



交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

刘 建 等 编著

北斗卫星导航系统在交通运输行业

Application and Development of
BeiDou Navigation Satellite System in
Transportation Industry

的应用与发展



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



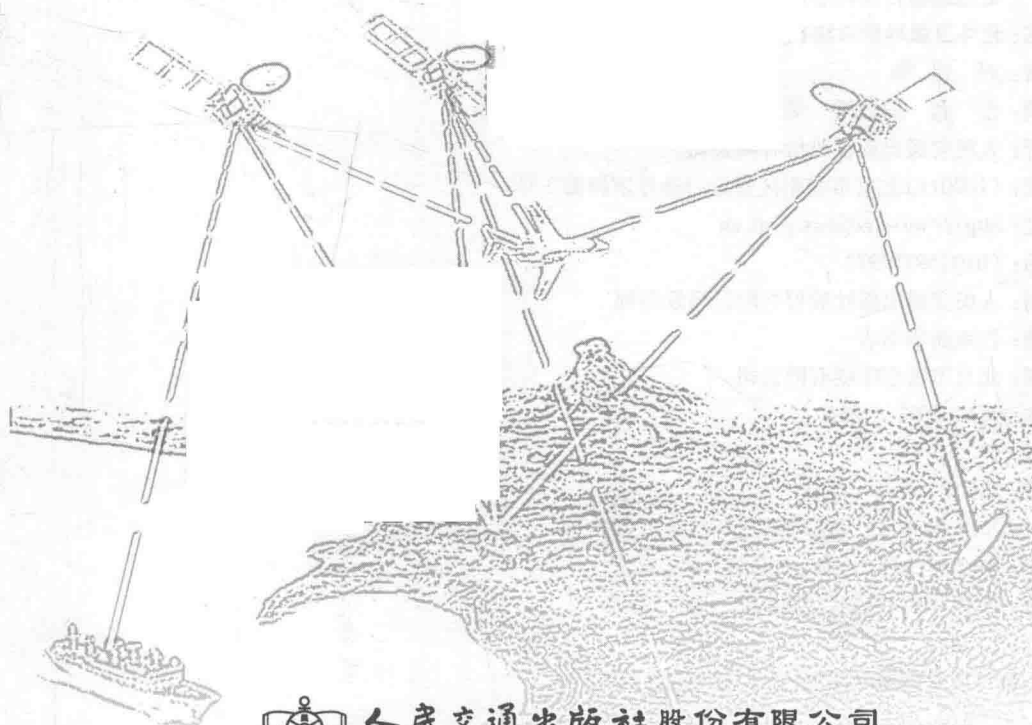
交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

刘 建 等 编著

北斗卫星导航系统在交通运输行业

Application and Development of
BeiDou Navigation Satellite System in
Transportation Industry

的应用与发展



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书为“交通运输行业高层次人才培养项目著作书系”中的一本,介绍了国内外主要卫星导航系统的概况、技术原理及相应的增强系统,并着重介绍了北斗系统及其在交通运输行业的应用,包括“北斗一号卫星导航系统”“北斗二号卫星导航系统”;北斗系统在交通运输行业的应用现状,在公路运输、水路运输两个主要领域选取了部分实际应用案例进行了细致说明。最后针对北斗系统的未来发展趋势和前景给予了展望。

本书论述严谨、选材广泛,参考资料较为权威,语言朴实易懂,实用性较强,可作为交通运输、通信导航等专业的辅助教材,同时可作为从事卫星导航、交通运输相关领域工作人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

北斗卫星导航系统在交通运输行业的应用与发展 / 刘建等编
著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017.5
(交通运输行业高层次人才培养项目著作书系)
ISBN 978-7-114-13832-4

I. ①北… II. ①刘… III. ①卫星导航—全球定位系统—应用—交通运输业—交通运输管理 IV. ①F50

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 110861 号

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

书 名: 北斗卫星导航系统在交通运输行业的应用与发展

著 作 者: 刘 建 等

责任编辑: 张 鑫 闫吉维 周 宇

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 17

字 数: 386 千

版 次: 2017 年 5 月 第 1 版

印 次: 2017 年 5 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13832-4

定 价: 70.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系 编审委员会

主 任:杨传堂

副主任:戴东昌 周海涛 徐 光 王金付
陈瑞生(常务)

