



国防电子信息技术丛书

Principles of GNSS: GPS, GLONASS, and Galileo

# 全球导航卫星 系统原理

—— GPS、格洛纳斯和伽利略系统

谢 钢 著



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

# 全球导航卫星系统原理

——GPS、格洛纳斯和伽利略系统

Principles of GNSS: GPS, GLONASS, and Galileo

谢 钢 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是全球第一本真正意义上介绍 GNSS 的书籍,描述了以 GPS、格洛纳斯和伽利略这三大系统为主要对象的 GNSS 的概况,详尽探讨了 BPSK-R、BOC、MBOC/TMBOC/CBOC、AltBOC 等多种信号调制技术和 Interplex、CASM 两种复用调制方式,全面剖析了三大系统的卫星信号体制和导航电文,具体给出了三大系统的卫星在它们各自相应时空坐标系中的位置和速度的计算步骤,清晰地解释了伪距、载波相位和多普勒频移等 GNSS 测量值的定义及其各种测量误差源,深刻、透彻地讨论了单一 GNSS、联合 GNSS 和差分 GNSS 的定位算法,介绍了多个可用来定量评估不同卫星调制信号在码跟踪精度、互操作性、抗干扰、抗多径等方面性能的参量和方法,归纳总结了现代化 GNSS 在星座和信号设计方面上所具有的一些优良特性和发展趋势。本书理论分析清晰,实用性强,并且内容力求反映近些年来出现的 GNSS 最新技术与成果。

本书语言平实,表达清晰,内容丰富,信息量巨大,又思想深刻。它不但非常适合作为本科生高年级和研究生的教材或教学参考书,而且是所有与 GNSS/北斗卫星导航系统开发、GNSS/北斗接收机研发和 GNSS/北斗应用等方面有关的工程技术人员和科技工作者都应当配备的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

全球导航卫星系统原理:GPS、格洛纳斯和伽利略系统/谢钢著. —北京:电子工业出版社,2019.3

(国防电子信息技术丛书)

ISBN 978-7-121-36044-2

I. ①全… II. ①谢… III. ①卫星导航—全球定位系统 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 033839 号

策划编辑:谭海平

责任编辑:谭海平 特约编辑:王 崧

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:28.5 字数:670 千字

版 次:2019 年 3 月第 1 版

印 次:2019 年 3 月第 1 次印刷

定 价:89.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254552, tan02@phei.com.cn。

# 前 言

自 2009 年《GPS 原理与接收机设计》一书出版以来,我已经陆续收到了许多读者的来信,他们对该书的内容和质量给予高度的赞赏,并认为从中受益匪浅。承蒙各位读者的厚爱,该书在所有有关 GPS 的畅销书籍中脱颖而出。看到我四年心血之结晶为大家所爱,我深感欣慰,更深受鼓励,谢谢你们!

然而,在赞赏之余,也有不少读者提出,希望在《GPS 原理与接收机设计》的改进版中还能阅读到关于 GPS 现代化信号、BOC 调制和接收机对 BOC 调制信号处理算法等这些体现着当代全球导航卫星系统(GNSS)新气象、新技术方面内容的介绍,而您现在正在翻阅的《全球导航卫星系统原理——GPS、格洛纳斯和伽利略系统》能满足这些读者的一部分要求。如今的 GNSS 不再只是美国的 GPS 或者现代化 GPS 唱独角戏(尽管仍是重头戏),而是一个还主要包括俄罗斯重建后的现代化 GLONASS、欧洲含苞欲放的 Galileo 和我国正昂首阔步向前进的北斗卫星导航系统等在内的一个系统之系统。根据我所掌握的情况,这本书将是全球第一本真正全面、透彻地介绍 GNSS 的书籍。

第 1 章将描述 GNSS 特别是其中的 GPS、GLONASS 和 Galileo 三大系统的概况,让读者对 GNSS 的系统构成、发展状况和工作原理等有一个总体的认识。为了帮助读者判断是否有足够的 GPS 基础知识来理解本书内容,作者的一个建议是试读 1.1 节,如果对这一节特别是其中关于 GNSS 接收机设计的 1.1.4 节的内容不甚了解,对诸如伪码、相关器、码跟踪环、载波跟踪环、数据解调、位同步、帧同步等这些术语基本上不知所云,那么读者应当首先阅读《GPS 原理与接收机设计》等这一类相关书籍,或者至少能在需要时可随手参阅这些书籍。

