

Data Processing Method and Applications of
Regional CORS Network

区域CORS网数据 处理方法及应用

郭金运 刘智敏 赵春梅 著



科学出版社

区域 CORS 网数据处理方法 及应用

**Data Processing Method and Applications of
Regional CORS Network**

郭金运 刘智敏 赵春梅 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

区域 CORS 是国家和地方重要的地理空间信息基础设施,本书系统阐述区域 CORS 数据处理的理论和方法及其应用;介绍和总结 GNSS 和 CORS 的发展,以及区域 CORS 观测数据及其预处理技术,给出区域 CORS 网基线解算和网平差模型及其解算方法;论述基于区域 CORS 的可降水汽含量、电子含量以及区域参考框架建立和维持的方法,通过实例给出区域 CORS 数据处理流程和关键技术。

本书可供 GNSS、测绘工程、空间大地测量、导航、空间科技、大气等有关学科领域的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

区域 CORS 网数据处理方法及应用/郭金运,刘智敏,赵春梅著. —北京:科学出版社,2016.9

ISBN 978-7-03-049800-7

I. ①区… II. ①郭… ②刘… ③赵… III. ①全球定位系统-数据处理
IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 210951 号

责任编辑:周 涵 赵彦超/责任校对:钟 洋

责任印制:张 伟/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本:720 × 1000 B5

2016 年 9 月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:237 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着美国 GPS 的现代化、俄罗斯 GLONASS 的恢复正常运行和现代化、中国北斗系统的区域运行和全球系统建设以及欧洲伽利略 (GALILEO) 系统的建设, 全球导航卫星系统 (GNSS) 已经深入社会生活的诸多领域, 对国民经济建设、国防建设和科学研究产生了深远影响。

GNSS 绝对定位精度达到了 10m 量级, 相对定位精度达到了厘米量级甚至毫米量级, 授时精度达到了数十纳秒。因此, GNSS 在导航、测绘、授时、城市建设规划和管理、交通、资源勘探与开发、地理国情监测、环境监测、自然灾害监测与预测预报、地球科学、空间科技等领域获得广泛应用。随着 GNSS 技术的发展和推广应用, 用户对导航定位的实时性和精度提出更高的要求, 因此连续运行参考站系统 (CORS) 技术得到发展。CORS 集成卫星导航定位技术、计算机网络技术、数字通信技术等高新科技, 很好地克服传统测绘技术基站架设繁琐、效率低、测量距离短等的局限性, 不仅扩大覆盖范围、降低作业成本、提高定位精度, 而且实现 GNSS 区域多功能服务, 构建和维持区域动态参考框架, 解算可降水汽含量和总电子含量。

自 20 世纪 80 年代加拿大提出主动控制系统以来, 世界上很多国家和地区先后建立不同技术水平、不同层次的 CORS。国外著名的 CORS 主要有美国的 NGS-CORS、国际 GNSS 服务 (IGS) 组织的全球跟踪站网络、欧洲的 EPN 永久性连续网、日本的 GPS 连续应变监测系统 (COSMOS) 等。2003 年, 我国首个区域 CORS 在深圳市建设完成并投入使用。之后, 全国开展了大规模 CORS 建设, 逐渐形成“全国-省-地区”的 CORS 网络格局, 如中国地壳运动监测网络 (CMONOC)、中国大陆构造环境监测网络 (CMONE)、沿海差分站网系统 RBN-DGPS, 以及已建成的或在建的行业、省 (直辖市、自治区)、城市 (地区) 的 CORS 等。CORS 采集了大量数据, 其数据处理是 CORS 应用的基础。

本书共 7 章。第 1 章主要介绍 GNSS 和 CORS 发展和应用概况, 第 2 章阐述区域 CORS 数据预处理方法和过程, 第 3 章给出区域 CORS 网基线解算模型和算法, 第 4 章给出区域 CORS 网平差模型和算法, 第 5 章给出基于 CORS 的可降水汽含量计算模型和方法, 第 6 章给出基于区域 CORS 的电子含量解算模型和方法, 第 7 章给出基于 CORS 的区域动态参考框架建立和维持的方法。

