

地球空间信息学前沿丛书 丛书主编 宁津生

“十三五”湖北省重点图书出版规划项目

GNSS基准站网数据 处理方法与应用

姜卫平 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

地球空间信息学前沿丛书 丛书主编 宁津生

“十三五”湖北省重点图书出版规划项目

GNSS基准站网数据 处理方法与应用

姜卫平 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

GNSS 基准站网数据处理方法与应用/姜卫平著. —武汉:武汉大学出版社,2017.3

地球空间信息学前沿丛书/宁津生主编

“十三五”湖北省重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-307-12917-7

I. G… II. 姜… III. 卫星导航—全球定位系统—数据处理—研究
IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 039892 号

责任编辑:鲍 玲

责任校对:汪欣怡

版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:17.75 字数:425千字 插页:2

版次:2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷

ISBN 978-7-307-12917-7 定价:46.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

姜卫平



1972年6月生，湖南溆浦人，博士，武汉大学卫星导航定位技术研究中心主任、教授、博士生导师，教育部长江学者特聘教授，国家杰出青年科学基金获得者。长期致力于卫星大地测量学理论与应用研究，已发表论文130余篇，获国家科学技术进步二等奖2次，省部级科技进步特等奖2次，一等奖7次。

前 言

全球卫星导航系统 (GNSS) 是重要的空间基础设施, 为人类带来了巨大的经济效益和社会效益。然而, GNSS 自身提供的导航定位精度最高到米级, GPS 最初的民用导航定位精度甚至低于 100m, 不能满足高精度导航和定位的要求。地面基准站网能将 GNSS 的定位精度增强提高到分米级、厘米级, 甚至毫米级, 是 GNSS 实现高精度导航与位置服务应用的系统平台。同时, 它也是支撑全球、国家和区域坐标参考框架的基础设施, 还被广泛应用于揭示和认知地壳运动、全球变化等地球科学研究以及大型工程建设。基准站网是由分布在全球或区域的若干个 GNSS 基准站构成, 包括连续运行的和不连续运行的基准站。为了满足不同的应用需求, 各国建立了不同尺度的 GNSS 基准站网, 包括大尺度的 IGS 全球跟踪站网、中尺度的国家 (如中国地壳运动观测网络) 或省市级连续运行参考站网、小尺度的大桥及大坝等工程基准站网。

自 1994 年起, 作者开始从事卫星导航定位基准站网精密数据处理理论与方法研究。有幸在 20 世纪 90 年代中后期, 参与了我国当时有影响力的几个大型 GPS 网的数据处理工作, 包括鲜水河断裂带 GPS 监测网 (1991 年测量)、青藏高原 GPS 监测网 (1992—1996 年三期)、“现代地壳运动与地球动力学研究”项目建立的 GPS 监测网 (1992—1996 年三期)、国家 1996 年 A 级 GPS 复测网和国家 B 级 GPS 网以及“亚太区域大地测量项目” (APRGP) 的 GPS 网 (1997 年测量)。在处理分析这些 GPS 网数据的实践中, 积累了较为丰富的基准站网精密数据处理的工作经验。2000 年以来, 陆续分析处理了我国第一个城市连续运行 GNSS 基准站网数据及河北、广东等省的 C 级 GPS 网数据, 并确定了这些网的基准站精确坐标。2005 年后, 先后负责了江苏、湖北、湖南、安徽、山西、重庆、吉林、内蒙古等近 20 个省级和广州、武汉、西宁、长春、常州、珠海等近 40 个城市连续运行 GPS 基准站网的数据处理工作, 建立了这些区域的坐标参考框架。同时, 完成了隔河岩大坝、西龙池大坝、港珠澳大桥等 10 多个工程连续运行基准站网的数据处理工作。此外, 2003 年至 2005 年期间, 通过分析冰岛连续运行基准站网和 1989 年至 2004 年的多期会战网数据, 确定了整个冰岛区域地壳运动的水平和垂直速度场。2007 年至今, 作者着手开展研究大规模 GNSS 基准站网的整体解算模型和坐标时间序列分析方法及应用等工作。