第 2 章将详尽地探讨 BOC 调制技术,重点是计算 BOC 调制信号的功率谱密度和自相关函数,分析这两个函数波形的特点,定性地指出由此所带来的 BOC 调制信号的优越性能。一方面为了让 BOC 调制技术与传统 GPS/GLONASS 信号所采用的调制技术做比较,另一方面为了准备一些关于数字通信系统信号调制的基础知识,我们在第 2 章将从对较为熟悉的 BPSK 调制的介绍开始。第 3 章将接着探讨其他形式的 BOC 调制,包括 MBOC 调制的 TMBOC 和 CBOC 两种实现方式以及恒包络 AltBOC 调制。此外,第 3 章的最后还将介绍能将多个信号调制到同一个载波上的 Interplex 和 CASM 两种复用调制方式。第 2 章和第 3 章内容的理论性较强,读者需要有一定的数学基础才能理解其中大量的公式推导,而参阅附录 C 至附录 E 也可起到一定的帮助作用。

第 4 章至第 6 章将依次密集地介绍 GPS、GLONASS 和 Galileo 三大系统的所有各个卫星导航信号,包括 GPS 的 L1 C/A、L1/L2 P(Y)、L2C、L1/L2 M、L5C 和 L1C 信号及其 NAV、CNAV 和 CNAV-2 电文, GLONASS 的 C/A 和 P 码信号及其导航电文,以及 Galileo 的 E1-B/C、E6-B/C

和 E5a/b 信号及其 F/NAV 和 I/NAV 电文。不管读者现在对这些术语是否熟悉，可到时一定会十分清晰地理解它们的含义。作者在此想指出这三章内容与作为它们重要参考文献的各个信号界面控制文件（ICD）之间的关系：一方面，几百页完整地介绍若干卫星信号的结构和导航电文的官方 ICD 无可取代，它们对一切有着最后的解释权；另一方面，这三章不但简要地描述了这些信号几乎所有的重要内容和特点，而且还加注了 ICD 所没有的、对它们的诠释和理解。

第 7 章至第 9 章将介绍 GNSS 的测量与定位，这部分知识对 GNSS 接收机的研发有着非常高的实际应用价值。第 7 章将计算 GNSS 卫星在相应 GNSS 时空坐标系中的位置，第 8 章将分析体现着从接收机至各颗可见卫星距离信息的 GNSS 测量值及其误差源，于是第 9 章就可以接着讨论适用于不同情况的单一 GNSS、联合 GNSS 和差分 GNSS 等多种定位算法及其定位精度。为了让这三章的内容具有连贯性和完整性，我们必定不得不重复《GPS 原理与接收机设计》中一些相关章节的部分内容。

第 10 章将首先总结一下联合 GNSS 的优势与挑战，然后介绍一些用来定量评估 GNSS 信号性能的方法，比如通过均方根带宽、等效矩形带宽、谱分离系数、码跟踪谱灵敏度系数、等效载噪比、信干噪比、S 曲线和多径误差包络等参量，来衡量 BPSK 和 BOC 等调制信号的码跟踪精度、互操作性、抗干扰和抗多径等多方面性能，最后归纳现代化 GNSS 所具有的一些优良特性和发展趋势。希望这一章能为我国北斗卫星导航系统今后的建设发展提供他国成功经验和先进设计理念，希望北斗系统继续朝国际先进性、兼容性与互操作性、开放性和独立性的正确方向前进。

通过对大量公开发表的 GNSS 书籍、期刊论文、会议论文、学位论文、专利等文献资料和无数公开的国际互联网网页的研读，作者才把这些知识汇集起来而写成这一专著。因此，本书每章的最后均列出了一些参考文献，以指出相应原文或者相关知识点的参考来源，只是变动性较强的互联网网址不便在此列出。

本书语言平实，表达清晰，内容丰富，信息量巨大，又思想深刻。它不但非常适合作为本科生高年级和研究生的教材或教学参考书，而且是所有与 GNSS/北斗卫星导航系统开发、GNSS/北斗接收机研发和 GNSS/北斗应用等方面有关的工程技术人员和科技工作者都应当配备的参考用书。对于书中提及但未能予以充分展开讨论的许多想法、技术，它们可作为硕士生、博士生的研究课题之用。希望这本书的出版能给我国北斗卫星导航系统的开发与应用事业添砖加瓦，贡献自己的一份力量。

感谢父亲谢逸仙、母亲傅珠珍对我的养育和教导，他们对我勤奋进取的言传身教是我能利用最近四年的空余时间写完这本书的动力源泉。在一字一句写书期间，我也得到了女儿谢海纳、儿子谢天佑和妻子对我的理解与支持。感谢美国加州州立大学的刘教授、绍兴市人力资源和社会保障局的沈龙先生、浙江大学城市学院的谢泽烽先生、温州医科大学的鲍国栋先生，以及潘苏华、刘以鸣、谢荣娟等对文献资料的搜索、获取和对全书文字的通读、校正。电子工业出版社的谭海平先生对该书的进展与出版一直予以了最大的关心、帮助和支持，他对书中的内容安排也提出了