本书是国家自然科学基金资助的“基于船载重力和 GNSS 的测线式陆海高程传递研究”(41374009)、“基于星地链路和星间链路的导航卫星联合定轨关键算法研

究”(41274018)、“遗传算法在 GPS RTK 整周模糊度解算上的应用研究”(40704001), 山东省自然科学基金资助的“基于船载 GNSS 的近海海面高精度测量研究”(ZR2013 DM009), 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助的“基于卫星定位的沙尘暴源区综合卫星监测技术研究”(2006AA12z303), 公益性行业科研专项“中国 SLR 系统性能提升关键技术及应用”(201412001) 等课题的部分研究成果总结。本书的出版还得到了山东科技大学科研创新团队支持计划“空间大地测量”(2014TDJH101) 的资助。

本书由山东科技大学郭金运教授、刘智敏副教授及中国测绘科学研究院赵春梅研究员合著。在研究过程中得到了美国斯克里普斯海洋研究所方鹏博士, 台湾交通大学黄金维教授, 中国测绘科学研究院胡建国研究员, 国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心常晓涛研究员, 武汉大学郭际明教授, 中国石油大学王振杰教授, 国家海洋局第一海洋研究所刘焱雄研究员, 山东科技大学韩晓冬教授、独知行教授、孔巧丽博士, 山东省国土测绘院张海平高工, 福州市勘测院吴增铭高工等的帮助, 山东科技大学硕士研究生姜英明、董正华、杨婷婷、沈石凯、李延旭、周茂盛、张清华、薛映俊、曹华东、李洋洋、李斐等帮助收集资料和处理分析了部分数据, 特此感谢。

本书的主要目的是系统阐述和总结区域 CORS 数据处理理论和方法, 通过实例计算和结果分析, 使读者更好地了解 and 掌握有关理论和技术, 以助于解决相关工作中遇到的实际问题。本书的主要阅读对象为从事 GNSS 技术及其应用研究的科研和工程技术人员。由于 CORS 技术涉及研究内容较多, 并且作者的水平有限, 书中难免有不妥之处, 恳请同行专家和广大读者不吝赐教。

郭金运 刘智敏 赵春梅

2016 年 4 月 22 日于青岛

目 录

1	绪论	1
1.1	GNSS 的发展	1
1.2	CORS 的发展	11
1.3	GNSS 数据处理状况	18
2	CORS 数据预处理	27
2.1	CORS 数据准备	28
2.2	数据格式	28
2.3	测站信息完整性	37
2.4	站点质量检查	40
3	CORS 网基线解算	47
3.1	观测量及误差处理	47
3.2	基线解算随机模型	59
3.3	基线解算方法	63
3.4	基线解算实例	69
4	CORS 网平差	78
4.1	网平差模型	78
4.2	网平差解算方法	85
4.3	SDCORS 网平差实例	94
5	可降水汽含量	103
5.1	对流层及对流层延迟	103
5.2	对流层延迟模型	105
5.3	映射函数	108
5.4	天顶湿延迟的计算	113
5.5	可降水汽反演	114
5.6	区域可降水汽含量计算实例	116
6	总电子含量	125
6.1	电离层概述	125
6.2	电离层延迟和总电子含量	126
6.3	电离层模型	134
6.4	三维电离层层析	139

6.5 电子含量计算实例	143
7 区域动态坐标框架	147
7.1 坐标系统与坐标框架	147
7.2 坐标速度场分析	153
7.3 坐标时变分析	165
7.4 区域动态坐标框架实例	171
参考文献	174