委 员:李良生 李作敏 韩 敏 王先进
石宝林 关昌余 沙爱民 吴 澎
杨万枫 张劲泉 张喜刚 郑健龙
唐伯明 蒋树屏 潘新祥 魏庆朝
孙 海



书系前言

Preface of Series

进入 21 世纪以来,党中央、国务院高度重视人才工作,提出人才资源是第一资源的战略思想,先后两次召开全国人才工作会议,围绕人才强国战略实施做出一系列重大决策部署。党的十八大着眼于全面建成小康社会的奋斗目标,提出要进一步深入实践人才强国战略,加快推动我国由人才大国迈向人才强国,将人才工作作为“全面提高党的建设科学化水平”八项任务之一。十八届三中全会强调指出,全面深化改革,需要有力的组织保证和人才支撑。要建立集聚人才体制机制,择天下英才而用之。这些都充分体现了党中央、国务院对人才工作的高度重视,为人才成长发展进一步营造良好的政策和舆论环境,极大激发了人才干事创业的积极性。

国以才立,业以才兴。面对风云变幻的国际形势,综合国力竞争日趋激烈,我国在全面建成小康社会的历史进程中机遇和挑战并存,人才作为第一资源的特征和作用日益凸显。只有深入实施人才强国战略,确立国家人才竞争优势,充分发挥人才对国民经济和社会发展的重要支撑作用,才能在国际形势、国内条件深刻变化中赢得主动、赢得优势、赢得未来。

近年来,交通运输行业深入贯彻落实人才强交战略,围绕建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通的战略部署和中心任务,加大人才发展体制机制改革与政策创新力度,行业人才工作不断取得新进展,逐步形成了一支专业结构日趋合理、整体素质基本适应的人才队伍,为交通运输事业全面、协调、可持续发展提供了有力的人才保障与智力支持。

“交通青年科技英才”是交通运输行业优秀青年科技人才的代表群体,培养选拔“交通青年科技英才”是交通运输行业实施人才强交战略的“品牌工程”之一,1999 年至今已培养选拔 282 人。他们活跃在科研、生产、教学一线,奋发有为、锐意进取,取得了突出业绩,创造了显著效益,形成了一系列较高水平的科研成果。为加大行业高层次人才培养力度,“十二五”期间,交通运输部设立人才培养专项经费,重点资助包含“交通青年科技英才”在内的高层次人才。

人民交通出版社以服务交通运输行业改革创新、促进交通科技成果推广应用、支持交通行业高端人才发展为目的,配合人才强交战略设立“交通运输行业高层次人才培养项目著作书系”(以下简称“著作书系”)。该书系面向包括“交通青年科技英才”在内的交通运输行业高层次人才,旨在为行业人才培养搭建一个学术交流、成果展示和技术积累的平台,是推动加强交通运输人才队伍建设的重要载体,在推动科技创新、技术交流、加强高层次人才培养力度等方面均将起到积极作用。凡在“交通青年科技英才培养项目”和“交通运输部新世纪十百千人才培养项目”申请中获得资助的出版项目,均可列入“著作书系”。对于虽然未列入培养项目,但同样能代表行业水平的著作,经申请、评审后,也可酌情纳入“著作书系”。

高层次人才是创新驱动的核心要素,创新驱动是推动科学发展的不懈动力。希望“著作书系”能够充分发挥服务行业、服务社会、服务国家的积极作用,助力科技创新步伐,促进行业高层次人才特别是中青年人才健康快速成长,为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通做出不懈努力和突出贡献。

交通运输行业高层次人才培养项目
著作书系编审委员会
2014年3月

作者简介

Author Introduction



刘建,现任中国交通通信信息中心工程中心主任,享受国务院特殊津贴,先后任中国航海学会科学技术奖评审委员会委员、中国第二代卫星导航系统重大专项实施方案编制专家组专家、科技部国家高科技研究发展计划(863 计划)地球观测与导航技术领域主题专家组专家、教育部卫星导航联合研究中心科学技术委员会委员、《交通信息与安全》杂志第七届编委会委员、中国智能交通协会专家委员会交通安全专业委员会委员等。先后荣获“全国交通行业青年岗位能手”“北京优秀青年工程师”“交通部直属机关优秀共产党员”“交通运输部青年科技英才”“中央国家机关优秀共产党员”“全国五一劳动奖章”等称号。

