以及高端制造业、先进软件业等进行深度融合,服务智能社会,推动生产方式和发展模式的变革。

国家利益的拓展、经济全球化及海洋强国战略,都要求我国具有独立自主的 PNT 服务体系。国家利益到哪里,PNT 服务就应该到哪里。当前,北斗卫星导航系统已成为高铁和核电之外的第三张国家名片;优先服务国家“一带一路”倡议,全面服务经济社会发展,正在成为北斗卫星导航系统走向世界的主旋律。

2015 年 10 月,习近平主席在党的十八届五中全会上提出“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念。随即,孙家栋院士倡导的北斗领域资源开放共享平台——北斗开放实验室正式挂牌成立。北斗开放实验室秉承“融合、开放、合作、共赢”的发展理念,以“推动北斗应用”为核心使命,以推动数据、仪器、专家和研究成果等资源的开放共享为主要途径,以吸引国际导航领域人才研究北斗、应用北斗、推广北斗为目标,让发展中的北斗系统不仅服务中国,而且惠及“一带一路”沿线国家和地区,并以更精准、更优质、更可靠的服务造福全人类,成为名副其实的“世界的北斗”。

当前,北斗开放实验室携手区域优势单位已在国内先后建成并开通了 10 余家分实验室,聚集园区、企业、高校等成员单位近 100 家,覆盖了华东、华南、华中、华北、西南、西北、东北等区域,涵盖无线电检测认证、高精度应用、导航信息安全、测试计量检定、智慧城市应用、车载应用等领域,有力推动了北斗卫星导航系统的研究与产业化,拓展了北斗卫星导航系统的应用,支撑了国家“一带一路”倡议的推进。

为了更好地汇聚资源,创新北斗发展和应用模式,总结北斗卫星导航系统建设成果,北斗开放实验室先后组织出版了《卫星导航信号模拟源理论与技术》《卫星导航终端测试评估技术与应用》《卫星导航系统建模与仿真》《BDSim 在卫星导航中的应用》等北斗系列著作,并在行业内引起了良好反响。为进一步加强发挥各分实验室特色优势,北斗开放实验室组织

北斗领域资深专家组成编委会，集中编著出版北斗系统在高铁、电力、海洋渔业、智慧城市、车载导航和导航安全等领域的应用系列丛书。通过该丛书的撰写、编辑、出版和发行，旨在进一步梳理北斗应用特色和潜能，推动北斗产业应用、促进国家综合 PNT 体系建设、普及北斗科学知识以及提升北斗的国际影响力和市场竞争力等。

杨元喜

前 言

运动是人类活动的主要形式之一,其范围已从陆地、海洋、天空到太空,甚至深空。从一个特定位置(当前位置)到另一特定位置(目的位置),往往需要导航。卫星导航系统是一种具有全能性(陆地、海洋、航空及航天)、全天候、连续性和实时性的无线电导航定位系统,它能提供高精度的导航、定位和授时服务,其应用几乎涉及国民经济和社会发展的各个领域,已成为全球发展最快的信息产业之一。

北斗卫星导航系统是我国着眼于国家安全和经济社会发展需要,自主建设、独立运行的全球卫星导航系统,是为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务的国家重要空间基础设施,是我国实施改革开放 40 年来取得的重要成就之一。近年来,我国卫星导航产业进入快速增长期,卫星导航与位置服务年产值逐年增长。卫星导航为国防和经济建设发挥重要作用的同时,也为大众消费带来了极大的便利。以移动互联网、智能移动终端、卫星导航位置服务平台为核心技术的“北斗+”应用已逐渐深入人心。学习卫星导航定位技术对于建设智慧城市、发展精准农业、实现智能交通、应用人工智能等领域具有重要意义。

与一般介绍 GPS 等卫星导航定位原理不同,我们肩负着建设北斗卫星导航系统和应用北斗卫星导航系统的双重使命,编著本书既是为了满足我国北斗卫星导航系统建设的需要,更是为了推广北斗应用的需要。因此,本书力求体现北斗卫星导航系统建设和应用的最新成果,向高校学生和工程技术人员系统地介绍北斗卫星导航定位的基本理论与方法,进一步突出北斗卫星导航应用技能。本书重点介绍北斗卫星导航定位的应用方法、处理工具和开发技术,使读者能够灵活应用卫星导航技术和相关工具解决现实问题。

