

卫星导航信号 模拟源理论与技术

Theory and Technology of Satellite Navigation Signal Simulator

杨俊 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

/ 卫星导航系统测试与评

卫星导航信号 模拟源理论与技术

Theory and Technology of Satellite Navigation Signal Simulator

杨俊 陈建云 明德祥 钟小鹏 著 ■



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

卫星导航信号模拟源是卫星导航系统的高可信模拟,可为卫星导航系统设计论证、仿真试验、星地对接提供近似真实的卫星导航信号试验测试环境,是卫星导航用户终端与产品研发、生产和使用维护等全过程中不可或缺的仪器设备。本书是国内首部系统全面介绍卫星导航信号模拟源相关理论及其软硬件体系结构的著作,全书共分为8章,内容包括卫星导航系统概述、卫星导航用户终端测试技术概论、卫星导航系统空间段仿真的数学原理、卫星导航系统环境段仿真的数学原理、卫星导航系统用户段仿真的数学原理、卫星导航用户终端测试信号模型、卫星导航测试信号精密信号生成技术、卫星导航信号模拟源校准与溯源技术等。本书内容力求反映近年来在卫星导航测试评估领域最新的技术成果,以推动卫星导航系统建设和产业发展,加强交流合作,不断拓展应用,实现我国卫星导航系统的跨越式发展。

本书可作为从事卫星导航模拟测试系统与用户终端设计、研制、生产和检测的科技工作者和工程师的工具书和参考资料,也可作为高等院校相关专业教师 and 研究生教学的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航信号模拟源理论与技术/杨俊等著. —北京:
国防工业出版社, 2015. 5
ISBN 978 - 7 - 118 - 09923 - 2

I. ①卫… II. ①杨… III. ①卫星导航—模拟信号
IV. ①TN967. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 086772 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 22 1/4 字数 520 千字
2015 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

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。卫星导航已成为信息社会与信息化战争不可或缺的重要支撑系统和战斗力倍增器,正在使世界政治、经济、军事、科技、文化发生革命性的变化。20世纪80年代初,中国开始积极探索适合国情的卫星导航系统;2000年,建成北斗卫星导航试验系统,标志着中国成为继美、俄之后世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家;2012年12月,正式向亚太地区提供服务;2020年左右,将向全球提供服务。北斗卫星导航系统的建设与发展,不仅满足了国家安全、经济建设、科技发展和 社会进步等方面的需求,而且提升了国家形象,增强了综合国力。

卫星导航信号模拟源是卫星导航系统的高可信模拟,是卫星导航系统论证、建设和各类应用中不可或缺的仪器设备,不仅是卫星导航应用终端研发、生产和使用维护等全过程必须的测试试验与计量检测设备;而且是卫星导航系统设计论证、升级换代、星地对接、运行控制等必须的仿真试验与评估系统。它既涉及卫星轨道、钟差、信号传输与应用场景等各类模型,又涉及数学仿真、信号模拟、计量标校、自动化测试和仿真与评估等多学科理论,集中反映了国家卫星导航系统建设与应用的水平,是国际卫星导航领域争夺的战略制高点之一,能否自主掌握核心关键技术将直接影响我国卫星导航系统的国际核心竞争力。

本系列丛书作者所在研究团队是我国卫星导航领域极具创新的团队,具有深厚的理论基础与工程实践经验,在国内率先研制了具有完全自主知识产权的GNS 8000系列卫星导航信号模拟器及集成测试系统,六项核心指标领先国际同类产品,打破了国外技术封锁和产品禁运,为我国卫星导航系统建设、应用推广、国际合作发挥了不可替代的作用。产品应用覆盖国家各级计量与检测中心,以



及装备检测、靶场定型、原位测试、维修保障等数百家军民单位,作者所在团队牵头制定有关国家标准规范,首次建立了我国卫星导航产品计量检测体系。带动了我国卫星导航终端的技术研发和试验水平,加速了我国卫星导航系统的示范应用和推广普及。

本书的出版凝聚了该团队十余年的研究成果,希望借此进一步推动我国卫星导航系统建设和产业发展,加强国际交流合作,不断拓展应用领域和应用水平,满足经济社会日益增长的多样化卫星导航与位置服务产业需求,实现我国卫星导航系统跨越式发展。