二十多年来, 作者一直从事 GNSS 基准站网的数据处理工作, 可以说是乐此不疲, 甚至是“衣带渐宽终不悔, 为伊消得人憔悴”。通过多年的努力, 系统地研究了 GNSS 基准站网精密数据处理理论与方法, 发展了基准站网的应用技术, 建立了北斗和其他 GNSS 融合处理模型, 形成了一套较为系统的 GNSS 基准站网建立的技术方案和数据处理方法体系。此书正是作者多年研究工作的总结。本书内容不仅包括基准站网的发展现状与分析、

基准站网的数据处理方法以及整周模糊度分离与快速固定方法,而且还涉及基于连续运行基准站网的单/双频 GNSS 精密单点定位技术、基于 Internet 的精密单点定位服务、GNSS 测站坐标时间序列分析、地球参考框架的建立与维持、基于 GNSS 基准网的地壳运动与建筑物变形及地质灾害监测、基准站网系统功能与服务等。作者希望抛砖引玉,与大家交流分享基准站网的建立和数据处理方法及其应用技术,共同为推动 GNSS 基准站网的发展和应用作出贡献。

当前,随着基准站网规模的不断增大,观测数据的不断积累,我国北斗系统的逐步建成,高精度构建基准站网面临着不少挑战,主要包括:大规模网整体解算、基准站构造运动与非线性运动及噪声的分离、北斗卫星导航系统(BDS)与其他多 GNSS(美国 GPS、俄罗斯 GLONASS 和欧盟 Galileo)的融合处理等难题,造成大规模网解算理论难以严密实现,基准站坐标及速度场确定不准确(甚至错误),更为严重的是在卫星信号接收困难区域基准站网可用性差,甚至不可用。这降低了基准站网的精确性、可用性及其服务能力,制约了卫星导航定位技术的应用和发展,特别是在幅员辽阔、基准站数量众多、北斗系统正在发展的我国,这些问题尤为突出。本书的研究内容涉及了这些问题及其解决思路与方法,希望能够为研究这些问题提供一些参考。

本书的研究内容与成果得到了国家杰出青年科学基金(No. 41525014)、教育部长江学者奖励计划、国家 863 计划(No. 2007AA12Z312)、国家自然科学基金(No. 41374033)等项目的资助。部分研究内容是作者和周晓慧、李昭、杨凯、陈华、刘鸿飞、邓连生、邹璇等博士共同完成的,非常感谢他们的支持和辛勤工作。同时,长期以来,在 GNSS 基准站网的数据处理和应用研究中,作者得到了刘经南院士、李建成院士的精心指导和大力支持,在此向他们表示深深的敬意和谢意。此外,衷心感谢多年来一直给予作者关心和支持的所有同事、朋友以及学术同仁。

本书于 2011 年开始撰写,虽经近十次的修改和讨论,但无奈限于水平和时间,书中还有不妥甚至错误之处,恳请大家批评与指正。

“路漫漫其修远兮,吾将上下而求索。”

作者

2016 年 12 月于武汉

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 全球导航卫星系统简介	2
1.2.1 GPS	2
1.2.2 GLONASS	3
1.2.3 Galileo	4
1.2.4 北斗卫星导航系统	4
1.2.5 其他定位导航或增强系统	6
1.3 GNSS 基准站网的定义与应用	7
1.3.1 GNSS 基准站网的定义	7
1.3.2 GNSS 基准站网的功能与应用	8
第 2 章 GNSS 基准站网的发展现状与分析	9
2.1 国际 GNSS 基准站网	9
2.1.1 全球 GNSS 基准站网	9
2.1.2 美国连续运行参考站网系统	9
2.1.3 加拿大主动控制网系统	11
2.1.4 欧洲永久网	12
2.1.5 德国卫星定位与导航服务系统	12
2.1.6 日本 GPS 连续应变监测系统	12
2.2 中国 GNSS 基准站网	13
2.2.1 行业级 CORS	13
2.2.2 城市级 CORS	14
2.2.3 省级 CORS	15
2.2.4 中国国家级 CORS 的建设现状	17
2.3 中国区域 GNSS 网现状分析及建议	17
2.3.1 GNSS 基准站网迅速发展的必然性	17
2.3.2 我国连续运行基准站网建设存在的问题及思考	19
第 3 章 高精度 GNSS 数据处理方法	21
3.1 GNSS 测量误差源分析	21