全书共 15 章,大体上分为五个部分。第一部分(第 1 章~第 7 章)介绍北斗卫星导航定位原理与算法,包括北斗卫星导航系统的发展历程、系统组成、运行原理、服务性能、优势特色、坐标系统、时间系统、卫星轨道、单点定位、高精度差分定位和精密单点定位等内容。第二部分(第 8 章~第 10 章)介绍北斗导航信号及其接收机原理,包括北斗导航信号、导航电文、北斗接收机及其信号处理方法等内容。第三部分(第 11 章、第 12 章)介绍多卫星导航系统及其融合应用技术,包括 GPS、GLONASS、Galileo 等卫星导航系统相关知识,以及多系统融合定位方法。第四部分(第 13 章、第 14 章)介绍卫星导航数据处理工具及软件开发技术,包括 GAMIT/GLOBK、Bernese、RTKLib、TEQC 等导航定位处理软件的应用,以及基于 Android 系统、iOS 系统、高德地图、百度地图等导航定位应用程序开发方法。第五部分(第 15 章)介绍北斗卫星导航系统的特色业务——RDSS 业务的原理,包括快速定位、授时和短报文通信原理。

本书主要由黄文德编写。康娟参与了第 5 章、第 8 章、第 10 章和第 13 章等部分章节的编写,张利云参与了第 6 章、第 7 章、第 9 章和第 15 章等部分章节的编写,李靖参与了第

14章部分章节和附录部分的编写。历届研究生杨玉婷、周一帆、孙乐园、吕慧珠、冷如松、张敏、彭海军、刘友红、谢友方、李阳林、谢玲、周杨淼、杨飞、肖振国、林魁、黄方鸿、宋诗谦、王晓慧、张冠显、彭利、王红建、金星、周帮、高贺、李灏霖、刘伟、刘婕、李兰、王呈倬等参与了本书相关算法的研究和验证工作。

在本书编写过程中,得到了国防科技大学第六十三研究所杨俊教授,国防科技大学智能科学学院王跃科教授、胡助理副教授、陈建云研究员、周永彬研究员、郭熙业博士、胡梅博士,以及长沙北斗产业安全技术研究院明德祥博士、乔纯捷博士、杨建伟博士、宋莉、夏娟娟、边琳琳等的大力支持和帮助。本书相关的研究工作得到了中国第二代卫星导航系统重大专项项目(GFZX0301040107HT)、中国博士后科学基金面上项目(2015M580365)、湖南省军民融合产业发展专项资金项目的资助,在此一并表示衷心的感谢!

本书力求反映我国北斗卫星导航系统建设和世界主要卫星导航系统建设最新成果以及卫星导航新技术与新应用。卫星导航定位技术与方法的发展非常迅速,作者受水平所限,再加上成书仓促,书中不足之处在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

编者

2019年5月于长沙

目 录

| | |
|-------------------------|----|
| 第 1 章 北斗卫星导航系统概述 | 1 |
| 1.1 世界卫星导航发展历史回顾 | 1 |
| 1.1.1 美国 | 1 |
| 1.1.2 俄罗斯 | 4 |
| 1.1.3 欧盟 | 4 |
| 1.2 我国卫星导航定位系统发展历程 | 5 |
| 1.2.1 北斗一号：地球静止轨道卫星定位系统 | 6 |
| 1.2.2 北斗二号：区域卫星导航系统 | 6 |
| 1.2.3 北斗三号：全球卫星导航系统 | 7 |
| 1.3 北斗卫星导航系统组成 | 8 |
| 1.3.1 空间段 | 9 |
| 1.3.2 地面段 | 11 |
| 1.3.3 用户段 | 13 |
| 1.4 北斗卫星导航系统提供的服务 | 14 |
| 1.5 北斗卫星导航系统的特色和优势 | 15 |
| 1.5.1 混合星座设计提高用户可见卫星数 | 15 |
| 1.5.2 导航与通信一体化设计提供多种服务 | 16 |
| 1.5.3 星间链路实现星座灵活管控与自主运行 | 16 |
| 1.5.4 多频点导航信号增加用户可选择性 | 17 |
| 1.6 北斗卫星导航定位的典型应用 | 17 |
| 1.6.1 精密测量 | 17 |
| 1.6.2 地理测绘 | 18 |
| 1.6.3 车辆导航 | 18 |
| 1.6.4 航海应用 | 19 |
| 1.6.5 航空应用 | 20 |
| 1.6.6 航天应用 | 20 |
| 1.6.7 军事应用 | 20 |
| 1.6.8 北斗授时 | 21 |
| 1.6.9 机械控制 | 21 |
| 1.6.10 大众消费 | 21 |