时空基准一直是国家的重要基础设施,随着全球经济社会发展信息化水平的不断提升,国家安全和经济社会发展对定位导航授时服务提出了更高要求。卫星导航系统具有覆盖范围广、全天时、全天候、精度高、应用便捷、用户数量无限制等优点,已成为世界范围内首选的定位导航授时手段。自美国 GPS 出现以来,卫星导航技术在军民领域发挥着越来越重要的作用,出于军事安全以及商业利益的考虑,世界主要航天大国和国家集团不惜巨资发展全球卫星导航系统,目前形成了美国 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 Galileo 和中国北斗(BeiDou/COMPASS)导航四大全球卫星导航系统格局。此外,日本的准天顶卫星导航系统(QZSS)、印度的卫星导航系统(IRNSS)也是正在发展的具有各自特色的区域卫星导航系统。

卫星导航系统是当今世界信息技术发展水平的集中体现,展示了国家在科技和经济领域的实力,是衡量国家综合国力的重要标志。伴随我国北斗导航系统的发展,卫星导航应用已在交通运输、测绘、资源勘探等静态定位以及高精度授时、科学研究、武器装备等领域获得了广泛的发展,显示出广阔的产业市场空间和军事应用价值。随着卫星导航设备大量进入各行各业,其应用场景千差万别,卫星导航信号传播不仅有载体动态所引起的多普勒频移,而且不可避免地受到各种误差源和应用环境的影响。卫星导航信号模拟源是真实卫星导航系统的高精度模拟,一直受到军事和工业部门的关注,可在受控实验室环境中为卫星导航接收机及其系统的研制、生产、应用、测试检验、模拟训练等环节提供关键性的测试与验证支持,可为卫星导航接收机及依赖卫星导航接收机的各类定位导航授时系统提供一种真实可信的高效率测试手段。与实际测试不同的是,使用卫星导航信号模拟源测试时,测试者可以实现对卫星信号及其环境条件的完全模拟和控制。利用卫星导航信号模拟源,用户能够针对不同类型的测试需求便捷地生成和运行多种不同的场景,并且对导航系统全链路环节提供完全的控制能



力,大大缩短从产品研发到产业化的过程,大幅提高竞争力。

卫星导航信号模拟源作为检测系统的核心关键设备,涉及卫星导航轨道模型、钟差模型、信道传输模型、导航电文结构、导航信号体制、精密信号合成、高精度测量与标校、自动化测试等多学科理论与技术,集中反映了国家卫星导航系统建设与应用的技术水平,是国际卫星导航领域争夺的战略制高点之一,其性能水平将直接影响我国卫星导航设备产品参与国际市场竞争的能力。目前卫星导航产业正以前所未有的速度蓬勃发展,卫星导航设备研制与应用产业领域亟需关于卫星导航信号模拟源相关专著,通过阅读本书可完整掌握卫星导航信号模拟源理论与技术,以便更好地利用卫星导航信号模拟源为通用接收机、RTK 测量接收机、自适应天线抗干扰接收机、高动态接收机、多模接收机等卫星导航高端用户终端测试、生产与验收维护等提供强有力的测试支持与计量保障。

本书作者所在研究团队在导航测试评估领域具有深厚的研究与工程实践基础,在国内率先实现卫星导航信号模拟器产品化和产业化,形成 10 余个型号产品及系列测试系统解决方案,高端型号填补了国内空白,承担和参与卫星导航测试相关标准撰写起草近 20 项,形成了北斗导航测试领域的专业团队和系列成熟产品,在国内数百余家科研院所、高等院校和企业进行了长时间大批量成功应用,大幅提高了我国卫星导航军民用装备的研制和试验水平,为我国卫星导航系统建设、加速应用推广和增强国际合作发挥了极大的支撑作用,取得了显著的政治效益、经济效益、社会效益和军事效益。本书结合作者多年来研究成果,全面详细介绍了卫星导航信号模拟源的概念、理论与方法,反映了近年来在卫星导航测试评估领域最新的技术和成果,是我国首部系统全面介绍卫星导航信号模拟源相关理论及其软/硬件体系结构的著作。本书可作为从事卫星导航模拟测试系统与用户终端设计、研制、生产和检测的科技工作者和工程师的工具书和参考资料,也可作为高等院校相关专业教师和研究生教学的参考书。