一些宝贵意见，在此深表感谢。我在写书期间还得到了许多同事、亲友和《GPS 原理与接收机设计》读者的支持，在此向他们表示诚挚的谢意！

由于作者水平有限，加之时间仓促，因而书中必定会出现一些不妥和错误，敬请读者不吝指正，电子邮件可发送至 [gang.xie.1999@stanfordalumni.org](mailto:gang.xie.1999@stanfordalumni.org) 与我直接联系。由于读者来信较多，若不能一一回复，敬请原谅。

作者

## 再版感谢

自 2013 年本书出版以来，我已经陆续收到许多读者的来信，他们对本书的内容和质量做了高度的赞赏，并认为从中受益匪浅。承蒙各位读者的厚爱，该书在所有有关 GNSS 的畅销书籍中正脱颖而出。看到我四年心血之结晶为大家所爱，我深感欣慰，更深受鼓励。

正如一个读者来信说，虽然书中错误非常少，但为了使它更加完美，因而在阅读过程中发现的即使一两个小错误都要来信告诉我。我真的很感动！感谢北京微电子技术研究所算法工程师杨霖、西北工业大学自动化学院研究生刘洋和空军工程大学信息与导航学院张博硕士研究生等诸多读者，你们所指出的错误在这次再版中已经得到更正，谢谢你们！

作者

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 GNSS	1
1.1.1 GNSS 的定义	1
1.1.2 GNSS 的系统构成	4
1.1.3 GNSS 定位原理	6
1.1.4 GNSS 接收机设计	8
1.1.5 GNSS 性能指标	12
1.2 GPS	15
1.2.1 GPS 概况	15
1.2.2 GPS 空间星座部分	17
1.2.3 GPS 地面监控部分	22
1.2.4 GPS 服务与限制	23
1.3 GLONASS	24
1.3.1 GLONASS 概况	25
1.3.2 GLONASS 空间星座部分	27
1.3.3 GLONASS 地面监控部分	32
1.3.4 GLONASS 服务	33
1.4 Galileo 系统	34
1.4.1 Galileo 系统概况和系统构成	34
1.4.2 Galileo 系统服务	38
1.5 其他 GNSS 概况	39
1.5.1 我国的北斗卫星导航系统	40
1.5.2 日本准天顶卫星系统	42
1.5.3 印度区域卫星导航系统	43
参考文献	43
第 2 章 BPSK-R 和 BOC 调制	48
2.1 数字通信系统基础	48
2.1.1 扩频调制	48
2.1.2 载波调制	52
2.2 BPSK-R 调制	54
2.2.1 BPSK-R 调制信号的功率谱密度	55
2.2.2 BPSK-R 调制信号的自相关函数	58
2.3 BOC 调制	59

2.3.1	BOC 调制信号模型	59
2.3.2	BOC 调制副载波的频谱	63
2.3.3	BOC 调制信号的功率谱密度	65
2.3.4	BOC 调制信号的自相关函数计算	73
2.3.5	BOC 调制信号的自相关函数特征	82
2.3.6	BOC 调制的优缺点	84
	参考文献	86
<b>第 3 章</b>	<b>MBOC、AltBOC 和复用调制</b>	<b>88</b>
3.1	MBOC 调制	88
3.1.1	MBOC 调制信号的定义	88
3.1.2	TMBOC 调制	91
3.1.3	CBOC 调制	95
3.2	AltBOC 调制	97
3.2.1	单边带副载波	98
3.2.2	非恒包络 AltBOC 调制	100
3.2.3	恒包络 AltBOC 调制	102
3.3	复用调制	107
3.3.1	Interplex 调制	107
3.3.2	CASM	111
	参考文献	113
<b>第 4 章</b>	<b>GPS 信号</b>	<b>116</b>
4.1	概况	117
4.2	L1 C/A 信号	122
4.2.1	C/A 码	123
4.2.2	NAV 电文	125
4.3	L1/L2 P(Y)信号	126
4.4	L2C 信号	128
4.4.1	L2 CM/CL 码	128
4.4.2	L2C 的数据调制	129
4.5	L1/L2 M 信号	132
4.6	L5C 信号	134
4.6.1	L5 I5/Q5 码	134
4.6.2	L5C 的数据调制	136
4.7	L1C 信号	138
4.7.1	L1C 伪码	138
4.7.2	L1C 覆盖码	140
4.7.3	L1C 的数据调制	141