| | |
|--------------------------|----|
| 第2章 北斗卫星导航定位基本原理 | 23 |
| 2.1 无线电测距定位原理 | 23 |
| 2.1.1 利用到达时间测距的原理 | 23 |
| 2.1.2 平面内二维位置的确定 | 23 |
| 2.1.3 三球交会确定三维位置 | 24 |
| 2.2 卫星导航定位基本要素 | 26 |
| 2.2.1 导航卫星 | 26 |
| 2.2.2 导航信号 | 27 |
| 2.2.3 导航电文 | 28 |
| 2.2.4 距离测量 | 29 |
| 2.3 卫星导航定位方程 | 29 |
| 2.3.1 伪距方程 | 29 |
| 2.3.2 定位方程 | 31 |
| 2.4 定位结果精度及误差分析 | 32 |
| 2.4.1 定位结果的精度 | 32 |
| 2.4.2 定位误差源 | 32 |
| 2.5 差分定位 | 35 |
| 第3章 北斗的坐标系统和时间系统 | 37 |
| 3.1 地球坐标系统 | 37 |
| 3.1.1 大地水准面与地球椭球 | 37 |
| 3.1.2 地心大地坐标系 | 38 |
| 3.1.3 地心地固直角坐标系 | 40 |
| 3.1.4 地极移动 | 41 |
| 3.1.5 协议地球坐标系 | 43 |
| 3.1.6 北斗坐标系的定义 | 44 |
| 3.1.7 地固坐标系之间的转换 | 45 |
| 3.2 天球坐标系统 | 46 |
| 3.2.1 天球的基本概念 | 46 |
| 3.2.2 坐标系 | 47 |
| 3.2.3 岁差和章动 | 47 |
| 3.2.4 协议天球坐标系 | 48 |
| 3.2.5 协议天球坐标系与协议地球坐标系的转换 | 49 |
| 3.2.6 国际参考坐标系及其转换关系 | 53 |
| 3.3 测站坐标系统 | 55 |
| 3.3.1 测站坐标系的定义 | 55 |
| 3.3.2 测站坐标系与地心地固坐标系的转换 | 56 |
| 3.3.3 方位角和高度角的计算 | 57 |
| 3.4 时间系统 | 58 |
| 3.4.1 时间系统概述 | 58 |