全书共分为 8 章:第 1 章“卫星导航系统概述”介绍主要的卫星导航系统的组成、指标和最新概况;第 2 章“卫星导航用户终端测试技术概论”介绍卫星导航信号模拟源的基本概念、优势特点和国内外发展现状和趋势;第 3 章“卫星导航系统空间段仿真的数学原理”全面系统阐述卫星导航信号模拟源系统仿真中的空间段时空、轨道、星座、钟差模型理论及其实现与应用;第 4 章“卫星导航系统环境段仿真的数学原理”全面系统阐述卫星导航信号传输过程中涉及的电离层、对流层、多路径延迟模型理论及其实现与应用;第 5 章“卫星导航系统用户段仿真的数学原理”全面系统阐述卫星导航信号模拟源设计中的导航电文模型、用户观测量仿真模型、用户运动轨迹仿真模型、广域差分与完好性模型、惯导数据仿真模型理论及其实现与应用;第 6 章“卫星导航用户终端测试信号模型”详细阐述卫星导航信号模拟源信号仿真涉及的各大卫星导航系统信号体制;第 7 章“卫星导航测试信号精密生成技术”系统阐述多通道卫星导航射频信号模拟的高精度延迟理论、可重

构卫星导航信号模拟源体系结构、卫星导航信号模拟源信号产生误差链路模型与精度分析方法等;第8章“卫星导航模拟源校准与溯源技术”论述卫星导航信号模拟源指标体系、关键指标参数标校技术、卫星导航信号模拟源溯源体系及其方法。

本书内容是由研究团队全体成员多年来从事卫星导航信号模拟源及卫星导航测试评估研究取得的成果提炼而成,除作者外,国防科学技术大学机电工程与自动化学院王跃科教授提出了关于信号精密延迟的基础性理论;周永彬、单庆晓、冯旭哲、刘国福、黄文德、张传胜、杨健伟、邢克飞等老师先后参与了相关课题的研究工作;胡梅、胡助理、沈洋老师在成果鉴定、出版事务等方面给予了极大支持,研究团队的硕士研究生、博士研究生及导航仪器湖南省工程研究中心的工程技术人员参与了本书的编写、排版和校对工作;感谢湖南矩阵电子科技有限公司科研与工程技术人员长期以来在数学仿真、时频、射频、测试评估、试验验证等系统研发和推广应用方面提供了强有力的技术支撑和保障。本书部分内容参考了国内外同行专家学者的最新研究成果,在此向他们致以诚挚敬意。在本书的编写过程中,得到各级部门和有关专家的关怀与支持,特别是国家最高科技奖获得者——两院院士、北斗工程总设计师孙家栋院士在相关课题研究中一直给予最直接的关心和指导,在百忙中又对本书进行了审阅并题写了序,在此表示衷心感谢和崇高敬意!

由于卫星导航信号模拟源涉及多门学科前沿,其理论与技术仍在不断发展中,加之作者水平和经验有限,书中错误和纰漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

2014年12月于长沙

第1章 卫星导航系统概述

1.1 卫星导航与 PNT 体系	1
1.2 主要卫星导航系统概况	4
1.2.1 子午卫星导航系统	4
1.2.2 美国 GPS 卫星导航系统	7
1.2.3 俄罗斯 GLONASS 卫星导航系统	11
1.2.4 中国北斗卫星导航系统	12
1.2.5 欧洲 Galileo 卫星导航系统	14
1.2.6 其他卫星导航系统	15
参考文献	16

第2章 卫星导航用户终端测试技术概论

2.1 卫星导航用户终端测试的基本原理	17
2.2 卫星导航用户终端测试的作用和意义	21
2.3 卫星导航用户终端测试的发展与应用	22
2.3.1 卫星导航测试系统	24
2.3.2 卫星导航信号模拟源	31
2.3.3 组合导航测试设备	33
2.3.4 差分导航测试设备	35
2.3.5 射频模块测试设备	36
2.3.6 A-GNSS 导航产品测试	40
参考文献	46