3.1.1 与卫星有关的误差	21
3.1.2 与传播路径有关的误差	23
3.1.3 与接收机、测站有关的误差	24
3.1.4 其他误差源	25
3.2 高精度 GNSS 数据处理的定位模式及考虑的主要因素	26
3.2.1 高精度数据处理中常用观测值及定位模式	26
3.2.2 高精度数据处理中考虑的主要因素及其影响	27
3.3 高精度 GNSS 数据处理软件	32
3.3.1 GAMIT/GLOBK 软件发展历史及现状	32
3.3.2 GAMIT 与 GLOBK 软件功能及组成	33
3.3.3 GAMIT/GLOBK 软件的安装	42
3.3.4 GAMIT 与 GLOBK 数据处理流程	44
3.4 基于子网划分的基准站网数据处理	48
3.4.1 概述	48
3.4.2 子网划分与公共站选择一般性原则	48
3.4.3 子网划分方法分析	49
3.4.4 公共站选择方法分析	54
3.5 基于整体解算的 GNSS 基准站网参数估计方法	58
3.5.1 现有参数估计方法评述	58
3.5.2 高性能法方程求逆方法研究	61
3.6 多系统融合数据处理	68
3.6.1 多系统融合定位的优势	69
3.6.2 多系统融合数据处理基本原理	69
3.6.3 多系统数据处理发展趋势	71
第 4 章 整周模糊度分离与快速固定方法	73
4.1 引言	73
4.2 常用模糊度固定方法	74
4.2.1 取整法	74
4.2.2 区间判定法	74
4.2.3 最小二乘模糊度降相关平差法 (LAMBDA)	74
4.2.4 Melbourne-Wuebbena 方法	75
4.3 参数消去-恢复法研究	77
4.3.1 研究背景	77
4.3.2 参数消去-恢复法研究现状	78
4.3.3 基于大规模基准站网的参数消去-恢复法	78
4.3.4 参数消去-恢复法解算效率与精度评判	82
4.4 基于参数消去-恢复法的模糊度固定策略	85

4.4.1 选择最优化最大无关双差模糊度映射算子 d	86
4.4.2 基于参数消去-恢复法的模糊度固定方法	88
4.5 基于 Carrier-range 的 GNSS 大网数据处理新方法	90
4.5.1 基本原理	90
4.5.2 大规模 GNSS 网数据处理新方法	92
4.5.3 实例与分析	92
第 5 章 GNSS 网络 RTK 和单频精密单点定位技术	98
5.1 常规 RTK 与网络 RTK	98
5.1.1 常规 RTK 定位技术	98
5.1.2 网络 RTK 定位技术	100
5.2 网络 RTK 技术	100
5.2.1 虚拟参考站技术	100
5.2.2 区域改正参数方法	103
5.2.3 主辅站技术	104
5.2.4 综合误差内插法	105
5.2.5 网络 RTK 软件研究现状	107
5.3 网络 RTK 系统	107
5.3.1 系统组成及子系统定义	107
5.3.2 基准站子系统	108
5.3.3 系统管理中心子系统	109
5.3.4 用户数据中心子系统	111
5.3.5 数据传输子系统	112
5.3.6 用户应用子系统	112
5.3.7 系统数据流	113
5.4 基于非差改正数的网络 RTK 方法	114
5.4.1 模型构建	114
5.4.2 数据处理策略	118
5.4.3 算例分析	118
5.5 基于 CORS 的实时精密单点定位服务	125
5.5.1 构建参考网实时模型	125
5.5.2 单频用户实时解算模型	126
5.5.3 算例分析	127
第 6 章 基于 Internet 的精密单点定位服务	133
6.1 精密单点定位在线服务系统发展现状	133
6.1.1 CSRS-PPP	134
6.1.2 Auto-GIPSY	134