1 绪 论

1.1 GNSS 的发展

全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 是一个全球性的卫星导航、定位与授时系统, 它包括空间卫星星座、地面监控系统以及用户接收设备, 可为地球表面、近地表和地球外空所有接收点提供高精度、全天候、实时的速度、位置和时间信息。随着科学技术的发展, GNSS 在社会经济发展、国防建设和科学研究等诸多领域中发挥越来越重要的作用。世界上多个国家都加入到这个空间资源争夺的竞赛中, 花费巨资发展各自的导航卫星系统。现有的主要导航卫星系统有美国的 GPS(Global Positioning System)、俄罗斯的 GLONASS(GLO-bal Navigation Satellite System)、我国的北斗系统 (Beidou Navigation Satellite System, BDS)、欧盟的伽利略 (GALILEO) 系统以及一些区域性导航定位系统 (如日本的 QZSS、印度的 IRNSS 等)。随着卫星导航技术的发展和广泛应用, GNSS 技术已经逐步渗透到日常生活工作中的诸多方面, 人们将其应用到测绘、导航、授时、资源勘探与开发、城乡规划与管理、交通、自然灾害监测、地球科学、空间科技等诸多领域, 与导航和地理信息相关的产业也在飞速发展, 同时推动了其他领域的发展, 产生了巨大的社会效益。

1.1.1 GNSS 由单系统到多系统

1. 子午卫星系统

1958 年, 美国海军武器实验室就着手建立为美国军用舰艇导航服务的卫星系统, 即海军导航卫星系统 (Navy Navigation Satellite System, NNSS)。在该系统中, 卫星的轨道都通过地极, 故也称子午 (TRANSIT) 卫星系统。1964 年 1 月, TRANSIT 正式建成并投入军用。1967 年 7 月, 该系统解密, 同时提供民用 (Thomas et al., 1968)。

TRANSIT 卫星在几乎是圆形的极轨道上运行, 卫星离地面的高度约为 1100km, 卫星的运行周期为 106min。TRANSIT 卫星星座一般由 6 颗卫星组成, 这 6 颗卫星均匀地分布在地球四周。TRANSIT 卫星系统是采用多普勒 (Doppler) 测量的方式来进行导航定位 (Newton, 1967)。但由于各卫星轨道面的倾角并非严格为 90° , 因此各卫星进动的大小和符号各不相同。这样, 经过一段时间后, 各轨道

面上的卫星分布就会变得疏密不一。

TRANSIT 卫星系统具有以下局限性: ①一次定位所需时间过长, 无法实时定位。卫星个数少, 造成 TRANSIT 卫星进行导航定位时, 大部分时间都是在等待卫星中度过的, 真正的观测时间不足 20%, 作业效率低。为获得对大地测量有意义的成果, 一般需观测 50~100 次合格的卫星通过, 历时一星期左右。②定位精度偏低。由于轨道高度只有 1100km, 受到大气阻力和地球非中心引力摄动大, 卫星定轨精度低; 另外, 双频为 150MHz 和 400MHz, 频率低, 电离层延迟经双频改正后残差项达到 1m 以上。TRANSIT 卫星多普勒定位一般只能获得分米级至米级的定位精度, 这限制了它的应用范围。

2. GPS

由于 TRANSIT 卫星系统存在上述局限性, 在该系统投入运行后不久, 美国国防部 (United States Department of Defense, DOD) 于 1973 年成立了由空军、海军、陆军、国防制图局、交通部以及北大西洋公约组织 (简称北约) 和澳大利亚等多方代表组成的联合工作办公室, 负责新的卫星导航定位系统的设计、组建和管理等工作。联合工作办公室提出了一个综合性方案, 并将其称为 NAVSTAR/GPS (NAVigation System with Timing And Ranging/Global Positioning System), 简称 GPS (Spilker, 1978)。经过 20 余年的研究实验, 耗资达 300 亿美元, 到 1994 年, 全球覆盖率高达 98% 的 24 颗 GPS 卫星星座已布设完成。1993 年 7 月, 进入轨道可正常工作的 Block I 试验卫星、Block II 和 Block II A 型工作卫星的总数已达到 24 颗, 系统已具备了全球连续导航定位能力, 故 DOD 于 1993 年 12 月正式宣布 GPS 已具备初步工作能力 (Enge, 1994)。1995 年 4 月, 美国空军空间部宣布 GPS 已具有完全的工作能力, 已进入预定轨道能正常工作的 Block II 和 Block II A 型工作卫星总数已达 24 颗。