第3章 卫星导航系统空间段仿真的数学原理

3.1 概述	47
3.2 空间段仿真组成与基本原理	48
3.3 常数与参数库	51
3.4 时空计算模型	52
3.4.1 时间系统模型	52
3.4.2 时间系统变换关系	53
3.4.3 坐标系统模型	54
3.4.4 坐标系统变换关系	55
3.4.5 时空系统的应用方案	58
3.5 轨道仿真模型	58
3.5.1 力模型	58
3.5.2 积分器模型	66
3.5.3 姿态模型	69
3.5.4 轨道模型精度分析	71
3.5.5 轨道模型应用方案	71
3.6 星座仿真模型	73
3.6.1 常规星座仿真模型	73
3.6.2 特殊星座仿真模型	75
3.6.3 卫星轨道误差控制模型	76
3.6.4 卫星轨道模型应用方案	76
3.7 导航卫星 PVT 仿真模型	76
3.7.1 卫星位置计算模型	76
3.7.2 卫星速度计算模型	78
3.7.3 卫星加速度计算模型	79
3.7.4 卫星加加速度计算模型	79
3.8 导航卫星钟差仿真模型	79
参考文献	81

第4章 卫星导航系统环境段仿真的数学原理

4.1 概述	83
4.2 电离层仿真模型	84
4.2.1 模型组成与基本原理	84
4.2.2 电离层延迟模型算法	85
4.2.3 电离层映射函数算法	97

4.2.4	电离层延迟模型精度分析	98
4.2.5	电离层延迟仿真应用方案	100
4.3	对流层仿真模型	102
4.3.1	模型组成与基本原理	102
4.3.2	对流层延迟模型算法	104
4.3.3	对流层映射函数算法	110
4.3.4	对流层延迟误差精度分析	113
4.3.5	对流层延迟仿真应用方案	116
4.4	多路径延迟仿真模型	118
4.4.1	模型组成与基本原理	118
4.4.2	卫星信号多路径延迟类型	120
4.4.3	卫星导航信号多路径效应特性	121
4.4.4	基于几何模型的多路径延迟模型算法	124
4.4.5	基于函数拟合的多路径延迟模型算法	128
	参考文献	134

第5章 卫星导航系统用户段仿真的数学原理

5.1	概述	135
5.2	导航电文仿真模型	136
5.2.1	导航电文模型结构	136
5.2.2	导航电文参数拟合算法	150
5.3	用户观测值仿真模型	153
5.3.1	卫星可见性计算	153
5.3.2	伪距仿真模型	158
5.3.3	载波相位仿真模型	159
5.3.4	信号功率仿真模型	160
5.4	用户轨迹仿真模型	167
5.4.1	模型基本原理与组成	167
5.4.2	静态轨迹模型	168
5.4.3	车辆运动轨迹模型	169
5.4.4	舰船运动轨迹模型	170
5.4.5	飞机运动轨迹计算模型	174
5.4.6	导弹运动轨迹计算模型	178
5.4.7	特殊运动轨迹计算模型	180
5.5	广域差分与完好性仿真模型	183
5.5.1	模型组成与基本原理	183



5.5.2 模型算法	184
5.6 惯导数据仿真模型	186
5.6.1 惯性导航模型误差建模	187
5.6.2 惯性解算仿真器模型	189
参考文献	193

第6章 卫星导航用户终端测试信号模型

6.1 卫星导航信号体制的频率规划	195
6.2 卫星导航系统主要信号体制	197
6.2.1 BPSK/QPSK 信号调制体制	197
6.2.2 BOC 信号调制体制	201
6.3 GPS 导航信号模型	213
6.3.1 L1 C/A 信号	215
6.3.2 P(Y) 码	215
6.3.3 L1C 信号	217
6.3.4 L2C 信号	221
6.3.5 L5 信号	222
6.4 北斗系统导航信号模型	224
6.5 GLONASS 系统导航信号模型	226
6.6 Galileo 系统导航信号模型	230
6.6.1 概述	230
6.6.2 信号调制体制	232
6.6.3 测距码结构	236
6.6.4 导航电文结构	246
参考文献	247