6.2 精密单点定位 (PPP) 的数学模型	136
6.2.1 基本观测方程	137
6.2.2 传统无电离层组合模型	138
6.2.3 UofC 模型	138
6.2.4 无模糊度模型	138
6.2.5 模型分析	139
6.3 精密单点定位软件实现过程及结果分析	140
6.3.1 精密单点定位软件实现过程	140
6.3.2 精密单点定位 (PPP) 精度分析	141
6.4 Web 建站基础及技术	145
6.4.1 Apache 服务器和 MySQL 数据库	145
6.4.2 HTML 和 PHP 网页编程语言	146
6.4.3 数据安全传输技术 VPN	146
6.5 基于 Internet 的精密单点定位服务实现	147
6.5.1 网络模型服务设计	147
6.5.2 网站系统模块结构	148
6.5.3 网站后台管理功能模块	150
第 7 章 GNSS 测站坐标时间序列分析	154
7.1 国内外研究现状	154
7.1.1 GNSS 坐标时间序列噪声模型的建立	154
7.1.2 地球物理效应对基准站非线性运动的影响	155
7.1.3 基准站虚假非线性位移的成因研究	156
7.1.4 基准站非线性位移的修正	157
7.2 GNSS 坐标时间序列分析采用的参考框架	157
7.3 GNSS 坐标时间序列的周期特征常用分析方法	158
7.3.1 谱分析	158
7.3.2 小波分析	159
7.4 GNSS 坐标时间序列的噪声特性常用分析方法	160
7.4.1 GNSS 基准站坐标所涉及噪声的数学描述	160
7.4.2 噪声时间序列的获取	161
7.4.3 谱指数的计算	162
7.4.4 极大似然估计	163
7.5 环境负载造成的 GNSS 基准站非线性位移	164
7.5.1 环境负载产品	164
7.5.2 不同环境负载造成的基准站坐标时间序列特征	165
7.5.3 RMS 的定义	165
7.5.4 最优环境负载模型的建立及分析	166

7.6 中国区域 IGS 基准站坐标时间序列特征分析	171
7.6.1 采用的数据	171
7.6.2 方案设计	173
7.6.3 顾及环境负载改正的中国区域 IGS 基准站最优噪声模型建立	173
7.6.4 数据分析与讨论	176
7.6.5 中国区域 IGS 基准站周期性变化的其他因素分析	184
第 8 章 基于 GNSS 的地球参考框架建立与维持	187
8.1 地球参考框架的发展现状	187
8.1.1 全球参考框架	187
8.1.2 区域地球参考框架	189
8.1.3 ITRF 的研究进展及其局限性	192
8.2 利用 GNSS 基准站网建立与维持地球参考框架	193
8.2.1 地球参考系及其实现	193
8.2.2 基准约束	195
8.2.3 GNSS 基准站的选择	196
8.2.4 GNSS 技术的组合原理	196
8.2.5 并置站与局部连接	197
8.2.6 利用 GNSS 技术建立地心坐标参考框架的步骤	198
8.2.7 地球参考框架的维持	199
8.3 不同坐标参考框架之间的相互转换	199
8.3.1 基准转换方法	200
8.3.2 坐标移动转换方法及实例分析	202
8.4 毫米级地球参考框架建立方法与展望	207
8.4.1 顾及基准站非线性变化的地球参考框架的模型表达	207
8.4.2 坐标时间序列的非线性变化分析	208
8.4.3 顾及基准站非线性变化的毫米级地球参考框架的构建与展望	211
8.4.4 结束语	214
第 9 章 基于 GNSS 基准站网的地壳运动与建筑物变形及地质灾害监测	215
9.1 利用 GNSS 基准站网进行形变监测的发展历史与现状	215
9.2 全球板块构造与块体运动研究	216
9.2.1 发展历史与现状	216
9.2.2 GNSS 基准站网的建立	217
9.2.3 数据处理与分析方法	218
9.2.4 计算实例	220
9.3 板块内部相对运动研究	226
9.3.1 发展历史与现状	226

9.3.2 GNSS 基准站网的建立	226
9.3.3 数据处理与分析方法	227
9.3.4 计算实例 (山西和江苏省区域)	227
9.4 滑坡与建筑物形变监测研究	232
9.4.1 发展历史与现状	232
9.4.2 GNSS 基准站网的建立	232
9.4.3 数据处理与分析方法	234
9.4.4 计算实例	235
9.5 GNSS 自动化形变监测系统设计	236
9.5.1 数据采集部分	237
9.5.2 数据传输部分	237
9.5.3 数据管理、数据处理分析与系统控制部分	238
9.5.4 系统运行组织管理	240
9.6 会战式 GNSS 监测网设计	241
9.6.1 会战式监测网设计	241
9.6.2 作业规程设计	241
第 10 章 GNSS 基准站网系统功能与服务	242
10.1 GNSS 基准站网系统的产品、服务及用户分类	242
10.1.1 基准站网系统的产品	242
10.1.2 GNSS 基准站网系统的服务内容	245
10.1.3 GNSS 基准站网的用户分类	246
10.2 实时数据服务	247
10.2.1 GNSS 基准站网实时数据处理技术	247
10.2.2 GNSS 基准站网实时数据服务内容及模式	248
10.2.3 实时数据服务收费方式	249
10.3 事后数据服务	249
10.3.1 事后数据服务系统的内容	250
10.3.2 事后网络服务系统授权和收费方式	250
10.4 GNSS 基准站网的增值服务	251
10.4.1 坐标系统的转换及成果的动态实时发布	252
10.4.2 区域大地水准面精化	252
10.4.3 基于网络发布的在线增值服务	253
10.5 GNSS 基准站网系统服务的发展趋势	255
附录 引用的缩略词	257
参考文献	262

