



中国电建
POWERCHINA

西北勘测设计研究院有限公司
NORTHWEST ENGINEERING CORPORATION LIMITED

技术专著系列

Technology and Application of The GNSS Engineering Control Survey

GNSS

工程控制测量技术 与应用

李祖锋 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



西北勘测设计研究院有限公司
NORTHWEST ENGINEERING CORPORATION LIMITED

GNSS

工程控制测量技术 与应用



李祖锋 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书围绕 GNSS 工程控制测量技术与应用这一主题,系统总结了国内外有关 GNSS 工程控制测量技术设计、测量实施及数据处理研究成果,其中也包括了作者在工程实践中的研究成果和经验总结,全书体现了密切结合工程实际兼具鲜明的应用性特点。全书共分 11 个章节,内容涉及 GNSS 基本测量原理、GNSS 工程控制测量技术设计、GNSS 测量误差、工程测量坐标系建立关键技术、基线解算、网平差与联合平差、GNSS 高程测量、GNSS 变形监测、RTK 控制测量等方面。

本书既可作为工程测量技术人员的参考用书,亦可供从事 GNSS 工程技术研究、测绘生产的科技人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

GNSS工程控制测量技术与应用 / 李祖锋编著. — 北京:中国水利水电出版社,2017.12
ISBN 978-7-5170-6223-3

I. ①G… II. ①李… III. ①卫星导航—全球定位系统—应用—工程测量—控制测量—研究 IV. ①TB22

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第325437号

书 名	GNSS 工程控制测量技术与应用 GNSS GONGCHENG KONGZHI CELIANG JISHU YU YINGYONG
作 者	李祖锋 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 23.25印张 551千字
版 次	2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	98.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

FOREWORD

随着我国经济社会的快速发展和综合国力日益增强,以白鹤滩水电站、港珠澳大桥、FAST(500m口径球面射电望远镜)等为代表的国内各种大型和特种精密工程建设如火如荼,工程难度与复杂程度不断创新高,对工程测量精度和效率提出了越来越高的要求,特别是一些位于高山峡谷和重植被覆盖地区的在建或待开发工程项目,给GNSS工程控制测量工作带来了较大挑战。为推动GNSS技术在工程控制测量中的应用,作者在国内外同行相关研究成果的基础上,结合多年工程实践经验和自身研究成果,对其进行系统梳理,编写完成了这本理论与实践并重的GNSS工程控制测量技术专著。

本书内容侧重于测量技术的具体应用,力求对工程控制测量实施过程中的一些关键技术问题进行系统梳理。全书共分11章:第1章GNSS定位基本原理,主要介绍了GNSS定位基本原理、工程应用中的优势与前景;第2章GNSS工程控制测量技术设计,主要介绍了工程控制测量技术设计、控制网优化设计、控制网精度设计与控制网精度估算;第3章GNSS控制网星历预报与测前规划,主要介绍了基于可见卫星及同步基线的星历预报、基线精度评估与观测调度;第4章GNSS测量误差分析,主要介绍了钟差、轨道误差、观测值系统误差、多路径和衍射等误差影响与对策;第5章工程测量坐标系建立,主要介绍了测绘基准和常用坐标系、工程参考椭球参数确定、坐标系统转换、工程测量坐标系建立关键技术;第6章工程测量控制网投影,主要介绍了工程测量常用投影方法、基于权重的工程投影面选择、减小高斯投影变形方法及最优投影参数确定方法;第7章GNSS工程测量控制网基线解算,主要介绍了IGS服务与精密星历、基线解算与基线网平差、高精度基线解算与质量控制;第8章GNSS工程测量控制网平差,主要介绍了GNSS网平差基本原理、起算数据检验及平差约束误差对精度的影响、基于IGS站CGCS2000坐标系成果获取、工程测量控制网平差、联合平差方法;第9章GNSS工程控制网高程测量,主要介绍了GNSS高程测量原理、高程拟合、GNSS跨河高程测量;第10章GNSS变形监测技术,主要介绍了GNSS变形监测特点及主

要监测模式、变形监测控制网技术设计、峡谷地区 GNSS 变形监测实施要点、自动化监测系统；第 11 章 GNSS RTK 工程控制测量技术，主要介绍了 RTK 控制测量技术、误差影响与对策、定位精度的检测与分析、RTK 测量代替等级控制测量的验证及评估。