第7章 卫星导航测试信号精密生成技术

7.1 高动态信号模拟理论	248
7.1.1 直接数字频率合成基本原理	248
7.1.2 DDS 杂散噪声分析和抑制方法	253
7.1.3 基于混合字长 DDS 的高动态模拟技术	260
7.1.4 高动态信号模拟下 DDS 截断误差的高精度修正	261
7.2 卫星导航信号模拟的关键技术指标	263
7.2.1 卫星导航信号模拟精度	263
7.2.2 卫星导航信号模拟质量	264
7.2.3 卫星导航信号动态特性	265

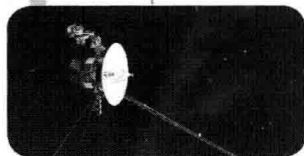
7.3	高精度数字波形延迟理论	265
7.3.1	基本原理	265
7.3.2	FIR 滤波器的近似逼近	268
7.3.3	分数插值延迟滤波器的设计	272
7.3.4	高分辨率延迟滤波器的设计	276
7.3.5	延迟滤波与 NCO 产生信号的比较	278
7.4	导航卫星信号精密信号生成技术	280
7.4.1	导航卫星基带信号生成技术	280
7.4.2	导航卫星射频信号调制技术	283
7.5	可重构卫星导航信号模拟源体系结构	290
7.5.1	SNWA 体系架构	291
7.5.2	模块化可重构的 SNWA 硬件结构	294
7.5.3	导航信号动态波形部署技术	296
7.6	卫星导航信号精密生成误差分析	296
7.6.1	基带信号相位误差分析	296
7.6.2	基带信号幅度量化误差分析	306
7.6.3	DAC 电路特性的影响	307
7.6.4	射频通道误差分析	309
7.6.5	延迟参数的精度分析	311
	参考文献	315

第8章 卫星导航模拟源校准与溯源技术

8.1	概述	318
8.2	卫星导航信号模拟源指标体系	319
8.3	基于通用仪器的测量校准技术	320
8.3.1	关键指标通用仪器测量方法	320
8.3.2	关键指标测量及结果分析	326
8.4	卫星导航信号模拟源溯源技术	331
8.4.1	卫星导航设备溯源	331
8.4.2	基于 MAP 的导航信号模拟源溯源方案	332
8.4.3	导航信号模拟源关键指标溯源实现	336
	参考文献	342

第 1 章

卫星导航系统概述



1.1 卫星导航与 PNT 体系

导航定位是利用已知参考点位置确定目标点位置,导航在人类历史发展进程中一直发挥着重要作用。在跨越千年的人类导航史上,主要出现了天文导航、惯性导航、无线电导航以及卫星导航等主要手段^[1]。

时空信息是信息化社会的基础资源,随着我国国家利益向全球拓展,经济社会发展信息化水平不断提升,国家安全面临的挑战不断增加,对定位导航授时服务提出了更高要求。卫星导航系统具有覆盖范围广,全天候、全天时,精度高,应用便捷,用户数量无限制等优点,已成为世界范围内首选的定位导航授时手段。卫星导航定位是将卫星作为导航台(站)或测量定位已知点,由卫星发射无线电测距信号进行测距、导航或定位^[2]。全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)能够为地球及近地空间的任意地点提供全天候的精密位置和时间信息。卫星导航系统作为能够提供高精度、连续、全天候的无线电导航定位和授时服务的多功能系统^[3],可为各种精确打击武器制导,使得武器的命中率大为提高,武器威力显著增长^[4]。卫星导航系统可完成需要精确定位与时间信息的战术操作,与通信、计算机和情报监视系统构成多兵种协同作战指挥系统,已成为武装力量的支撑系统和战斗力倍增器^[5]。此外,卫星导航系统作为国家重要基础设施,为经济发展提供了强大的动力。随着卫星导航接收机的集成微小型化,卫星导航系统已广泛应用于国民经济各个领域,如图 1-1 所示。