第1章 绪 论

1.1 引言

20 世纪 70 年代初,为了满足军事和民用对连续实时三维导航的迫切需求,美国开始研制基于卫星的全球定位系统。这个系统的全称是“授时与测距导航系统/全球定位系统”(Navigation System Timing and Ranging/Global Positioning System, NAVSTAR/ GPS),通常称为“全球定位系统”(Global Positioning System, GPS)。这一系统任务是 20 世纪最重大的空间技术计划之一,也开启了全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的新时代。

经过近 40 年的发展,GNSS 经历了从不成熟到成熟、从单个系统到多个系统、从单用途到多用途、从军事应用到民用的巨大变化。GNSS 具有全球、全天候、高精度连续导航和定位功能。如今,它已经渗透到了人们生活的每一个角落,其应用领域和应用前景已远远超出了该系统设计者当初的设想。由于其可以用来进行导航、授时、定位、地球物理与大气物理参数测定等,因此,在航空、航天、军事、交通、运输、资源勘探、通信、气象等很多领域中,它都被作为一项非常重要的技术手段和方法。随着 GNSS 本身的进一步完善和更多应用的开发,它将会更好地服务于社会。

由于 GPS 自身提供的定位精度最高到米级,甚至其最初的民用定位精度低于 100m,远远不能满足精确导航和定位的要求。因此,为了提高 GPS 定位和导航精度,20 世纪 90 年代初,很多国家开始建立永久性 GPS 跟踪站,用于定轨、精密定位和地球动力学监测,而后逐步形成基准站网,如 1994 年开始建设的国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service, IGS)跟踪站网。1994 年,美国国家大地测量局(National Geodetic Survey, NGS)学者 William E. Strange 提出了连续运行参考站的概念(Strange, 1994)。1995 年,他和同事明确给出了连续运行参考站系统(Continuously Operating Reference System, CORS)的定义及其初步方案。与此同时,美国其他机构也陆续开始构建连续运行的 GPS 基准站网,如美国海岸警卫队(USCG)希望提供差分 GPS 服务增补其罗兰导航性能,以保障美国沿海水域的安全导航;联邦航空管理局(FAA)也想将 CORS 应用于空中安全导航,进而发展成广域增强系统(Wide Area Augmentation System, WAAS);美国航天局(NASA)的喷气推进实验室(JPL)和美国地质调查局等利用连续运行基准站进行卫星定轨及地壳运动研究(Strange, 1995)。这些计划推动了 CORS 的迅速发展,截至 1995 年,NGS 已经拥有 50 个高质量的连续运行的 GPS 测站。可以这么说,IGS 和 NGS 大大地推动了 GNSS 基准站网的发展。

目前,基准站网是 GNSS 星基和地基增强系统的主要基础设施,能有效地将 GNSS 的定位精度提高到分米级、厘米级,甚至毫米级,是提供高精度导航与位置服务应用的系统平台。同时,它也是支撑全球、国家和区域坐标参考框架的基础设施,还是揭示和认知全球变化、地壳运动等地球科学研究的重要观测网络。当前,它不仅服务于测绘领域,而且还可为交通、气象、环境、工程建设等领域提供迅速、可靠、有效的信息服务,广泛地满足基础测绘、交通运输、环境监测、滑坡监测、建筑物变形监测、移动目标监控、地理信息更新和国土资源调查、地质灾害预报、气象预报等信息需求。正因为基准站网的诸多功能,许多国家、政府部门、行业、城市已经建立了或者正在建设满足自身需求的、连续运行的 GNSS 基准站网。