大鹏之动，非一羽之轻；骐骥之速，非一足之力。在此，衷心感谢长安大学黄观文老师、西安科技大学赵庆志老师、信息工程大学李健老师、北京大学史振伟博士、西北院巨广宏博士、甘肃农业大学赵彦华博士对本书得以付梓提供的真诚帮助，还要特别感谢缪志选、尹业彪、吕宝雄、王明、倪志鹏等同仁在成果研究、整理过程中给予的大力支持。

囿于作者自身能力和水平，书中错误与疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

2017 年 11 月 15 日

目录

CONTENTS

前言

第1章 GNSS 定位基本原理 1

1.1 全球卫星导航系统 (GNSS)	1
1.2 GNSS 发展现状	1
1.2.1 GPS	1
1.2.2 GLONASS	2
1.2.3 BDS	2
1.2.4 GALILEO	3
1.2.5 其他区域卫星导航系统及星基增强系统	3
1.3 GNSS 定位基本原理	4
1.3.1 接收机观测量	4
1.3.2 载波相位定位模型	4
1.4 GNSS 主要定位模式	11
1.4.1 单点定位、精密单点定位	11
1.4.2 相对定位	11
1.4.3 差分定位	14
1.5 GNSS 工程测量应用优势与前景	14
1.5.1 GNSS 定位技术应用优势	14
1.5.2 GNSS 定位技术应用前景	15

第2章 GNSS 工程控制测量技术设计 16

2.1 控制测量技术设计	16
2.1.1 设计原则	16
2.1.2 基准设计	16
2.1.3 外业观测及数据处理	17

2.2	控制网优化设计	17
2.2.1	优化设计内容	17
2.2.2	优化设计的质量准则	18
2.2.3	分级优化设计	23
2.3	控制网精度确定原则	27
2.3.1	精度设计依据	27
2.3.2	放样误差分析及精度指标确定	27
2.4	控制网精度估算	28
2.4.1	基线向量的方差阵估算方法	28
2.4.2	精度估算	32
2.4.3	方向中误差估算	33
2.5	洞外 GNSS 控制测量对隧洞贯通的误差影响	35
2.5.1	贯通误差的定义	35
2.5.2	贯通误差的允许值	36
2.5.3	洞外 GNSS 控制测量对隧洞贯通的误差影响	36
2.6	工程控制网技术设计实践	38
2.6.1	项目概况	38
2.6.2	网形设计	38
2.6.3	技术设计要点	39
2.6.4	控制网优化设计	40
2.6.5	控制网精度评估	41

第 3 章 GNSS 控制网星历预报与测前规划 44

3.1	星历预报与观测调度	44
3.1.1	背景与主要思路	44
3.1.2	基于可见卫星及同步观测基线的星历预报	45
3.1.3	基线精度评估及观测调度	61
3.2	测前规划评估案例	69

第 4 章 GNSS 测量误差分析 73

4.1	测量主要误差分类	73
4.2	钟差、轨道误差及地球潮汐影响分析与处理	74
4.2.1	钟差	74
4.2.2	卫星轨道（星历）误差	75
4.2.3	地球潮汐影响	76

4.3	观测值系统误差分析与处理	77
4.3.1	电离层延迟	77
4.3.2	对流层延迟	79
4.3.3	天线相位中心偏差	81
4.4	多路径和衍射影响分析与处理	90
4.4.1	多路径和衍射影响分析	90
4.4.2	多路径和衍射影响对策	92

第5章 工程测量坐标系建立 94

5.1	测绘基准和常用坐标系	94
5.1.1	测绘基准	94
5.1.2	大地测量坐标系统	96
5.1.3	平面直角坐标系统	97
5.1.4	高程系统	98
5.1.5	重力测量系统	98
5.2	工程参考椭球参数确定	99
5.2.1	工程参考椭球确定的必要性	99
5.2.2	一种新的工程参考椭球确定方法	100
5.2.3	基于尺度比关系的椭球参数确定	108
5.2.4	案例分析	110
5.2.5	工程参考椭球参数确定小结	117
5.3	坐标系统转换	117
5.3.1	坐标系统之间的转换	117
5.3.2	坐标基准变换	119
5.4	工程测量坐标系建立关键技术	122
5.4.1	工程分类及特点	122
5.4.2	工程测量坐标系作用及要求	123
5.4.3	工程测量坐标系建立关键技术	123