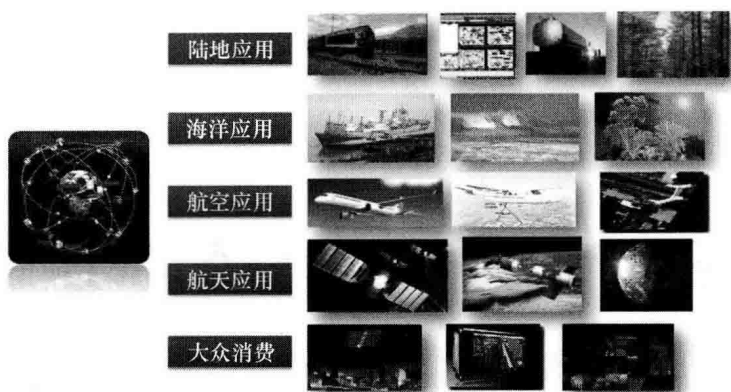


图 1-1 卫星导航系统的多领域应用和导航产品普及

独立的卫星导航定位系统是建设强大国防、维护国家安全的重要手段,具有重要的战略意义^[6]。因此全球卫星导航系统得到迅速而广泛的应用和发展。自美国全球定位系统(GPS)出现以来,卫星导航技术在军用和民用领域发挥着越来越重要的作用。出于军事安全以及商业利益的考虑,世界主要军事大国及经济体都已经或正在发展自己的导航系统^[2]。如世界主要航天大国和国家集团不惜巨资发展全球卫星导航系统,目前形成了美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧盟 Galileo 系统和我国北斗卫星导航系统(BDS)的四大全球卫星导航系统的格局^[6],如图 1-2 所示。此外,日本的准天顶卫星导航系统(QZSS)、印度的区域卫星导航系统(IRNSS)也是正在发展的具有各自特色的区域卫星导航系统^[8]。

单系统 GNSS 已远不能满足一些特殊行业的要求,例如,民航、铁路等领域不仅要求卫星导航系统的定位精度高,同时对导航信号的可用性、完好性、连续性和稳定性等方面提出了较高要求。到 2020 年全世界卫星导航应用市场将达 3500 亿美元的规模。世界各个国家和地区在加紧实施自身的卫星导航计划,2008 年 4 月 23 日,欧洲议会通过了 Galileo 计划的最终部署方案,为期 6 年的 Galileo 计划基础设施建设阶段正式启动;同时,美国为了确保 GPS 在军事上、政治上和经济上获得最大的利益,正在加紧实施 GPS 现代化;俄罗斯正在积极完善 GLONASS,在下一代的 GLONASS-K 卫星增加新的信号体制,地面控制部分也将得到升级,首颗 GLONASS-K 卫星已在 2011 年 2 月发射升空;我国已经建成了覆盖本国及周边区域的“双星”系统,成为世界上第三个拥有卫星导航系统的国家,并正在积极开发建设第二代卫星导航系统;其他国家和地区也在计划建立自己的区域卫星导航系统,如日本的准天顶卫星导航系统设计从 2003 年开始,目前已经发射第一颗“Michibiki”卫星;印度也在 2006 年宣布研发独立的印度区域导航卫星系统(IRNSS)^[9]。全球卫星系统可用卫星数量急剧增加,随着 21 世纪前 20 年内多个卫星导航系统的建成,届时将有超过 120 颗导航卫星在

天空,利用多个 GNSS 进行组合为各类用户提供无缝的全球范围导航定位服务成为现实。

导航信号可用频带有限,越来越多的 GNSS 提供导航信号导致导航信号频谱资源日趋紧张,各卫星导航系统之间出现频谱重叠、共用已成为必然趋势。

随着 GPS 现代化、GLONASS 振兴计划及现代化、Galileo 系统和中国北斗全球系统的建设,用户可以同时利用多个 GNSS 以提高精度和其他指标,多体制兼容已成为未来 GNSS 发展的主要方向^[10]。根据统计,GPS 现代化计划包括 L1 上的 C/A 码、P(Y)码和 L2 上的 P(Y)、L1C、L1M、L2C、L2M、L5 等信号,共 8 类 11 种信号分量(公开 7 种,授权 4 种);北斗系统信号体制共 6 类 11 种信号分量(公开 6 种,授权 5 种),Galileo 信号包括 L1F、L1P、E6C、E6P、E5a 和 E5b 共 6 类 10 种信号分量(公开+付费 8 种,授权 2 种);GLONASS 播发 L1、L2、L3 共 3 类 3 种信号分量。多导航系统兼容与互操作技术要求未来的多模多体制 GNSS 接收机需要接收多个频点、多种扩频码以及多种信号调制体制的导航信号。