| | | |
|--------------|-----------------------|------------|
| 3.4.2 | 世界时系统 | 59 |
| 3.4.3 | 原子时系统 | 61 |
| 3.4.4 | 协调世界时 | 61 |
| 3.4.5 | 北斗时(BDT)的定义 | 61 |
| 3.4.6 | 时间系统之间的转换 | 61 |
| 3.4.7 | 时间标示法及其转换关系 | 63 |
| 第 4 章 | 北斗卫星轨道运动基础 | 68 |
| 4.1 | 开普勒行星运动三大定律 | 68 |
| 4.2 | 卫星轨道无摄运动 | 69 |
| 4.2.1 | 二体问题 | 70 |
| 4.2.2 | 轨道根数 | 70 |
| 4.2.3 | 卫星位置和速度的计算 | 75 |
| 4.3 | 卫星轨道受摄运动 | 77 |
| 4.3.1 | 地球非球形摄动 | 78 |
| 4.3.2 | 日月引力摄动 | 79 |
| 4.3.3 | 太阳光压摄动 | 80 |
| 4.4 | 北斗卫星星历 | 81 |
| 4.4.1 | 北斗二号广播星历 | 81 |
| 4.4.2 | 北斗三号广播星历 | 82 |
| 4.5 | 利用卫星星历计算北斗卫星位置 | 83 |
| 4.5.1 | 北斗二号卫星位置计算方法 | 83 |
| 4.5.2 | 北斗三号卫星位置计算方法 | 89 |
| 4.6 | 北斗卫星星座及其可见性 | 93 |
| 4.6.1 | 北斗星座的卫星轨道类型组成 | 93 |
| 4.6.2 | 北斗星座的卫星可见性 | 98 |
| 第 5 章 | 北斗测量模型及定位误差源分析 | 102 |
| 5.1 | 北斗测量模型 | 102 |
| 5.1.1 | 伪距测量模型 | 102 |
| 5.1.2 | 载波相位测量模型 | 104 |
| 5.1.3 | 伪距和载波相位的关系 | 106 |
| 5.1.4 | 测量中包含的误差 | 106 |
| 5.2 | 与卫星相关的误差 | 107 |
| 5.2.1 | 星历误差 | 107 |
| 5.2.2 | 钟差误差 | 108 |
| 5.2.3 | 用户测距误差 | 109 |
| 5.3 | 信号空间传播误差 | 111 |
| 5.3.1 | 电离层延迟及其修正方法 | 111 |
| 5.3.2 | 对流层延迟及其修正方法 | 119 |
| 5.3.3 | 多路径效应 | 121 |

| | | |
|--------------|------------------------|------------|
| 5.4 | 与接收机相关的误差 | 122 |
| 5.4.1 | 接收机噪声 | 122 |
| 5.4.2 | 天线相位中心误差 | 123 |
| 5.5 | 其他误差 | 123 |
| 5.5.1 | 相对论效应 | 123 |
| 5.5.2 | 地球自转效应 | 125 |
| 第 6 章 | 北斗伪距定位、测速与授时方法 | 127 |
| 6.1 | 伪距单点定位方法 | 127 |
| 6.1.1 | 定位方法的分类 | 127 |
| 6.1.2 | 伪距观测方程的线性化 | 128 |
| 6.1.3 | 最小二乘法 | 130 |
| 6.1.4 | 卡尔曼滤波技术 | 130 |
| 6.1.5 | 伪距定位算法及步骤 | 131 |
| 6.2 | 单点定位精度评估 | 136 |
| 6.2.1 | 精度衰减因子 | 136 |
| 6.2.2 | 卫星的几何分布对 DOP 值的影响 | 139 |
| 6.2.3 | 最佳星座的选择问题 | 140 |
| 6.3 | 伪距差分定位方法 | 140 |
| 6.3.1 | 差分定位基本原理 | 141 |
| 6.3.2 | 北斗差分定位方法 | 144 |
| 6.3.3 | 伪距差分定位误差分析 | 146 |
| 6.4 | 北斗测速解算方法 | 147 |
| 6.4.1 | 伪距变化率测速方法 | 148 |
| 6.4.2 | 卫星速度的计算方法 | 149 |
| 6.5 | 北斗授时解算方法 | 150 |
| 6.5.1 | 单向测量授时 | 151 |
| 6.5.2 | 共视测量授时 | 151 |
| 第 7 章 | 北斗载波相位精确定位原理与方法 | 153 |
| 7.1 | 载波相位差分观测值 | 153 |
| 7.1.1 | 非差观测值 | 153 |
| 7.1.2 | 单差观测值 | 154 |
| 7.1.3 | 双差观测值 | 155 |
| 7.1.4 | 三差观测值 | 156 |
| 7.2 | 实时动态差分定位方法 | 157 |
| 7.2.1 | RTK 组成原理 | 157 |
| 7.2.2 | RTK 解算方法 | 160 |
| 7.2.3 | 网络 RTK 系统服务技术 | 163 |
| 7.3 | 精密单点定位方法 | 167 |
| 7.3.1 | 精密单点定位解算方法 | 167 |