先后主持研制海事信息化项目“海事船载无线综合通信系统”,完成国家 863 计划“北斗一号导航卫星综合应用服务平台支撑技术和应用示范”,参与完成“中国第二代卫星导航系统(北斗)科技重大专项”综合立项论证和实施方案编制工作,完成全国重点营运车辆动态信息公共交换平台,主持开发“海洋地质调查综合通信信息系统”,带领团队承担了交通运输部海事局“中国船舶远程识别与跟踪系统”工程,主持制定“道路运输车辆卫星定位系统”系列标准。5 项成果获省部级科技进步或发明一等奖,5 项成果获部级科技奖二等奖,3 项成果获部级科技奖三等奖。



前言

Foreword

在卫星导航领域有一句名言“卫星导航系统的应用只受到人类想象力的限制”。从20世纪70年代首个全球导航卫星系统——全球定位系统启用至今,随着技术的不断进步和人们创造力的不断拓展,卫星导航系统已经深入渗透到了人类生产生活的各个领域,从国家经济到日常生活,每个角落都有着卫星导航系统的身影。

目前,世界主要导航卫星系统包括全球定位系统(Global Position System, GPS),格洛纳斯卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS),伽利略卫星导航系统(Galileo Navigation Satellite System, Galileo),以及中国北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)。其中,我国自主研发的北斗卫星导航系统(简称北斗系统)作为世界卫星导航系统中的后起之秀,除具备稳定可靠的定位、导航、授时功能外,还具有特殊的卫星短报文通信功能,在实际应用中可发挥自身独特的优势。

在卫星导航系统的所有应用领域当中,交通运输行业因其自身具有点多、线长、面广和移动的特点,成为卫星导航系统应用规模最为庞大、应用前景最为广阔的领域之一。交通运输行业中的车辆监控、船舶导航、航空管理、交通基础设施建设和监测等领域都离不开卫星导航系统提供的定位导航等功能。随着我国北斗系统的不断建设发展,其在交通运输行业的应用需求也在不断突显。

当前,北斗系统正处在系统建设的关键时刻,恰逢我国交通运输行业处于行业转型升级重要时期,可以说,交通运输行业对北斗系统的应用与北斗产业发展进程和交通运输行业自身发展建设均有着直接和重要的关系。但从现状来看,交通运输与北斗卫星导航两个领域之间的相互了解及认识仍有待提升,广大交通运输从业者对北斗系统的原理、功能和特性的认识仍较为缺乏,而从事北斗系统相关工作的人员对交通运输行业的业务模式和系统应用方式亦不甚了解。

在此情况下,希望能够通过本书在北斗卫星导航与交通运输之间架起一座桥梁,增进双方对于对方领域的了解和认识,填补当前相关领域书籍的空白,为交通运输行业更好地应用北斗系统提供参考指导。本书主要作者就职于中国交通通信信息中心,负责交通运输行业信息化建设和北斗在交通运输行业应用的相关工作,具有大量的理论知识和实践经验;同时,在本书编写过程中,走访调研了解放军卫星导航定位总站、中国空间技术研究院、科学技术部国家遥感中心、中国科学院国家天文台等参与北斗系统建设的相关单位,以及交通运输行业内公路、水路、铁路和民航等管理部门和用户单位,查阅了国内外卫星导航系统在交通行业应用中的相关文献资料,力求为读者提供较为全面、翔实、权威的参考材料,为推动北斗系统在交通运输行业的应用、促进现代交通运输业的发展贡献一份绵薄之力。

全书共七章,包括卫星导航系统介绍、卫星导航增强系统介绍、北斗系统在交通运输行业的应用以及北斗系统未来展望等内容,基本按照从系统到应用、从概述到原理、理论分析结合实际案例的方式进行论述,希望能够由浅入深,逐步引导读者对包括北斗系统在内的卫星导航系统及其在交通运输行业的应用和发展获得较为直观的认识。

本书第一章、第二章介绍全球导航卫星系统的定义、基本组成结构及其工作原理。第一章通过介绍国外 GPS、GLONASS 和 Galileo 卫星导航系统,以及我国自主研发的北斗系统的发展概况和基本原理,让读者对当今世界四大主要卫星导航系统的构成、运作情况和应用领域等有所了解。在此基础上,第二章以 GPS 和北斗两个主要卫星导航系统为例,较为细致地介绍了卫星导航系统工作原理相关理论知识,并专门针对“北斗一号卫星导航系统”及“北斗二号卫星导航系统”分别进行介绍,同时还分析了卫星导航定位的误差来源,此部分内容是后续章节卫星定位导航增强系统和实际工程应用的理论基础。