4.8	CNAV 电文	143
4.8.1	CNAV 电文的结构	143
4.8.2	第 0 类信息条	144
4.8.3	第 10~11 类信息条	144
4.8.4	第 12 类信息条	146
4.8.5	第 13~14 类信息条	147
4.8.6	第 15 类信息条	147
4.8.7	第 30~37 类信息条	147
4.8.8	信息条播发顺序	149
4.8.9	CRC-24Q 校验	150
4.8.10	L2C 与 L5C 上 CNAV 电文之间的差异	151
4.9	CNAV-2 电文	152
4.9.1	CNAV-2 电文的结构	153
4.9.2	BCH 编码	154
4.9.3	LDPC 编码	155
4.9.4	块交织编码	156
4.9.5	CNAV-2 电文的内容	158
	参考文献	161
<b>第 5 章</b>	<b>GLONASS 信号</b>	<b>164</b>
5.1	概况	164
5.2	伪码	169
5.2.1	C/A 码	169
5.2.2	P 码	170
5.2.3	时间志	171
5.3	数据调制	172
5.4	导航电文	174
5.4.1	导航电文结构	174
5.4.2	导航电文内容	175
5.4.3	导航电文即时数据	178
5.4.4	导航电文非即时数据	180
5.4.5	数据校验算法	182
5.4.6	解译电文的实例分析	183
	参考文献	186
<b>第 6 章</b>	<b>Galileo 信号</b>	<b>187</b>
6.1	概况	187
6.2	E1 信号	191
6.3	E6 信号	195

6.4	E5 信号	197
6.5	阶梯码	203
6.5.1	阶梯码的构筑	203
6.5.2	主码	206
6.5.3	副码	208
6.6	F/NAV 和 I/NAV 电文	209
6.6.1	F/NAV 和 I/NAV 电文的共同结构特点	210
6.6.2	F/NAV 电文的结构和内容	211
6.6.3	I/NAV 电文的结构和内容	214
6.6.4	F/NAV 和 I/NAV 电文的共同参数内容	222
	参考文献	223
<b>第 7 章</b>	<b>GNSS 时空坐标系和卫星轨道计算</b>	<b>226</b>
7.1	时间坐标系	226
7.1.1	协调世界时和原子时	227
7.1.2	GPS 时间	228
7.1.3	GLONASS 时间	231
7.1.4	Galileo 系统时间	233
7.2	空间坐标系	234
7.2.1	惯性坐标系	235
7.2.2	地心地固直角坐标系	235
7.2.3	大地坐标系	238
7.2.4	站心坐标系	240
7.2.5	GPS、Galileo 和 GLONASS 的空间坐标系	242
7.2.6	WGS-84 与 PZ-90 之间的坐标变换	244
7.3	GPS/Galileo 卫星轨道计算	247
7.4	GLONASS 卫星轨道计算	251
7.4.1	卫星运动方程	251
7.4.2	龙格-库塔法	253
7.5	卫星位置的地球自转校正	256
	参考文献	260
<b>第 8 章</b>	<b>GNSS 测量及其误差</b>	<b>262</b>
8.1	GNSS 测量值	262
8.1.1	伪距测量值	262
8.1.2	多普勒频移和载波相位测量值	266
8.1.3	GNSS 测量值之间的比较	271
8.2	GNSS 测量误差	273
8.2.1	卫星时钟误差	274

8.2.2	卫星星历误差	280
8.2.3	电离层延时	282
8.2.4	对流层延时	287
8.2.5	多径误差	288
8.2.6	接收机噪声	290
8.2.7	接收机器件群波延时及其信道间差异	290
8.3	差分 GNSS 原理及其测量	295
8.3.1	差分 GNSS 原理	295
8.3.2	GNSS 单差伪距	297
8.3.3	GNSS 双差伪距	300
8.3.4	GNSS 单差载波相位	302
8.3.5	GNSS 双差载波相位	304
	参考文献	307
<b>第 9 章 GNSS 定位及其精度</b>		<b>309</b>
9.1	单个 GNSS 的定位算法	309
9.1.1	牛顿迭代及其线性化方法	309
9.1.2	最小二乘法	311
9.1.3	伪距定位原理	314
9.1.4	最小二乘法伪距定位算法	317
9.1.5	二维定位及其辅助方程	322
9.1.6	多普勒定速算法	324
9.1.7	免时定位算法	326
9.2	单个 GNSS 的定位精度分析	328
9.2.1	定位误差的方差分析	328
9.2.2	精度衰减因子	330
9.2.3	卫星几何分布	334
9.3	GNSS 联合定位	336
9.3.1	接收机钟差模型	336
9.3.2	算法 1: 直接利用系统时间差异播发值校正测量值	339
9.3.3	算法 2: 在接收机端测定系统时间差异值	341
9.3.4	算法 3: 建立系统时间差异辅助方程	344
9.3.5	对算法和卫星几何分布的一些讨论	346
9.4	差分 GNSS 相对定位算法	349
9.4.1	单差伪距定位	349
9.4.2	双差伪距定位	351
9.4.3	单差载波相位定位	353
9.4.4	双差载波相位定位	355
	参考文献	358