1.2 全球导航卫星系统简介

由于 GNSS 在国家安全和经济社会发展中具有不可或缺的重要作用,因此美国、俄罗斯、中国、欧盟都在竞相发展各自独立的卫星导航系统。预计在 2020 年之前,全世界将有四大全球导航卫星系统:美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 Galileo 和中国的北斗卫星导航系统(BDS)。

1.2.1 GPS

美国的 GPS 是目前应用最广泛的卫星导航定位系统。该系统从 1973 年开始设计研制,在经过了方案论证、系统试验后,于 1989 年发射工作卫星。历时 20 余年,耗资 300 亿美元,最终于 1994 年全部建成并投入使用。GPS 的组成可分为三个部分:卫星星座、地面监控和用户设备。利用 GPS 可以在全球范围内实现全天候、连续、实时的三维导航定位、测速和授时。

GPS 的空间部分是由 24 颗 GPS 工作卫星组成,这些工作卫星共同组成了 GPS 卫星星座,其中 21 颗为用于导航的卫星,3 颗为活动的备用卫星。这 24 颗卫星分布在 6 个倾角为 55° 的轨道上,轨道高度约 20000km。卫星的运行周期约为 12 恒星时。GPS 卫星发射两种频率的载波信号,即频率为 1575.42MHz 的 L1 载波和频率为 1227.60MHz 的 L2 载波,它们的频率分别是基本频率 10.23MHz 的 154 倍和 120 倍,波长分别为 19.03cm 和 24.42cm。在 L1 和 L2 上又分别调制着多种信号,这些信号主要有:粗捕获码(C/A 码)、精码(P 码和 Y 码)和导航信息等。导航信息(广播星历)被调制在 L1 载波上,其信号频率为 50Hz,包含有 GPS 卫星的轨道参数、卫星钟改正数和其他一些系统参数。GPS 用户正是利用这些信号来进行工作的。

GPS 自投入正式工作后,美国于 1996 年开始其现代化计划,并于 2000 年 5 月 1 日正式取消人为降低民用信号精度的 SA 政策,这标志着现代化计划进入实施阶段。其现代化计划主要内容为:

①增加新的 GPS 信号。2005—2008 年发射了 8 颗改进的导航卫星,在卫星上播发新的军码和第二民码,同时在 2006—2010 年发射的导航卫星上增设了第三民码。

②研发新一代军用 GPS 接收机,提高 GPS 的抗干扰能力。

③增强或视情况关闭 GPS 发射信号，以防止 GPS 信号战时受干扰或被他国利用。

④改善地面设备。更新 GPS 地面测控设备，增加地面测控站的数量；用新的数字接收机和计算机来更新专用的 GPS 监测站和有关的地面天线；采用新的算法和软件，提高测控系统的数据处理与传输能力等。

⑤实施 GPS III 计划。GPS III 将选择全新的优化设计方案，放弃现有的 24 颗中轨道卫星，采用全新的 33 颗高轨道加静止轨道卫星组成。GPS III 全部卫星在轨运行将在 2015—2020 年实现。与现有 GPS 相比，GPS III 的信号发射功率将提高 100 倍，信号抗干扰能力提高 1000 倍以上，授时精度将达到 1 纳秒，定位精度提高到 0.2~0.5m。

截至 2016 年 6 月，GPS 系统共有 32 颗在轨卫星，并计划在 2020 年之前发射多颗新型 GPS-2RM、GPS-2F 及 GPS-3 卫星，以搭载第二民用信号 L2C，及新增加的第三频段 L5，并大幅度提高 GPS 系统功能。届时，GPS 系统将继续成为世界上最先进的卫星导航系统。

1.2.2 GLONASS

GLONASS 是前苏联从 20 世纪 80 年代初开始建设的卫星导航定位系统。其主要由三部分组成：卫星星座、地面监测和用户设备。GLONASS 卫星星座由 24 颗卫星组成，卫星轨道分布在 3 个倾角为 64.8° 的轨道平面内，轨道高度约为 19130 千米。其运行周期约为 11 小时 15 分钟，且 3 个轨道面内的所有卫星都在同一条多圈衔接的星下点轨迹上按照顺序运行。系统根据载波频率来区分不同卫星，这与 GPS 根据调制码来区分卫星不同。每颗 GLONASS 卫星发播的两种载波的频率分别为 $L1 = 1602 + 0.5625k$ (MHz) 和 $L2 = 1246 + 0.4375k$ (MHz)，其中 $k = 1 \sim 24$ 为每颗卫星的频率编号。