第三章单独对卫星定位导航增强系统这一概念进行介绍,对当前主要的卫星定位导航增强技术的原理和特点进行说明,同时对美国、欧洲、日本、俄罗斯、印度等国外增强系统的发展和现状进行介绍,并针对当前正在建设的北斗地基增强系统进行专门介绍。

第四章至第六章着重介绍北斗系统在交通运输行业的应用。第四章介绍了目前交通运输行业中各领域对北斗系统的应用现状,第五章和第六章从公路运输、水路运输等交通运输行业主要领域中选取有代表性的实际应用案例进行细致介绍。通过上述章节的介绍,读者不仅可以了解当前北斗系统在交通运输行

业的总体应用状况,也可对具体应用模式和产品形态产生较为形象的认识,其中具体应用案例也能够为北斗系统在其他领域的应用提供借鉴。

第七章对北斗系统及其相关产业未来发展趋势进行分析,包括影响其发展的因素及与国外卫星导航系统的竞争情况,并对未来交通运输行业卫星导航的应用前景进行展望,希望能够起到抛砖引玉的作用,激发读者自身对于北斗系统未来发展和应用的思考。

本书理论与实践并行,语言平实,通俗易懂,可作为相关院校信息、通信导航、交通运输等专业的辅助教材,同时对从事相关工程、项目建设和技术研究的交通运输行业专业工程技术人员具有很好的参考价值。

本书由刘建主编,参与编写的有卢红洋、黄黎、曹纪东、张炳琪、吴晓东、陈献国、王洵、吴海东、刘远亮、郭任伟等人,在本书编制过程中,武汉理工大学、交通运输部管理干部学院等单位也给予了大力支持,在此一并给予感谢。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有所疏漏,敬请指正。

作 者

2016年7月于北京

目 录

Contents

第1章 绪论	1
1.1 全球导航卫星系统(GNSS)简介	1
1.2 国外卫星导航系统的建设与应用	6
1.3 北斗一号卫星导航系统	25
1.4 北斗二号卫星导航系统	29
1.5 北斗卫星导航系统的优劣势分析	34
1.6 GNSS 主要应用领域及北斗应用现状	37
第2章 GPS 与北斗的定位原理及兼容互操作	45
2.1 GPS 卫星信号的基本结构	45
2.2 GPS 卫星轨道及坐标计算	54
2.3 GPS 卫星接收机原理	59
2.4 GPS 卫星定位原理	64
2.5 北斗卫星信号的基本结构	67
2.6 北斗卫星轨道及坐标计算	74
2.7 北斗卫星接收机工作原理	87
2.8 北斗系统基本定位原理	92
2.9 北斗卫星导航的兼容性与互操作性	96
2.10 GNSS 卫星定位误差来源分析及异常因素分析	99
第3章 卫星导航增强系统	104
3.1 卫星导航增强系统分类	104
3.2 基于差分技术的地基增强系统	106
3.3 基于伪卫星技术的地基增强系统	111
3.4 国外卫星导航增强系统发展与应用现状	113
3.5 北斗地基增强系统	129
3.6 交通运输行业北斗地基增强系统应用	142
3.7 卫星导航增强系统未来发展趋势	145
第4章 北斗卫星导航在交通运输行业的应用状态	147
4.1 国内交通运输行业发展现状	147
4.2 北斗卫星导航在交通运输各行业的现状	154

4.3	北斗在交通运输行业的示范工程	164
4.4	北斗卫星导航在交通运输行业的产品应用	166
4.5	北斗卫星导航在物联网及现代物流上的应用	176
4.6	交通运输行业北斗应用标准与相关政策	183
第5章	北斗在公路运输行业的应用案例	186
5.1	基于北斗的驾驶员培训管理系统	186
5.2	重点营运车辆联网联控系统	191
5.3	新疆公共交通卫星导航监控系统	199
5.4	基于北斗的交通运输指挥监控系统	202
5.5	基于北斗的桥梁变形监测系统	206
5.6	基于北斗的高速公路边坡位移自动化监测系统	215
第6章	北斗在水路运输应用案例	220
6.1	港口高精度实时定位调度控制系统	220
6.2	基于北斗的船舶监控管理系统	225
6.3	基于北斗的船舶靠离泊系统	230
6.4	基于北斗的航道安全监测系统	234
6.5	基于北斗的船闸报到过闸系统	238
6.6	基于北斗的中国海上搜救信息系统示范工程	240
第7章	交通运输行业北斗应用展望与建议	245
7.1	交通运输行业北斗应用展望	245
7.2	交通运输行业北斗应用建议	249
附录	缩写词中英文对照	252
参考文献		254