| | | |
|--------------|-----------------|------------|
| 7.3.2 | PPP 有关的误差 | 170 |
| 7.4 | 整周模糊度解算 | 173 |
| 7.4.1 | 整周模糊度解算原理 | 174 |
| 7.4.2 | 整周模糊度解算方法 | 175 |
| 7.5 | 周跳探测与处理问题 | 182 |
| 第 8 章 | 北斗导航信号基础 | 184 |
| 8.1 | 北斗信号概述 | 184 |
| 8.2 | 载波及其频率 | 185 |
| 8.2.1 | 无线电频谱 | 185 |
| 8.2.2 | 北斗的频率 | 186 |
| 8.3 | 北斗的测距码 | 186 |
| 8.3.1 | 伪随机噪声码 | 186 |
| 8.3.2 | m 序列 | 188 |
| 8.3.3 | 截短码和复合码 | 191 |
| 8.3.4 | Gold 码 | 193 |
| 8.3.5 | 北斗二号测距码 | 194 |
| 8.3.6 | Weil 码 | 196 |
| 8.3.7 | 北斗三号测距码 | 197 |
| 8.4 | 北斗的数据码 | 198 |
| 8.4.1 | 北斗二号数据码 | 199 |
| 8.4.2 | 北斗三号数据码 | 201 |
| 8.5 | 北斗的信号结构 | 205 |
| 8.5.1 | 北斗二号信号结构 | 206 |
| 8.5.2 | 北斗三号信号结构 | 206 |
| 8.6 | 北斗信号的调制方式 | 209 |
| 8.6.1 | BPSK 调制方式 | 210 |
| 8.6.2 | QPSK 调制方式 | 211 |
| 8.6.3 | BOC 调制方式 | 212 |
| 8.6.4 | QMBOC 调制方式 | 214 |
| 第 9 章 | 北斗接收机原理 | 216 |
| 9.1 | 接收机组成原理 | 216 |
| 9.2 | 接收机类型 | 217 |
| 9.2.1 | 按用途分类 | 217 |
| 9.2.2 | 按载波频率分类 | 219 |
| 9.2.3 | 按通道数分类 | 219 |
| 9.2.4 | 按工作原理分类 | 220 |
| 9.2.5 | 按产品形态分类 | 220 |
| 9.3 | 接收机天线 | 221 |
| 9.3.1 | 天线类型 | 221 |

| | | |
|---------------|----------------------|------------|
| 9.3.2 | 天线的方向性及增益 | 221 |
| 9.3.3 | 工作频率与带宽 | 222 |
| 9.3.4 | 极化 | 222 |
| 9.3.5 | 阻抗匹配 | 222 |
| 9.4 | 接收机常用概念 | 223 |
| 9.4.1 | 系统和频点 | 223 |
| 9.4.2 | 卫星信号强度(信噪比) | 223 |
| 9.4.3 | 接收机通道 | 224 |
| 9.4.4 | 接收机的启动 | 224 |
| 9.4.5 | 首次定位收敛时间 | 225 |
| 9.4.6 | 卫星方位及星空图 | 225 |
| 9.4.7 | 通信端口和波特率 | 225 |
| 9.5 | 常见接收机及其性能指标 | 227 |
| 9.6 | 接收机检测原理 | 229 |
| 9.6.1 | 检测系统组成及其工作原理 | 230 |
| 9.6.2 | 典型指标测试方法 | 237 |
| 第 10 章 | 北斗接收机信号处理基础 | 244 |
| 10.1 | 信号处理的几个概念 | 244 |
| 10.1.1 | 信号功率与路径损耗 | 244 |
| 10.1.2 | 天线增益 | 245 |
| 10.1.3 | 链路预算 | 246 |
| 10.1.4 | 信号强度与载噪比 | 246 |
| 10.2 | 信号捕获原理 | 248 |
| 10.2.1 | 下变频与中频信号 | 248 |
| 10.2.2 | 相干积分 | 250 |
| 10.2.3 | 搜索空间 | 251 |
| 10.3 | 信号跟踪原理 | 251 |
| 10.3.1 | 载波环 | 251 |
| 10.3.2 | 码环 | 253 |
| 10.3.3 | 信号的跟踪 | 255 |
| 第 11 章 | GPS 及其他卫星导航系统 | 258 |
| 11.1 | 美国 GPS | 258 |
| 11.1.1 | 系统组成 | 259 |
| 11.1.2 | 信号特征 | 262 |
| 11.1.3 | 导航电文 | 265 |
| 11.1.4 | SA 和 A-S 政策 | 268 |
| 11.2 | 俄罗斯 GLONASS | 269 |
| 11.2.1 | 系统组成 | 269 |
| 11.2.2 | 信号特征 | 270 |