第 10 章 总结 .....	361
10.1 联合 GNSS 的优势与挑战 .....	361
10.2 GNSS 信号性能的定量评估 .....	365
10.2.1 GNSS 接收机模型 .....	366
10.2.2 均方根带宽和等效矩形带宽 .....	369
10.2.3 谱分离系数和码跟踪谱灵敏度系数 .....	371
10.2.4 等效载噪比和信干噪比 .....	376
10.2.5 自相关函数和码环跟踪精度 .....	385
10.2.6 抗多径性能 .....	388
10.3 GNSS 设计及其发展趋势 .....	391
10.3.1 卫星星座布局 .....	391
10.3.2 卫星星座自主导航 .....	394
10.3.3 信号多址机制 .....	395
10.3.4 频率规划 .....	396
10.3.5 伪码 .....	399
10.3.6 信号波形 .....	402
10.3.7 导频信号 .....	404
10.3.8 导航电文 .....	405
10.3.9 时空坐标系 .....	409
参考文献 .....	410
附录 A 缩写词中英对照 .....	417
附录 B 单位制及其换算 .....	424
附录 C 傅里叶变换 .....	426
附录 D 随机变量及其数字特征 .....	432
附录 E 自相关函数和频谱密度 .....	437

# 第1章 绪论

在第1章,我们将介绍GNSS的概况,特别是其中的GPS、GLONASS和Galileo三大系统,让读者对全球导航卫星系统(GNSS)的发展状况和工作原理有一个总体的认识,以此激发读者学习GNSS的兴趣。

首先,1.1节将给出GNSS的定义,介绍GNSS的结构组成、运行机制和定位原理,描述GNSS接收机的内部结构和设计,并探讨用于评估GNSS性能的一些指标。然后,1.2节、1.3节和1.4节将分别依次介绍GPS、GLONASS和Galileo这三大系统的发展历史、系统构造及其所提供的服务。最后在1.5节,我们将简单地提一下我国的北斗卫星导航系统、日本的准天顶卫星系统(QZSS)和印度区域导航卫星系统(IRNSS)。

顺便提一下,读者可通过试读1.1节来判断自己是否已经具备足够的GPS/GNSS基础知识来顺利地阅读并理解本书内容。如果读者对1.1节特别是对GNSS定位原理和GNSS接收机设计这两节的内容基本上不知所云,或者对诸如伪码、伪距、星历、最小二乘法、精度衰减因子、相关器、码跟踪环、载噪比、数据解调、帧同步和多径等一些重要术语不甚了解,那么读者最好应当首先阅读《GPS原理与接收机设计》<sup>①</sup>一书或者类似的相关书籍,或者至少拥有在必要时可随手查阅这些书籍的便利。

## 1.1 GNSS

尽管美国的GPS、俄罗斯的GLONASS和欧洲的Galileo三大系统相互独立运行,但它们都是GNSS大家庭中的重量级成员,彼此之间存在着作为一个卫星导航定位系统的许多共性。因此,在具体展开讲述这三大系统之前,我们有必要首先介绍具有这些共性的、一个具有更广范畴的GNSS。

### 1.1.1 GNSS的定义

导航在人类历史的发展进程中一直起着相当重要的作用。1957年10月4日,苏联成功发射了世界上第一颗名为Sputnik的人造地球卫星,由此揭开了人类利用卫星来开发导航、定位系统的序幕。同时,现代计算机、微处理器、固态半导体、原子钟、信号处理和通信等相关领域内科学技术突飞猛进的发展,为造就今天的卫星定位与导航技术奠定了坚实的基础。

简单地讲,卫星导航定位系统就是以人造地球卫星作为导航台的星基无线电导航系统,为全球陆、海、空、天的各类军民载体提供全天候、高精度的位置、速度和时间信息,因而它又称为天基定位、导航和授时(PNT)系统。全球导航卫星系统(GNSS)是对全球定位系统(GPS)、格洛纳斯系统(GLONASS)和伽利略(Galileo)系统等这些单个卫星导航定位系统的统一称谓,也可指代它们的增强型系统;时常,GNSS又指代所有这些卫星导航定位系统及其增强型系统的

<sup>①</sup> 本书已由电子工业出版社出版,书号为978-7-121-30539-9。——编者注

相加混合体，也就是说，它是一个由多个卫星导航定位及其增强型系统所拼凑组成的大系统，是一个系统之系统<sup>[26]</sup>。在阅读本书和其他有关 GNSS 文献的过程中，读者通常可以辨认出某处文字中所出现的“GNSS”到底指的是某个卫星导航定位系统还是那个系统之系统，而事实上这种辨认与否时常也无关紧要。