第1章 绪 论

1957年10月4日,苏联成功发射了人类历史上第一颗人造卫星史伯尼克(Sputnik)。经过近60年的发展,卫星导航已广泛应用于陆地、海洋、天空和太空的各类军事及民用领域中,与国家安全、社会经济发展息息相关,成为一项基础性战略设施,受到了世界各国的极大重视,是继互联网、移动通信之后发展最快的信息产业之一。

本章介绍了全球导航卫星系统(GNSS)的定义及基本组成结构,对国外的三大卫星导航系统,包括全球定位系统(GPS)、格洛纳斯卫星导航系统(GLONASS)以及伽利略卫星导航系统(Galileo)的建设和应用情况进行简单介绍,分析我国自主建设、独立运行的北斗卫星导航系统(BDS)的发展现状和与国外卫星导航系统的优劣对比,最后介绍目前卫星导航系统的主要应用领域。

1.1 全球导航卫星系统(GNSS)简介

1.1.1 GNSS 定义

全球导航卫星系统是全球卫星无线电导航系统的简称。全球卫星无线电导航的完整概念产生于20世纪70年代末,1979年世界无线电大会(WARC-79)认可美国联邦政府提出的全球定位系统的卫星无线电导航频率。而在此之前只能完成海上静态用户平面位置确定的美国海军无线电导航系统或子午仪,仅仅是卫星无线电导航的萌芽。所以,卫星无线电导航是一门年轻的工程应用科学,其概念还在进一步地完善和进化中。由于GPS的成功应用以及人们对卫星无线电导航的期待,国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)提出了全球导航卫星系统的概念,这是一个由无线电导航卫星组成全球服务的无线电导航系统,并非是某一个唯一的全球导航卫星系统。从工作原理上来讲,GNSS是以人造卫星作为导航平台的星基无线电导航系统,它利用卫星发射的无线电信号,由用户自主完成非询问应答式的连续高精度定时、空间(三维)定位及运动速度矢量确定的,并提供全球服务的无线电导航系统。这种定位、测速性能是连续的,适合于运动用户的动态性能,用户范围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。除此以外,还可以根据用户指定的航行目的地,连续获得航向、航速、偏航差等航行参数,并根据目前的位置与航速估计到达目的地的路程和到达时间。表1-1列举了目前世界各国或地区所拥有或正在开发的GNSS的基本情况,其中GPS、GLONASS、BDS和Galileo并称为当今世界四大GNSS系统,本章节将重点介绍。

除提出GNSS的基本概念外,ICAO还拟定GNSS的需求和建设计划。民用航空需求见表1-2,从表中所列项目和指标可以看出,从民用航空提出的卫星无线电导航系统需求出发,目前已建成的GPS和GLONASS都不能满足民用航空所需的必备性能,于是针对不同的飞行条件,产生了相对应的各种增强系统的设计。这些增强系统主要用于提高卫星导航系统

的各种性能,如欧洲的静地导航重叠系统(European Geostationary Navigation Overlay Service, EGNOS),美国的广域增强系统(Wide Area Augmentation System, WAAS),俄罗斯的差分校正和监测系统(System of Differential Correction and Monitoring, SDCM),以及为满足 CAT1、CAT2、CAT3 需求的本地增强系统等,各类增强系统连同全球卫星导航系统统称为卫星无线电导航系统。

全球主要 GNSS 概况 表 1-1

国家 或地区	GNSS 名称	组网卫星数	目前可用卫星数	首次正式运行时间	现 阶 段
美国	GPS	24	30	1995 年	已正式运行
俄罗斯	GLONASS	24	33	1996 年	已正式运行
中国	北斗	35	16	2001 年	区域系统已正式运行,目前处于全球系统建设阶段
欧洲	Galileo	30	2(试验星)	2016 年	系统组建阶段