| | | |
|---------------|-------------------------|------------|
| 11.2.3 | 导航电文 | 271 |
| 11.3 | 欧盟 Galileo | 272 |
| 11.3.1 | 系统组成 | 272 |
| 11.3.2 | 信号特征 | 274 |
| 11.3.3 | 导航电文 | 278 |
| 第 12 章 | 多卫星导航系统融合定位原理 | 282 |
| 12.1 | 多卫星导航系统概述 | 282 |
| 12.2 | 多系统融合定位解算方法 | 283 |
| 12.3 | 多系统融合定位误差分析 | 285 |
| 12.3.1 | 系统空间基准偏差 | 285 |
| 12.3.2 | 系统时间基准偏差 | 286 |
| 12.3.3 | 接收机端和卫星端未校正延迟 | 287 |
| 12.4 | 多系统融合定位的优势 | 287 |
| 12.4.1 | 提高导航解的精度 | 288 |
| 12.4.2 | 提高导航解的可靠性 | 288 |
| 12.4.3 | 提高导航解的可用性 | 288 |
| 第 13 章 | 常见卫星导航处理软件及其应用方法 | 289 |
| 13.1 | 测后数据处理概述 | 289 |
| 13.1.1 | GNSS 测量工作简介 | 289 |
| 13.1.2 | 测后数据处理原理 | 291 |
| 13.1.3 | 后处理软件 | 292 |
| 13.2 | GAMIT/GLOBK 软件及其使用方法 | 293 |
| 13.2.1 | GAMIT/GLOBK 软件简介 | 293 |
| 13.2.2 | GAMIT 应用实例 | 295 |
| 13.3 | Bernese 软件及其使用方法 | 300 |
| 13.3.1 | Bernese 软件简介 | 300 |
| 13.3.2 | Bernese 5.0 应用实例 | 301 |
| 13.4 | RTKLib 软件及其使用方法 | 313 |
| 13.4.1 | RTKLib 软件简介 | 313 |
| 13.4.2 | RTKLib 可执行程序操作流程 | 314 |
| 13.4.3 | RTKLib 应用实例 | 319 |
| 13.5 | TEQC 软件及其使用方法 | 321 |
| 13.5.1 | TEQC 软件简介 | 321 |
| 13.5.2 | TEQC 应用实例 | 321 |
| 第 14 章 | 卫星导航应用与开发基础 | 323 |
| 14.1 | 基于 Android 系统的导航应用开发 | 323 |
| 14.1.1 | Android 系统 App 开发概述 | 323 |
| 14.1.2 | Android 定位 API 说明 | 324 |
| 14.2 | 基于 iOS 系统的导航应用开发 | 325 |