由此可见,多导航系统共存需要未来 GNSS 接收机具备兼容性和互操作能力。兼容性是指各种 GNSS 的定位、导航与授时服务既可独立使用又可共同使用且不相互干扰。互操作是指通过各导航系统在频率、信号体制、时间系统、坐标系统等方面的协调乃至统一设计,使多系统互用接收机以更低的技术复杂度和成本获取更好的使用性能。GNSS 之间的兼容互操作研究与接收、测试技术已经成为国际四大导航系统的争执焦点和研究热点。

目前包括北斗系统在内的全球导航卫星系统及其产业正处在大变化、大转折、大发展时期,GNSS 多系统并存和信息系统间的相互渗透融合成为大趋势,进入大数据智能化和无线革命时代。今后 10~20 年间将经历前所未有的四大转变:从单一的 GPS 时代转变为真正实质性的多星座并存兼容的 GNSS 新时代,开创卫星导航体系全球化和增强多模化的新阶段;从以卫星导航为应用主体转变为定位导航授时(PNT)与移动通信和互联网等信息载体融合的新时期,开创信息融合化和产业一体化^[11]。随着 GPS 的成熟和广泛应用,美国获得全球持续有效导航能力的需求日益迫切。为应对欧洲 Galileo、俄罗斯 GLONASS 以及我国北斗系统的挑战,美国提出建设国家 PNT 体系结构概念,从更高层次上研究满足导航、定位、授时需求的系统组成及建设途径,以维护美国在天基 PNT 方面的领先地位。并提出 2025 年建成由 GPS、地面无线电、无线网络、伪卫星、天文导航等众多手段组成的 PNT 体系结构(图 1-2)。美国 PNT 体系结构的发展愿景是,通过开发和部署能在全球使用的有效 PNT 能力,保持美国在全球 PNT 领域的主导地位^[7]。美国 PNT 服务将继续由太空、陆地和自主源提供。2008 年起,美国陆续正式发布了《国家 PNT 体系结构研究最终报告》《国家定位导航授时体系结构实施计划》《2003 年参联会(CJCS)PNT 规划》《PNT 联合能力文档》《国防部体系结构框架 DoDAF》等国家 PNT 结构研究报告。



图 1-2 美国 2025 年目标 PNT 体系结构(系统中心视角)

为此,美国开展多项支撑计划,如美国国防高级研究计划局(DARPA)的“全源导航”项目,旨在探索综合利用卫星导航、激光测距仪、相机和磁力计等来源的信息提供高可靠性的导航定位服务。俄罗斯、日本等国家也正在加紧构建以天基导航系统为核心、多手段互为备份、多系统有机融合的国家定位导航授时体系。目前美国、俄罗斯正在重点推进卫星导航系统现代化。GPS 现代化提出的军民频谱分离、更新军码、增加发射功率、区域功率增强等措施将进一步提高抗干扰和反利用能力。俄罗斯 GLONASS - K、GLONASS - KM 卫星将采用多种先进技术,设计寿命延长至 15 年。原子钟、抗干扰、星间链路等技术的发展将使卫星导航系统向更高精度、抗毁顽存、功能多样、持续自主导航方向发展,卫星导航系统将持续占据国家定位导航授时体系的核心地位。

1.2 主要卫星导航系统概况

1.2.1 子午卫星导航系统

1957 年 10 月苏联成功发射了第一颗人造卫星后,美国霍普金斯大学应用物理实验室的吉尔博士和魏分巴哈博士对卫星遥测信号的多普勒频移产生了浓厚的兴趣,认为利用卫星遥测信号的多普勒效应可对卫星精确定轨;而该实验室的克什