ICAO 提出的民用航空需求 表 1-2

RNP 类型 (总误差概率 95%)	飞行阶段条件	NSE 95% 横向/垂直	SIS 最大 非连续性	SIS 最大 非完好性	告警时间	SIS 可用性
RNP-20	海洋上空航线飞行	19.9nm	$10^{-6}/h$	$10^{-7}/h$	5min	0.999
RNP-12.6	陆地上空航线, 低密度飞行	12.44nm	$10^{-6}/h$	$10^{-7}/h$	3min	0.999
RNP-4	陆地上空航线, 高密度飞行	3.87nm	$10^{-6}/h$	$10^{-7}/h$	1min	0.9999
RNP-1	陆地上空航线, 很高密度飞行	0.44nm	$10^{-6}/h$	$10^{-7}/h$	15s	0.9999
RNP-0.3~0.5 0.3nm/125ft (1ft=0.3048m)	初始进近,非精密 进近,离港	100m	$10^{-6}/h$	$10^{-7}/h$	10s	0.9975
RNP-0.3/50~ 0.02/40	CAT1	18.2/7.7~4.4m	$8 \times 10^{-6}/15s$	$2 \times 10^{-7}/进近$	6s	0.9975
RNP-0.01/15	CAT2	6.5m/1.7m	$4 \times 10^{-6}/15s$	$1 \times 10^{-9}/进近$	1s	0.9985
RNP-0.003	CAT3	3.9m/0.8m	$2 \times 10^{-6}/15s$	$5 \times 10^{-10}/进近$	1s	0.9990

注:SIS 为空间信号。

根据 ICAO 的提议,不同国家和组织各自拟定了自己心目中的 GNSS。普遍将 GNSS 划分为两个阶段——GNSS1 和 GNSS2。

GNSS1 是建设全球 GNSS 的第一步。利用已建成的 GPS 和 GLONASS,通过区域增强完成 GNSS1 计划。欧洲导航计划的 GNSS1 即欧洲全球导航重叠服务系统 EGNOS。GNSS2 又分初始 GNSS2 和 GNSS2,初始 GNSS2 完成 GNSS2 的初级和中级服务,GNSS2 完成高级服

务。GNSS2 是一个不含 GPS 和 GLONASS 的系统。正在建设中的 Galileo 就是欧洲的 GNSS2,通过 Galileo、Galileo 系统 + 区域增强、Galileo 系统 + 区域增强 + 本地增强来分别提供不同飞行条件下的服务。区域增强是利用地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星来发播增强信号,GEO 卫星既作为用户可观测的导航卫星,同时又能够完成提高定位精度、可用度及完好性,向用户提供完好性报警等一系列任务。通过 GEO 卫星实现的增强系统,其覆盖区可接近地球表面的 $1/6 \sim 1/3$,所以称为区域增强系统。本地增强是利用地面或空中伪卫星增强系统的导航性能,其增强的覆盖区域以满足 CAT1、CAT2、CAT3 的需要,所以其应用范围极小,但对完好性和连接性的要求极高。关于卫星导航增强系统的相关内容将在第3章中重点介绍。

卫星导航在国民经济建设中占有重要的位置,是国民经济信息化建设的重要组成部分和推进力量,是建设国家信息体系的重要基础设施,是直接关系到国防安全和经济发展的关键性技术支撑系统。拥有卫星导航的技术和能力,是一个国家综合实力的重要标志,并将在军事、外交和经济上占据主动地位,获取巨大的利益。因此世界上主要大国和商业集团不惜花费巨资发展卫星导航系统,除本书介绍的 GPS、GLONASS、BDS 及 Galileo 外,其他各国也在积极筹备组建自己的卫星导航系统,如日本的准天顶卫星系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS),印度区域导航卫星系统(Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS)等。