| | | |
|---------------|---------------------------------|------------|
| 14.2.1 | iOS 系统 App 开发概述 | 325 |
| 14.2.2 | iOS 定位 API 说明 | 325 |
| 14.3 | 地图投影与电子地图 | 326 |
| 14.3.1 | 地图投影 | 326 |
| 14.3.2 | 电子地图 | 327 |
| 14.3.3 | 结合高德地图的开发 | 328 |
| 14.3.4 | 结合百度地图的开发 | 329 |
| 14.4 | 智能移动终端原始观测数据的获取 | 330 |
| 14.4.1 | 获取原始观测数据的 API 函数 | 331 |
| 14.4.2 | 原始观测数据的生成原理 | 332 |
| 14.4.3 | 原始观测数据的应用 | 336 |
| 14.5 | 智能移动终端定位 App 开发示例 | 338 |
| 14.5.1 | 开发任务简介 | 338 |
| 14.5.2 | 开发环境构建 | 339 |
| 14.5.3 | 代码编程实现 | 339 |
| 14.5.4 | 运行结果展示 | 341 |
| 第 15 章 | 北斗 RDSS 业务原理简介 | 341 |
| 15.1 | RDSS 概述 | 341 |
| 15.1.1 | 卫星系统 | 342 |
| 15.1.2 | 地面系统 | 342 |
| 15.1.3 | 用户设备 | 343 |
| 15.2 | RDSS 信号与测量 | 343 |
| 15.2.1 | RDSS 信号体制 | 343 |
| 15.2.2 | RDSS 测量 | 345 |
| 15.3 | 北斗 RDSS 定位与授时方法 | 347 |
| 15.3.1 | 双星定位原理 | 347 |
| 15.3.2 | RDSS 定位算法 | 348 |
| 15.3.3 | RDSS 单向授时算法 | 349 |
| 15.3.4 | RDSS 双向授时算法 | 350 |
| 15.4 | 北斗 RDSS 短报文通信原理 | 351 |
| 15.4.1 | 卫星通信原理 | 351 |
| 15.4.2 | 北斗 RDSS 短报文通信 | 352 |
| | 参考文献 | 353 |
| | 附录 A BDGIM 模型非发播系数及预报周期表 | 357 |
| | 附录 B 卫星导航常用协议 | 359 |
| | 附录 C 卫星导航常见数据格式 | 369 |
| | 附录 D 缩略语参考表 | 385 |

本章在回顾世界卫星导航发展历史的基础上,首先重点介绍北斗卫星导航系统的发展历程,然后详细阐述北斗卫星导航系统的组成、功能、运行原理和优势特色,最后简要介绍卫星导航定位的典型应用,以激发读者对建设北斗卫星导航系统和应用北斗卫星导航系统的兴趣。

1.1 世界卫星导航发展历史回顾

人类利用人造地球卫星进行导航的想法,在人类发射第一颗人造地球卫星时就已经开始酝酿。1957年10月,苏联成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星。从那以后,利用卫星进行导航和定位的研究便引起了世界各国的高度重视。卫星导航系统是一种具有全能性(陆地、海洋、航空及航天)、全天候、连续性和实时性的无线电导航定位系统,它能提供高精度的导航、定位和授时服务,其应用几乎涉及国民经济和社会发展的各个领域,已成为全球发展最快的信息产业之一。因此,世界各主要航天大国或地区联盟都在积极建设本国或本地区的卫星导航系统。

1.1.1 美国

卫星导航诞生于20世纪60年代初。在苏联发射第一颗人造地球卫星后,美国科研人员就提出利用多普勒效应,通过已知位置的地面站测量出卫星的位置。反过来,如果已知卫星的位置,利用同样的原理,可以确定地面未知点的位置。这一想法最终促成了美国第一代卫星导航系统的建设和应用。1958年底,美国海军研究实验室着手研制为美国军用舰艇导航服务的卫星导航系统,即海军卫星导航系统(navy navigation satellite system, NNSS)。在该系统中,所有卫星轨道都通过地球的南北两极、卫星的星下点轨迹与地球的子午圈基本重合,故又称为子午仪(transit)卫星导航系统。1964年1月,子午仪卫星导航系统建成,成功应用于美军“北极星”核潜艇的导航定位,并逐步应用于其他各种舰艇的导航定位(在此之前,核潜艇主要用惯性导航系统进行导航定位,并为导弹提供初始位置、速度和方位)。1967年7月,美国政府宣布子午仪卫星导航系统的部分导航电文解密,供民间商业应用,为远洋船舶导航和海上定位服务。对子午仪卫星导航系统技术的进一步改善,提高了卫星轨道测定的精度,改善了用户接收机性能,其应用范围越来越广。

子午仪卫星导航系统由6颗卫星组成。卫星轨道接近圆形,轨道倾角为 90° 左右(穿过南北极上空,沿子午线飞行),轨道高度为1100km,周期约为107min,卫星每天运行13~