第一颗 GLONASS 卫星于 1982 年 10 月 12 日发射升空。由于前苏联的解体和俄罗斯经济不景气，GLONASS 系统发展缓慢，卫星缺乏维护，且早期卫星寿命太短，导致一定时期内在轨卫星太少，很难单独完成定位导航任务。为进一步提高 GLONASS 系统的定位能力，俄罗斯决定对 GLONASS 系统进行现代化升级，包括卫星现代化、地面控制区段现代化以及开展国际间合作。2003 年 12 月 10 日，第一颗 GLONASS-M 卫星入轨运行，并于 2004 年 12 月 8 日开始向广大用户发送导航定位信号，这标志着 GLONASS 向现代化迈出了坚实的第一步。在 2005 年后，GLONASS 卫星开始加载 L3 载波频段，实现系统的高精度定位功能，2010 年发射利用 CDMA (Code Division Multiple Access) 编码的 GLONASS-K 卫星，实现与 GPS/Galileo 在 L1 频点上的兼容与互用。目前，俄罗斯建设的 GLONASS 系统正处在逐步恢复阶段。截至 2014 年 1 月，GLONASS 已实现 24 颗在轨卫星同时运行。截至 2016 年 6 月，GLONASS 共有 27 颗在轨卫星同时运行。其现代化计划预计在 2017 年完成。届时，其星座卫星数量将达到 30 颗。GLONASS 的星座结构、信号构成和定位原理与 GPS 有很大的相似性。二者的区别是：在卫星信号结构上，GPS 采用码分多址技术 (CDMA)，而 GLONASS 采用的是频分多址技术 (Frequency Division Multiple Access, FDMA)；在时间基准和坐标基准上，GPS 采用的是 UTC (USNO) 时间基准和 WGS-84 坐标基准，GLONASS 采用的是 UTC (SU) 时间基准和 PZ-90 坐标基准。

1.2.3 Galileo

2002 年 3 月 26 日，欧盟十五国交通部长会议一致决定正式启动 Galileo 卫星导航系统计划。Galileo 系统是由欧洲空间局和欧洲联盟共同发起建设的一项空间信息基础设施，它是第一个由非军方投资建设、非军事国际组织控制、主要为民间用户服务的新一代 GNSS。2005 年底，第一颗 Galileo 卫星发射升空。它的发展对世界卫星导航技术、市场，甚至世界政治格局都将产生深远的影响。

Galileo 系统主要包括 3 个部分：卫星星座、地面监控以及用户接收机部分，由 30 颗卫星组成，卫星轨道分布在高度约为 $2.36 \times 10^4 \text{km}$ 、倾角 56° 、相互间隔 120° 的 3 个倾斜轨道面上，每个轨道面上包括 9 颗工作卫星和 1 颗在轨备份卫星。Galileo 系统发射四个频率的信号，分别是 E5a、E5b、E6 和 L1。四个频率分别为：1176.45MHz、1207.14MHz、1278.75MHz 和 1575.42MHz。同时，Galileo 卫星还会发射由 E5a 和 E5b 生成的一个复合信号 E5a+b，称为 E5a+b，其波长比 E5a 或 E5b 更长，噪声更小，调制方式为 Alt-BOC (15, 10)。目前 Galileo 卫星的观测值类型与 GPS 观测值类型类似，分为伪距观测值、相位观测值、多普勒观测值以及信噪比。

Galileo 系统在设计上吸收了 GPS 的经验，并以 GPS 和 GLONASS 系统为仿真对象进行了深入的论证，因此它的起点更高，能为各类导航定位用户提供更加多功能和更高精度定位服务。然而，Galileo 系统推行得比较缓慢。截至 2016 年 6 月，Galileo 卫星导航系统已有 12 颗在轨卫星。