1.1.2 GNSS 基本架构

不同的 GNSS 虽然具有不同的特征参数和性能,但所有的 GNSS 都由如图 1-1 所示的三大结构组成:空间卫星星座部分、地面监控部分以及用户设备部分。

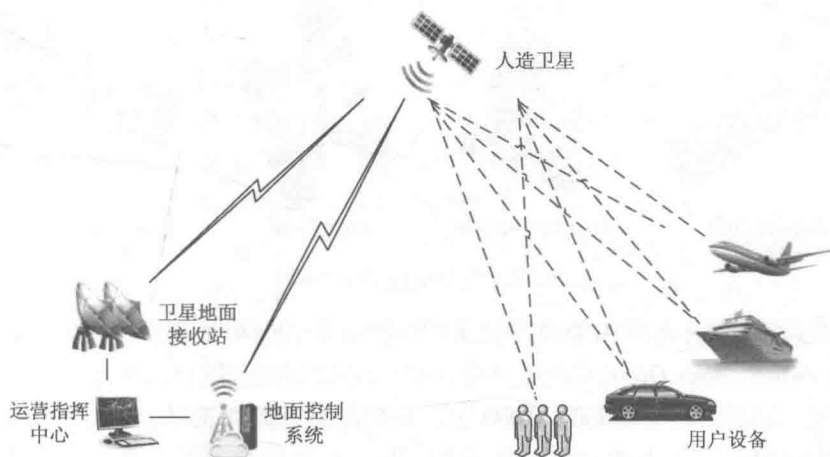


图 1-1 GNSS 组成架构

空间卫星星座部分主要包括工作卫星和备用卫星,负责持续向地球发射导航信号。地面监控部分由一个主控站、若干个注入站和监测站组成,负责整个卫星导航系统保持良好运行的状态。用户设备部分为各种型号的接收机及其天线等配套设备,负责解析人造卫星发送的导航电文,并实时计算出其所处位置、速度和时间等数据。

1) 空间卫星星座

GNSS 空间卫星星座一般由 24 ~ 30 颗运行在距离地面 20000km 左右轨道面上的卫星组成,其中包括工作卫星和备用卫星,在工作卫星出现故障或到达使用年限等异常情况时,备用卫星可随时启用,保障整个卫星导航系统持续正常运行。一个空间点的位置的确定需要三维坐标,因此,理论上地面用户只需要观测到 3 颗卫星,通过计算出地面用户与这三颗卫星的距离就能计算出其所处的位置。然而事实上,由于卫星信号是通过空间传播,哪怕是微小的信号时间差也会导致测量存在较大偏差,因此需要第 4 颗卫星来纠正接收机钟差,而当卫星数量少于 4 颗时,实现精准定位一般比较困难。

人造卫星的系统结构包括公用平台和有效载荷两大部分。任何类型的人造卫星都必须配备公用平台,它是保障卫星正常运行的基础,包括结构与机构系统、电源系统(一般是太阳能电池翼板所提供的太阳能及自备燃料供电)、姿态调整和轨道控制系统、推进系统、跟踪遥测和遥控系统等。有效载荷也称为专用系统,是人造卫星的功能执行部件,用于完成各种不同的技术任务。例如,导航卫星的最主要有效载荷为星载原子钟和导航处理单元,通信卫星的主要有效载荷是通信转发器及通信天线,而天文卫星的有效载荷主要是各种类型的天文望远镜。卫星公用平台只需要通过少量适应性修改即可装载不同的有效载荷,用以实现不同的卫星用途,大大缩短了卫星研制周期,同时节省了研制费用,是目前世界各国普遍采取的一种卫星设计方法。

如图 1-2 所示为各导航卫星构造示意图。导航卫星都由主体和星体两侧伸展出的太阳能电池翼板组合而成,太阳能电池翼板能自动对准太阳,以保证卫星正常工作用电。

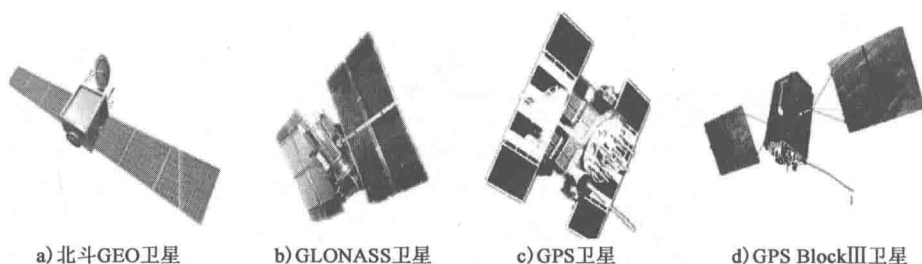


图 1-2 各导航卫星构造示意图

值得一提的是,北斗星座由中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星、倾斜地球轨道(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)卫星、GEO 卫星三种组成,这三种卫星在平台、有效载荷上互有区别,在功能上各司其职。GEO 卫星采用的是东方红三号(后简称“东三”)改进型平台,重点在承载能力、供电能力和在轨正常姿态控制方面对“东三”平台做了改进,以适应导航载荷的需要。GEO 卫星的有效载荷包括用来实现有源定位的无线电测定卫星业务(Radio Determination Satellite Service, RDSS)载荷,用于实现无源定位的无线电导航卫星业务(Radio Navigation Satellite Service, RNSS)载荷,以及 C/C 通信载荷。GEO 卫星的功能之一是用于实现北斗系统的有源定位功能,其中包括短报文通信功能。短报文通信的服务功能覆盖中国大陆及周边地区。