第6章 工程测量控制网投影 126

6.1	工程测量投影与分类	126
6.2	常用投影方法	127
6.2.1	高斯投影	127
6.2.2	墨卡托投影	131
6.2.3	高斯投影与 UTM 投影关系	132

6.2.4	兰勃特投影	133
6.2.5	斜轴等角切圆柱投影简述	136
6.2.6	常用投影模型投影变形特征分析	136
6.3	加权工程投影面选择	138
6.3.1	桥梁工程投影面选择	138
6.3.2	水电站工程投影面选择	141
6.4	工程独立平面坐标系建立	142
6.4.1	工程独立坐标系建立的目的	142
6.4.2	工程独立坐标系建立思路	142
6.4.3	基于新大地坐标系的特殊投影	143
6.5	减小高斯投影变形基本方法	143
6.5.1	抵偿投影面高斯正形投影	143
6.5.2	任意带高斯正形投影	144
6.5.3	变换尺度	144
6.5.4	投影面转换方法	145
6.6	工程最优高斯正形投影参数确定	146
6.6.1	抵偿投影面的确定	146
6.6.2	选定轴线投影变形最小抵偿投影面的确定	147
6.6.3	投影变形平方和最小确定抵偿投影面	149
6.6.4	最大投影变形最小确定抵偿投影面	151
6.7	最优任意带高斯正形投影参数确定	152
6.7.1	轴线投影变形最小投影参数确定	152
6.7.2	综合投影变形最小投影参数确定	155
6.7.3	最大投影变形最小投影参数确定	158
6.8	基于尺度比的工程投影面确定	161
6.9	投影参数最大可适用范围确定	161
6.10	组合投影	162

第7章 | GNSS 工程测量控制网基线解算

7.1	观测文件及广播星历	164
7.1.1	观测数据文件及其质量检查	164
7.1.2	导航电文文件	168
7.2	IGS 服务与精密星历	168
7.2.1	精密星历	168
7.2.2	国际 IGS 服务	169
7.2.3	网外 IGS 辅助站数量的选择及结果分析	170

7.3	基线解算及网平差	174
7.3.1	单基线解和多基线组合解	174
7.3.2	GNSS 基线解算的数学模型	174
7.3.3	多星系统联合处理基线的数学模型	177
7.3.4	基线解质量检核	178
7.3.5	基线网最小二乘平差概述	178
7.3.6	基线解算的主要过程	179
7.4	基于 GAMIT/GLOBK 的高精度基线解算	180
7.4.1	数据准备	181
7.4.2	GAMIT 分步运行	185
7.4.3	观测时段长短对基线解算结果影响	187
7.4.4	GLOBK 平差	188
7.4.5	GAMIT 与 TBC 解算结果简要分析	188
7.5	GNSS 高精度基线解算类型及系统性误差处理	189
7.5.1	基线解算类型	189
7.5.2	基线向量解算的系统性误差	189
7.6	不同处理策略短基线解算结果分析	190
7.6.1	常用不同解算类型策略及精度评估	190
7.6.2	高山峡谷地区基线处理	193
7.6.3	IGS 不同类型星历对工程控制网影响	196
7.6.4	不同来源星历对 CORS 站级别数据处理精度影响分析	198
7.7	观测时长与截止高度角对定位精度的影响	202
7.7.1	不同观测时长对定位精度的影响	202
7.7.2	截止高度角与定位精度之间的关系	208
7.8	基线解算质量控制指标	211
7.8.1	数据剔除率	212
7.8.2	RATIO 值	212
7.8.3	RMS 值	212
7.8.4	无约束平差点位精度	212
7.8.5	基线较差及基线重复性	212
7.8.6	同步环闭合差	213
7.8.7	异步环闭合差	213