除包括本书所要详细介绍的 GPS、GLONASS 和 Galileo 三大系统外，GNSS 的主要成员还包括我国的北斗（Compass 或 BeiDou）卫星导航系统、日本的准天顶卫星系统（QZSS）和印度区域导航卫星系统（IRNSS）等所有已经建成或者还在开发中的卫星导航定位系统。因为 GPS 目前毋庸置疑地在所有 GNSS 中处于霸主的地位，并且大多数定位与导航应用系统事实上也通常以 GPS 为中心而设法将其他 GNSS 与 GPS 联合起来，所以在本书各章节的讨论中，GPS 自然在必要时被视为参考基准，比如将其他某个 GNSS 与 GPS 进行对比，又比如将其他 GNSS 的时空坐标值转换成 GPS 所采用的那一套，等等。

正如前面 GNSS 定义所指出的那样，对卫星导航定位系统的增强型系统也属于 GNSS 大家庭中的成员。GNSS 增强型系统基本上分为两种类型。

(1) 一类是利用地球静止或同步卫星建立的星基增强系统（SBAS），例如美国的广域增强系统（WAAS）、第一个针对 GLONASS 和 GPS 卫星提供卫星星历和时钟校正量的俄罗斯差分校正和监测（SDCM）系统、欧洲静地星导航重叠服务（EGNOS）、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）、加拿大用来扩展 WAAS 的 CWAAS 以及中国与尼日利亚合建的为非洲大陆提供服务的 NigComSat-1 等。每个 SBAS 星座通常由 2~3 颗地球静止（GEO）卫星组成，它们发射不加密的 L1 信号，从中播发伪距差分校正量、完好性信息和导航信息<sup>[73]</sup>。新一代 SBAS 将增加播发一个宽带民用信号，比如 WAAS 和 EGNOS 将分别在 GPS 的 L5 和 Galileo 的 E5a/E5b 波段上增加播发此类宽带民用信号<sup>[79]</sup>。

(2) 另一类是陆基增强系统（GBAS），例如美国的海事差分 GPS（MDGPS）和局域增强系统（LAAS）以及澳大利亚的陆基区域增强系统（GRAS）。

表 1.1 罗列了全球各国或地区所拥有或开发的一些主要 GNSS 的名称，图 1.1 描绘了多个 GNSS 增强系统的服务覆盖范围，而表 1.2 列出了一些 SBAS 的卫星情况<sup>[9]</sup>。

表 1.1 全球对 GNSS 的开发项目

国家或地区	GNSS 名称	SBAS 名称	GBAS 名称
美国	全球定位系统（GPS）	广域增强系统（WAAS）	海事差分 GPS（MDGPS）、局域增强系统（LAAS）
俄罗斯	格洛纳斯系统（GLONASS）	差分校正和监测（SDCM）系统 <sup>[68, 88]</sup>	
欧盟	伽利略（Galileo）系统	欧洲静地星导航重叠服务（EGNOS）	
中国	北斗卫星导航系统（Compass）	卫星导航增强系统（SNAS） <sup>[53]</sup>	
日本	准天顶卫星系统（QZSS）	多功能卫星增强系统（MSAS）	
印度	印度区域导航卫星系统（IRNSS）	GPS 辅助型静地轨道增强导航（GAGAN）	
加拿大		加拿大广域增强系统（CWAAS） <sup>[90]</sup>	
尼日利亚		NigComSat-1	
南美		加勒比和南美测试平台（CSTB） <sup>[13]</sup>	
澳大利亚			陆基区域增强系统（GRAS） <sup>[56]</sup>