IGSO/MEO 卫星采用的是“东三”平台,但在卫星的自主能力和在轨正常姿态控制方面

做了改进,以适应所运行的轨道和导航载荷的需要。IGSO/MEO 卫星的有效载荷为 RNSS 载荷。

在服务功能的配置上,组成北斗星座的三种卫星是有区别的:GEO 卫星具备有源、无源、短报文通信、位置报告、授时等服务,而 MEO 卫星和 IGSO 卫星只能够用于无源定位。星座中由于有了 GEO 卫星,才保证了北斗系统三大功能(定位、通信及授时)的实现。

人造卫星在 GNSS 中的主要功能和作用有:

- (1)接收并储存由地面监控站发来的导航信息。
- (2)接收并执行由地面监控站发来的控制指令,进行相关的数据处理,来实现运行偏差的校准、备用卫星的启用等。
- (3)持续向地球发送导航信息,为海、陆、空、天的用户提供定位服务。
- (4)提供精准的时间信息。

要保证空间卫星星座的正常运行,除了不断地发射后续星外,卫星的使用寿命也至关重要。影响卫星星座寿命的制约点,一是燃料寿命,二是星载设备的寿命。四大 GNSS 系统中,美国的第二代 GPS 卫星的使用寿命为 12 年(早期第一代 7 年),GLONASS-K 卫星的使用寿命为 10 年(GLONASS-M 为 7 年),北斗卫星的使用寿命为 8 年,Galileo 卫星的设计寿命在 15 年以上。

卫星轨道是指人造卫星运动的轨迹。目前各主要 GNSS 系统大多选择 MEO 轨道。MEO 位于低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO, 2000km)和地球静止轨道(GEO, 35786km)之间,是一种卫星星座周期为 2~12h、倾角为 $55^{\circ} \sim 63.43^{\circ}$ 的轨道。相较于 LEO 和 GEO,选择 MEO 无论从卫星数量还是发射费用来说都是个很好的折中方案。关于轨道计算的相关理论知识将在第 2 章中详细介绍。

2) 地面监控

地面监控部分由主控站、监测站、地面天线和通信辅助系统(注入站,将导航电文和控制命令播发给卫星)组成,主要实现的功能有:通过监视整个卫星星座的运行,测量它们发射的信号;计算各颗卫星的时钟误差,以确保卫星时钟与系统时间同步;计算各颗卫星的轨道运行参数;计算大气层延时等导航电文中所包含的各项参数;更新卫星导航电文数据,并将其上传给卫星;监视卫星发生故障与否,发送调整卫星轨道的控制命令;启动备用卫星,安排发射新卫星等事宜。地面监控部分在保障 GNSS 平稳运行上发挥了极大的作用。

GNSS 主控站是导航卫星系统地面信息处理和运行控制的中心,其主要任务是收集各个监测站采集的卫星信号、观测数据及环境数据,进行时间同步与卫星时钟偏差预报、卫星精密轨道确定与星历参数生成、广域差分改正值计算、电离层模型参数计算以及系统完好性计算等处理,并实现导航卫星系统的任务规划与调度、全系统运行管理与控制等。

主控站的主要功能包括建立系统的时间和空间基准、生成导航电文、监测卫星钟等有效载荷,并实现对其调整和控制;分析卫星星座性能,维持卫星轨道。卫星导航系统一般有一个主控站即可满足要求,基于安全等方面因素考虑,也可有备份的主控站。GPS 的主控站位于美国科罗拉多州的猎鹰空军基地;GLONASS 的主控站位于莫斯科郊区;BDS 的主控站位于北京;Galileo 有两个主控站,分别位于意大利和德国。

GNSS 监测站是指卫星导航系统中对卫星实施监测和采集数据的卫星信号接收站。根