第 8 章 GNSS 工程测量控制网平差

8.1	GNSS 网平差分类及平差基本流程	214
8.1.1	GNSS 网平差分类	214

8.1.2	GNSS网平差流程	214
8.2	GNSS网平差基本原理	215
8.2.1	基线向量提取与组网	216
8.2.2	三维无约束平差	216
8.2.3	三维约束平差	218
8.2.4	二维约束平差与联合平差	219
8.3	控制网起算数据检验及平差约束误差对精度的影响	220
8.3.1	GNSS网平差中起算数据的检验	220
8.3.2	平差约束误差对控制网精度的影响及处理方法	220
8.4	基于IGS站获取CGCS2000坐标成果的探讨	226
8.4.1	CGCS2000国家大地坐标的计算方法	226
8.4.2	CGCS2000坐标获取结果对比	228
8.5	GNSS高精度测量控制网测量案例	229
8.5.1	控制网技术设计	229
8.5.2	测量控制网精度评估	231
8.5.3	基线解算及网平差方案	231
8.5.4	数据采集、基线解算及控制网平差案例分析	232
8.6	联合平差综述	247
8.6.1	多种方法联合测量作业的现实需求	247
8.6.2	联合平差中需要进一步解决的问题	248
8.7	GNSS网与边角网联合平差尺度一致性归算	248
8.7.1	尺度比加权计算方法	248
8.7.2	GNSS与精密测距边长尺度比差异抗差估计	253
8.8	GNSS观测值和地面数据的联合平差模型	259
8.8.1	联合平差公共坐标系	259
8.8.2	观测量的表示	259
8.8.3	三维坐标系中GNSS基线与测距边长联合平差模型	262
8.8.4	GNSS基线向量与边角网的二维联合平差模型	266
8.8.5	基于序贯平差的联合平差方法	272

第9章 GNSS工程控制网高程测量 278

9.1	GNSS高程测量原理	278
9.1.1	高程表示方式	278
9.1.2	GNSS高程转换	279
9.2	基于重力场模型拟合残差的高程拟合	281
9.2.1	重力测量方法	281

9.2.2	数学模型拟合方法	282
9.3	基于高阶次重力场模型的高程拟合实现	286
9.3.1	数据输入	286
9.3.2	参数确定及高程拟合计算	286
9.3.3	高程拟合及精度评定	287
9.3.4	结果文件	288
9.3.5	文件格式	289
9.4	高程拟合案例	290
9.4.1	平原及丘陵地区的高程拟合案例分析	290
9.4.2	高山地区高程拟合案例分析	294
9.5	基于工程区域椭球模型的高程拟合方法	298
9.5.1	拟合原理	298
9.5.2	椭球参数解算	298
9.5.3	新椭球参数下重力场模型的利用	301
9.6	GNSS 跨河高程测量	302
9.6.1	GNSS 跨河高程测量计算思路	302
9.6.2	GNSS 跨河高程传递场地布置与观测	303
9.6.3	GNSS 跨河正常高高差未知参数计算	305
9.7	高程网联合平差	307

第 10 章 GNSS 变形监测技术 309

10.1	GNSS 变形监测特点及主要监测模式	309
10.1.1	常用表面变形监测方法及 GNSS 变形监测特点	309
10.1.2	GNSS 地表变形监测主要模式	310
10.2	变形监测控制网技术设计	310
10.2.1	监测网优化设计	310
10.2.2	工作基准网的设计	311
10.2.3	峡谷地区 GNSS 监测计划制定	313
10.3	GNSS 监测实施要点与数据处理	314
10.3.1	GNSS 监测网观测纲要	314
10.3.2	GNSS 监测网的数据处理	315
10.3.3	监测项目无整周问题的基线解算方法	316
10.3.4	峡谷地区数据处理措施简述	319
10.4	GNSS 自动化监测系统	322
10.4.1	传感器子系统	323
10.4.2	数据传输（通信）子系统	324

10.4.3	数据处理与控制子系统	324
10.4.4	自动化监测案例	325

第 11 章 GNSS RTK 工程控制测量技术 328

11.1	GNSS RTK 控制测量技术	328
11.1.1	GNSS RTK 定位及其特点	328
11.1.2	GNSS RTK 控制测量基本技术要求	328
11.1.3	GNSS RTK 参数解算	329
11.2	GNSS RTK 控制测量误差	329
11.2.1	GNSS RTK 误差分析	329
11.2.2	常见误差解决方案	330
11.2.3	参数转换误差	335
11.2.4	观测方案等主观因素影响	336
11.2.5	网络 RTK 误差分析	336
11.3	RTK 定位精度的检测与分析	337
11.3.1	GNSS RTK 定位精度检测	337
11.3.2	网络 RTK 定位精度分析方法	337
11.3.3	多系统定位精度评定	343
11.4	RTK 测量问题应对措施与测量校正模式	345
11.4.1	网络 RTK 无固定解应对措施	345
11.4.2	GNSS RTK 测量校正模式探讨	347
11.5	GNSS RTK 测量代替等级控制测量的验证及评估	350
	参考文献	353