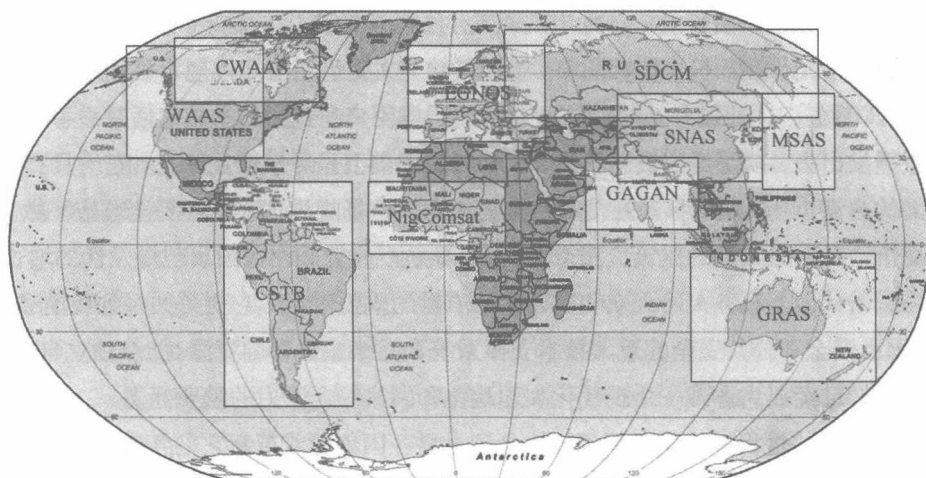


图 1.1 各个 GNSS 增强系统的服务覆盖范围

表 1.2 SBAS 卫星状况 (截至 2012 年 12 月)<sup>[80]</sup>

SBAS 名称	卫星名称	轨道经度	PRN 编号
EGNOS	Inmarsat-3-F2/AOR-E	西经 15.5°	120
	Artemis	东经 21.5°	124
	Inmarsat-4-F2	东经 25°	126
	SES-5	东经 5°	136
GAGAN	GSAT-8	东经 55°	127
	GSAT-10	东经 83°	128
MSAS	MTSAT-1R	东经 140°	129
	MTSAT-2	东经 145°	137
QZSS	QZS-1	东经 135°	183
SDCM	Luch-5A	东经 95°	140
	Luch-5B		
WAAS	Intelsat Galaxy 15 (CRW)	西经 133°	135
	TeleSat Anik F1R (CRE)	西经 107.3°	138
	Inmarsat-4-F3 (AMR)	西经 98°	133

我们在此顺便提一下不同 GNSS 英文名称的写法。因为“GPS”和“GLONASS”是两个缩写词，所以它们必须全部用大写字母拼写；然而，“Galileo”本身是一个单词，而不是缩写词，因此严格地讲，我们只需将其第一个字母“G”大写。另外，由于 GPS、GLONASS 和 GNSS 等缩写词中已经包含“系统”一词，因而严格地讲，这些缩写词后不应再追加“系统”两字，比如不应该说“GPS 系统”，比如只要说“GLONASS”就可以了。当然，可能出于对语调和强调的考虑，我们事实上或许已经习惯于“GPS 系统”之类一说，而这本书本身也并不一味去追究这些文字细节。

广泛而有效的 GNSS 应用已经渗透到国民经济的各个领域，它可以为位于海、陆、空、天各个层面的物体进行定位导航和交通管理，可以为大地和海洋测绘、地震预报、工程测量、精细农业、资源勘查等测量任务实现高精度定位，可以为电力、邮电和通信等网络系统授时与校频，

有些科学与工程领域甚至由于 GNSS 的出现而发生了革命性变化。值得一提的是, GNSS 现已成为许多手机的标准配件, 而美国联邦通信委员会 (FCC) 更已经法令性规定移动通信供应商今后必须提供 E911 服务, 让配置有 GPS/GNSS 芯片的手机用户在打紧急求救电话时, 手机能自动将用户的位置播发出去, 以便得到快速救护<sup>[32]</sup>。针对我国的卫星导航产业而言, 它所具有的最大优势是其庞大的内需市场, 其中移动通信和汽车销售两大市场规模现在已经是全球数一数二的, 而这两大市场恰恰是卫星导航的主流应用市场, 卫星导航产业势必在我国出现爆发性的增长。GNSS 不仅是建设和谐社会、服务人民大众和提升生活质量的重要工具, 它更是关系到我国经济安全、国防安全、国土安全和公共安全的重大技术支撑系统和战略威慑基础资源。能够独立自主地开发、拥有一个 GNSS 已经成为体现一个现代化大国地位和国家综合国力的重要标志。

在编写这一章的过程中, 作者深深地体会到世界各国创建或革新它们各自 GNSS 的高涨热情和迅猛进程。尽管这一章多节的内容为了尽可能地反映 GNSS 的当前现状而被多次大幅度地改动过, 但是这些内容必然仍会落后于它们当前日新月异的发展现状, 因而读者在阅读过程中需要意识到这一差距。

### 1.1.2 GNSS 的系统构成

尽管 GPS、GLONASS 和 Galileo 三大系统对其系统构成可能有着各自略微不同的定义与特点, 但是我们基本上可以将任一个 GNSS 视为由如图 1.2 所示的三个独立部分组成: 空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分。这一章随后三节的主要内容将描述 GPS、GLONASS 和 Galileo 这三大系统的空间星座部分和地面监控部分。