1.2.4 北斗卫星导航系统

北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 是中国自行研制的全天时、全天候提供卫星导航定位信息的导航定位系统。导航定位原理和 GPS 相同。其目标是建成独立自主、开放兼容、技术先进、稳定可靠的覆盖全球的卫星导航系统，促进卫星导航产业链形成，形成完善的国家卫星导航应用产业支撑、推广和保障体系，推动卫星导航在国民经济社会各行业的广泛应用。其发展战略分为三个阶段：第一阶段，2000 年，初步建成北斗卫星导航试验系统；第二阶段，2012 年，北斗卫星导航（区域）系统将为中国及周边地区提供服务（发射 14 颗组网卫星）；第三阶段，2020 年，全面建成北斗卫星导航系统。各阶段性能参数见表 1-1。

表 1-1 北斗各阶段性能参数

性能指标	第一阶段	第二阶段	第三阶段
服务区域	中国及周边地区	中国及周边地区	全球
定位精度	优于 20m	平面 10m，高程 10m	优于 10m（三维）
测速精度	—	优于 0.2m/s	优于 0.2m/s
授时精度	单向 100ns，双向 20ns	单向 50ns	20ns

数据来源：CSNO (China Satellite Navigation Office)，2012b

北斗卫星导航系统由空间段、地面段和用户段三部分组成。空间段包括 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星，地面段包括主控站、注入站和监测站等若干个地面站，用户段包括北斗用户终端以及与其他卫星导航系统兼容的终端。BDS 将发射 4 个频率的信号：1561MHz、1589MHz、1268MHz 及 1207MHz (E5b)。已经发射的 3 频信号为：B1 (1561.098MHz)、B2 (1207.14MHz) 和 B3 (1268.52MHz)。此外，还将发射中心频点分别为 1575.42MHz 和 1191.795MHz，码速率分别为 1.023cps、10.23cps 两种公开服务信号。

2000 年 10 月 31 日、12 月 21 日和 2003 年 5 月 25 日，我国先后在西昌卫星发射中心成功发射了 3 颗北斗导航试验卫星，建立了具有区域性卫星导航系统。其中北斗 1 号卫星及北斗 2 号卫星分别在 140°E 和 80°E 轨位上定点运行，北斗 3 号卫星作为备份星在 110.5°E 轨位上服役。

2006 年，中国政府宣布，在北斗卫星导航试验系统的基础上，开始建设拥有自主知识产权的全球导航卫星系统——北斗卫星导航系统。北斗卫星导航系统以应用推广和产业发展为目标，其建设原则：开放性、自主性、兼容性、渐进性。

正在建设的北斗二代卫星导航系统空间段由 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星组成，提供两种服务方式，即开放服务和授权服务。开放服务是向全球免费提供定位、测速和授时服务，定位精度 10m，测速精度 0.2m/s，授时精度 10ns。授权服务是向有高精度、高可靠卫星导航需求的用户，提供定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。中国从 2007 年初至 2012 年末累计已成功发射多颗北斗导航卫星，现已按计划转入正常工作模式，并已开通导航信号。

2011 年 12 月 27 日，北斗卫星导航系统向中国及周边地区提供连续的导航定位和授时服务；2012 年 12 月 27 日，北斗卫星导航系统正式为亚太地区提供导航定位服务。截至 2016 年 12 月，北斗卫星导航系统已有 23 颗在轨卫星（其发射记录见表 1-2），初步具备区域导航定位能力。今后随着北斗卫星系统的不断建设，将会有更多的卫星发射运行。2014—2020 年间，北斗卫星导航系统在区域导航系统 14 颗卫星基础上，继续增加卫星并将服务由区域拓展至全球（30 颗非 GEO，5 颗 GEO），其设计性能与俄罗斯的 GLONASS 及第三代 GPS 性能相当（杨元喜，2010）。

表 1-2

北斗卫星发射记录

卫星	发射日期	运载火箭	卫星类型
第 1 颗北斗导航试验卫星	2000. 10. 31	CZ-3A	GEO
第 2 颗北斗导航试验卫星	2000. 12. 21	CZ-3A	GEO
第 3 颗北斗导航试验卫星	2003. 05. 25	CZ-3A	GEO
第 4 颗北斗导航试验卫星	2007. 02. 03	CZ-3A	GEO
第 1 颗北斗导航卫星	2007. 04. 14	CZ-3A	MEO
第 2 颗北斗导航卫星	2009. 04. 15	CZ-3C	GEO