第 1 章 GNSS 定位基本原理

1.1 全球卫星导航系统 (GNSS)

全球卫星导航系统, 简称 GNSS (Global Navigation Satellite System), 泛指导航定位系统、组合系统以及区域增强系统。目前利用的导航系统有 GPS (美国)、GLONASS (俄罗斯)、GALILEO (欧洲)、BDS (中国), 以及美国的 WAAS (广域增强系统)、欧洲的 EGNOS (欧洲静地导航重叠系统) 和日本的 MSAS (多功能运输卫星增强系统) 等卫星导航系统中的一个或多个系统进行导航定位, 并同时提供卫星的完备性检验信息 (Integrity Checking) 和足够的导航安全性告警信息。现在密布在太空的全球卫星定位系统将形成美、俄、中、欧的 GPS、GLONASS、BDS、GALILEO 四大系统“竞风流”的局面。

卫星导航系统从最初单系统 (GPS) 发展到现今的多系统并存融合 (GNSS), 其技术已发生了前所未有的大转变。GPS 到 GNSS 的发展和转变使卫星导航体系全球化和多样化; 从以卫星定位、导航授时 (Positioning, Navigation and Timing, PNT) 应用为主体转变为定位、导航、授时、大气探测以及移动通信和互联网等信息载体融合的新阶段, 使信息融合化和一体化。GNSS 给测绘行业带来了前所未有的技术革命, 可以说整个测绘行业已高度依赖 GNSS 技术。

1.2 GNSS 发展现状

1.2.1 GPS

GPS (Global Positioning System, 全球定位系统) 是目前应用最为广泛、成熟的导航系统, 该系统是美国的第二代卫星导航系统。系统由空间部分、地面监控部分和用户接收机三大部分组成。全球定位系统的空间部分使用 24 颗高度约 2.02×10^4 km 的卫星组成星座。21+3 颗卫星均为近圆形轨道, 运行周期约为 11 小时 58 分, 分布在六个轨道面上 (每轨道面 4 颗), 轨道倾角为 55° 。卫星的分布使得在全球的任何地方 (不考虑当地山体、楼群及植被等条件遮挡)、任何时间都可观测到 4 颗以上的卫星, 并能保持良好定位解算精度的几何图形 (DOP), 这就提供了在时间上连续的全球导航能力。GPS 坐标系统为世界大地坐标系 WGS-84 系统, 时间系统为 GPS 时 (1980 年 1 月 6 日 UTC 的 0 时)。

地面监控部分包括 4 个监控站、1 个上行注入站和 1 个主控站, 其他卫星导航系统构

成与此类似。监控站设有 GPS 用户接收机、原子钟、收集当地气象数据的传感器和进行数据初步处理的计算机。监控站的主要任务是取得卫星观测数据并将这些数据传送至主控站。主控站设在范登堡空军基地，对地面监控站实行全面控制。主控站主要任务是收集各监控站对 GPS 卫星的全部观测数据，利用这些数据计算每颗 GPS 卫星的轨道和卫星钟改正值。上行注入站也设在范登堡空军基地，主要是在每颗卫星运行至上空时把这类导航数据及主控站的指令注入卫星。这种注入对每颗 GPS 卫星每天进行一次，并在卫星离开注入站作用范围之前进行最后的注入。其他导航系统都采用了与 GPS 类似的地面控制机制。

美国东部时间 2015 年 3 月 25 日下午 2:36，ULA (United Launch Alliance, 美国联合发射联盟) 的德尔塔 IV 型火箭将美国空军的最新一颗全球定位系统卫星 GPS II F-9 送入了预定轨道。GPS II F-9 卫星是波音公司研发 Block II F 批次计划 12 颗卫星中的第 9 颗，截至 2016 年 2 月，12 颗卫星已全部发射升空。GPS 现代化实现后，将在很大程度上提高 GPS 系统的安全性、连续性、可靠性和测量精度。