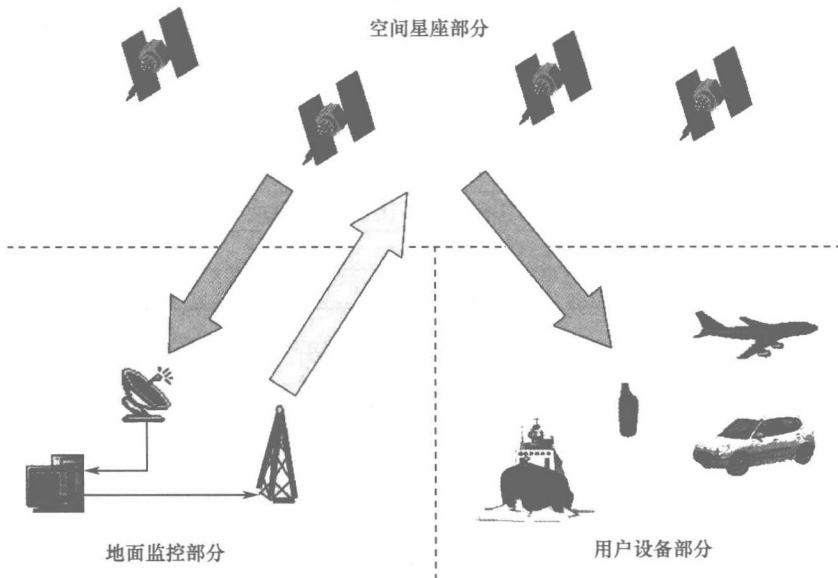


图 1.2 被动式 GNSS 的三个组成部分

空间星座部分的主体是分布在空间轨道中运行的一定数量的卫星, 它们通常呈地球中轨 (MEO)、静止地球 (GEO) 或者倾斜地球同步轨道 (IGSO) 卫星的形式出现。作为导航定位卫



星, GNSS 卫星的主要功能是持续向地球发射导航信号, 使地球上任意一点在任何时刻都能观察到足够多数目的卫星。卫星的硬件设备主要包括无线电收发装置、原子钟、计算机、太阳能板和推进系统等。每颗卫星一般配置有多台高稳定的原子钟, 其中的一台被选中作为时钟和频率标准的发生器, 它是卫星的核心设备, 好比是卫星的心脏, 卫星上各个信号层次的产生和播发都直接或间接地由该频率标准源驱动, 从而使得所有这些信号层次在时间上保持同步。在地面监控部分的监控下, 不同卫星之间的时钟相互保持同步。卫星所发射的导航信号除蕴藏着信号发射时间信息外, 它还向外界传送卫星轨道参数等可用来帮助接收机实现定位的数据信息。GNSS 卫星的基本功能可归纳如下: 接收并存储由地面监控部分发来的导航信息, 接收并执行从地面监控部分发射的控制指令, 进行部分必要的数据处理, 向地面连续不断地发射导航信号, 以及通过推进器调整自身的运行姿态等。

为了区分不同卫星(或者同一卫星)所发射的不同信号, GNSS 需要采用一种多址技术机制。多址技术一般分为码分多址(CDMA)、频分多址(FDMA)和时分多址(TDMA)三种, 其中, CDMA 是将可播发在同一载波频率上的不同信号经不同的伪随机噪声(PRN)码扩频调制, FDMA 是将不同信号播发在不同的载波频率上, 而 TDMA 是将可播发在同一载波频率上的不同信号成分通过分时而共享一个信道。我们稍后会讲到, GPS 和 Galileo 采用 CDMA 机制, 而传统的 GLONASS 采用 FDMA 机制。

通过载波调制, GNSS 信号在某个波段的频率上被播发出去, 不同 GNSS 的不同服务信号可能占用不同波段的频谱资源。国际电信联盟(ITU)对频谱资源的利用有着严格的规范, 它将 L、S 和 C 波段分配给卫星导航服务, 并将 GNSS 划分到无线电导航卫星服务(RNSS)和航空无线电导航服务(ARNS)频段, 而其中的 ARNS 频段受到了 ITU 的严格控制与保护, 因而它对民用航空等一些安全关键性应用系统有着特别重要的意义。频谱分配的基本原则主要是“先来先用”, 一个波段上的主要服务不允许干扰位于邻近波段上的其他服务, 并且 ITU 具体地规定了两种不同服务之间所允许产生的最大干扰量。可见, 在满足 ITU 规定的条件下, 一个服务信号可以将一定能量外泄到邻近频率的波段上<sup>[42]</sup>。

地面监控部分负责整个系统的平稳运行, 它通常至少包括若干个组成卫星跟踪网的监测站、将导航电文和控制命令播发给卫星的注入站和一个协调各方面运作的主控站, 其中主控站可谓是整个 GNSS 的核心。地面监控部分主要执行如下一些功能: 跟踪整个星座卫星, 测量它们所发射的信号; 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。

用户设备部分通俗地讲就是指接收机, 它的根本功能是接收、跟踪 GNSS 卫星导航信号, 通过对卫星信号进行频率变换、功率放大和数字化处理, 以便从中测量出从卫星至接收机天线的信号传播时间, 并解译出卫星所发送的导航电文, 进而求解出接收机本身的位置、速度和时间(PVT)。根据用户被授予的不同身份, 接收机可获准利用民用、商用和军用等多个不同用途与权