GPS 是最早在工程测量中成功应用的导航系统，截至 2016 年 11 月，其所获取精度和可靠性总体优于其他系统，更适用于开展精密工程测量。工程应用实践已经证明，在观测条件理想的情况下，GPS 相对定位精度在 50km 以内可达 10^{-6} m，100~500km 可达 10^{-7} m，1000km 可达 10^{-9} m。在 300~1500m 工程精密定位中，在较理想的观测环境下，1h 以上观测时解其平面位置误差小于 1mm，与 ME-5000 电磁波测距仪测定的边长比较，其边长较差最大为 0.5mm，较差中误差为 ± 0.3 mm。

1.2.2 GLONASS

GLONASS (格洛纳斯卫星导航系统) 项目是苏联在 1976 年启动的项目，于 2011 年 1 月 1 日在全球正式运行。根据俄罗斯联邦太空署信息中心提供的数据 (2012 年 10 月 10 日)，目前有 24 颗卫星正常工作、3 颗维修中、3 颗备用、1 颗测试中。GLONASS 作用类似于美国的 GPS、欧洲的 GALILEO 和中国的 BDS。相对于 GPS，俄罗斯的 GLONASS 采用了军民合用、不加密的开放政策。

GLONASS 在控制段、空间段和信号结构上，都不同于 GPS。一是卫星发射频率不同。GPS 的卫星信号采用码分多址体制，每颗卫星的信号频率和调制方式相同，不同卫星的信号靠不同的伪码区分。而 GLONASS 采用频分多址体制，卫星靠频率不同来区分，每组频率的伪随机码相同。由于卫星发射的载波频率不同，GLONASS 可以防止整个卫星导航系统同时被敌方干扰，因而，具有更强的抗干扰能力。二是坐标系不同。GPS 使用世界大地坐标系 (WGS-84)，而 GLONASS 使用前苏联地心坐标系 (PE-90)。三是时间标准不同。GPS 系统时与世界协调时相关联，而 GLONASS 则与莫斯科标准时相关联。

1.2.3 BDS

中国北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 是中国自行研制的全球卫星导航系统，也是继美国全球定位系统 (GPS)、俄罗斯格洛纳斯卫星导航系统 (GLONASS) 之后第三个成熟的卫星导航系统。在 2014 年 11 月 17—21 日的会议上，联

联合国负责制定国际海运标准的国际海事组织海上安全委员会，正式将中国的 BDS 纳入全球无线电导航系统。2015 年 3 月 30 日 21 时 52 分，中国首颗新一代北斗导航卫星在西昌卫星发射中心成功发射，自此该系统建设迈出了由区域运行向全球拓展的第一步，到 2018 年年底，我国将发射 18 颗北斗三号卫星，完成基本星网建设，到 2020 年年底，将完成 30 颗北斗三号卫星的全球组网建设，形成全球覆盖能力。

北斗卫星导航系统空间部分计划由 35 颗卫星组成，包括 5 颗静止轨道卫星、27 颗中地球轨道卫星、3 颗倾斜同步轨道卫星。5 颗静止轨道卫星定点位置为东经 58.75°、80°、110.5°、140°、160°，中地球轨道卫星运行在 3 个轨道面上，轨道面之间为相隔 120° 均匀分布。

BDS 采用的是 CGCS2000 国家大地坐标系，属于地心大地坐标系统，该系统以 ITRF 97 参考框架为基准，参考框架历元为 2000.0。BDS 的系统时间称北斗时 (BDT)，属原子时，起算历元时间是 2006 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒 (UTC，协调世界时)。

1.2.4 GALILEO

GALILEO (伽利略卫星导航系统) 计划是欧洲的全球导航服务计划。早在 20 世纪 90 年代中期开始，欧盟为了打破美国在卫星定位、导航、授时市场中的垄断地位，获取巨大的市场利益，增加欧洲人的就业机会，长期以来致力于一个雄心勃勃的民用全球导航卫星系统计划，即正在建设中的 GALILEO 计划。

该计划于 1999 年 2 月由欧盟公布，欧洲委员会和欧空局共同负责。系统计划由轨道高度为 23616km 的 30 颗卫星组成，其中 27 颗工作星，3 颗备份星。卫星轨道高度约 1.4×10^4 km，位于 3 个倾角为 56° 的轨道平面内。2002 年 3 月，正式启动了 GALILEO 计划。2005 年 12 月 27 日发射了第一颗 GALILEO 演示卫星。它是世界上第一个专门为民用目的设计的全球性卫星导航定位系统，与现在普遍使用的 GPS 相比，它将更先进、有效、可靠。它的总体思路具有四大特点：①自成独立体系；②能与其他 GNSS 系统兼容互动；③具备先进性和竞争能力；④公开进行国际合作。截至 2016 年 12 月，已经发射了 18 颗工作卫星，具备了早期操作能力 (EOC)，并计划在 2019 年具备完全操作能力 (FOC)。全部 30 颗卫星 (调整为 24 颗工作卫星，6 颗备份卫星) 计划于 2020 年发射完毕。

GALILEO 系统所采用的坐标系统是基于 GALILEO 地球参考框架 (GTRF) 的 ITRF-96 大地坐标系，其几何定义为：原点位于地球质心，Z 轴指向 IERS (International Earth Rotation Service) 推荐的协议地球原点 (CTP) 方向，X 轴指向地球赤道与 BIH 定义的本初子午线交点，Y 轴满足右手坐标系。时间系统采用伽利略时间系统。

1.2.5 其他区域卫星导航系统及星基增强系统

除了前面所讲的四大系统外，GNSS 还包括了区域卫星导航系统以及区域星基增强系统，目前在运行的区域卫星导航系统有日本的“准天顶”卫星系统 (QZSS)、印度区域导航卫星系统 (IRNSS) 等，星基增强系统包括欧空局接收卫星导航系统 (EGNOS)、美国的 DGPS (Differential GPS)、日本的多功能卫星增强系统 (MSAS)、印度的 GPS 辅助型

静地轨道增强导航 (GAGAN) 等。

1.3 GNSS 定位基本原理

1.3.1 接收机观测量

GNSS 测量技术一般包括以下三类：伪距测量技术、载波相位测量技术和多普勒测量技术。对应的 GNSS 基本观测量包括码伪距观测量、载波相位观测量和多普勒频移观测量。

1.3.1.1 伪距观测量

如果假定卫星时钟和接收机时钟没有任何误差，都同步于导航系统时间。设在某卫星开始发射 L1 信号（调制有 C/A 码和导航电文）时，接收机也同时开始生成对应于该卫星的 C/A 码，当调制在卫星 L1 载波上的 C/A 码经过空间传播到达接收机时，其码相位滞后于接收机产生的本地 C/A 码的码相位，两者的时间差 Δt （信号传播时间）乘以光速即为接收机至卫星的距离。实际上，接收机的时钟是石英钟，不可能与导航卫星时间保持严格同步， Δt 因此含有偏差（称为接收机钟差），另外信号在空间的传播过程中也受到电离层和对流层的影响，因而称为伪距。GPS 伪距的测量精度与接收机有关，一般情况下为码元长度的 1%，因而 C/A 码伪距测量精度为 2.93m，P 码伪距测量精度为 0.293m。采用窄相关技术进行伪距测量，其精度为码元长度的 1‰，伪距测量精度提高一个数量级，分别为 0.293m(C/A) 和 0.0293m(P)。对于采用窄相关技术的接收机，大气及多路径差项的影响成为超过测量噪声的主要因素。

1.3.1.2 载波相位观测量

载波相位观测量是测定接收机所接收的卫星载波信号与接收机振荡器产生的参考载波信号之间的相位差。载波相位观测量理论上是卫星信号在接收时刻的瞬时载波相位值。但实际上是无法直接测量出任何信号的瞬时载波相位值，测量接收到的是具有多普勒频移的载波信号与接收机产生的参考载波信号之间的相位差。卫星信号被接收机接收后，首先进行伪随机码的延时锁定，即实现对卫星信号的跟踪。一旦跟踪成功，接收机的本地伪随机码就与卫星的伪随机码严格对齐，给出伪距观测量。之后利用锁相环实现相位的锁定，锁相后接收机本地信号相位与 GNSS 载波信号相位相同，此时接收机本地信号相位与初始相位的差即为载波相位观测量。

1.3.1.3 多普勒频移

由于卫星和接收机之间的相对运动，造成接收到的载波频率发生变化，称为多普勒频移，多普勒频移反映了卫星和接收机的相对运动速度，卫星的速度是已知的，再利用多普勒频移观测量可以求得接收机的瞬时运动速度。

1.3.2 载波相位定位模型

在高精度 GNSS 数据处理中，由接收机所获得的载波相位是用于估计参数的主要观测量。接收机在进行载波相位测量时，首先要对卫星信号进行锁定，然后直接对卫星所发