GPS 主要由空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分组成。空间星座由 24 颗卫星组成, 其中 21 颗为工作卫星, 3 颗为备用卫星。24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道面上, 即每个轨道面上有 4 颗卫星, 卫星轨道面相对于地球赤道面的轨道倾角为 55° , 相邻轨道面的升交点赤经相差 60° , 1 个轨道面上的卫星比西边相邻轨道面上的相应卫星升交点角距超前 30° (图 1.1)。这种轨道布局的目的是保证在全球任何地点、任何时刻至少可以观测到 4 颗卫星, 就能迅速确定用户端在地球上所处的三维位置; 所观测到的卫星数越多, 解算出来的位置就越精确和可靠。地面监控部分有 17 个监控站, 其中 6 个为美国空军的监控站, 主要由 1 个主控站、3 个注入站和 6 个监控站组成。主控站位于美国科罗拉多州 (Colorado) 的谢里弗尔 (Schriever) 空军基地, 是整个地面监控系统的管理中心和技术中心; 另外还有一个位于马里兰 (Maryland) 州盖茨堡 (Gettysburg) 的备用主控站, 在发生

紧急情况时启用。GPS 的 3 个注入站, 分别位于南太平洋马绍尔群岛的卡瓦加兰 (Kwajalein) 环礁、大西洋上英国属地阿森松 (Ascension) 岛、英属印度洋领地的迪戈加西亚 (Diego Garcia) 岛。注入站的作用是把主控站计算得到的卫星星历、导航电文等信息注入相应的卫星。注入站同时也是监控站, 还有位于夏威夷 (Hawaii)、美国本土的科罗拉多和卡纳维拉尔角 (Cape Canaveral) 的 3 个监控站。另外还有国家地球空间信息局的 11 个监控站。监测站的主要作用是采集 GPS 卫星数据和当地的环境数据, 然后发送给主控站。用户设备主要是 GPS 接收机, 其主要作用是接收 GPS 卫星信号并利用传来的信息计算用户的三维位置及时间。

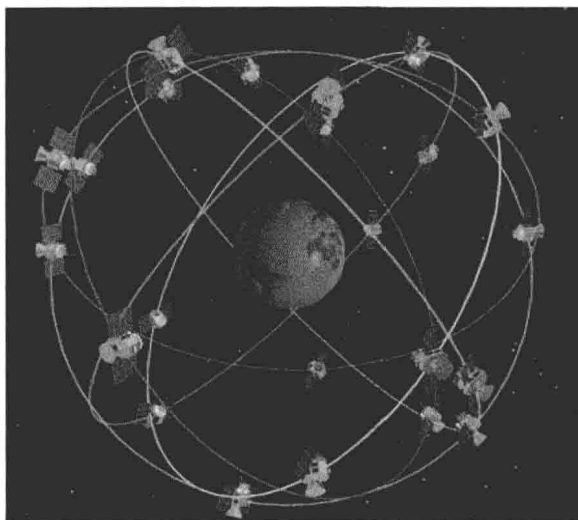


图 1.1 GPS 卫星星座

GPS 卫星所用的载波有两个, 它们均位于微波的 L 波段 (分别称为 L1 载波和 L2 载波)。其中 L1 载波是由卫星上的原子钟所产生的基准频率 $f_0 (=10.23\text{MHz})$ 倍频 154 倍后形成的, 即 $f_1=1575.42\text{MHz}$, 对应波长为 19.03cm ; L2 载波是由基准频率 f_0 倍频 120 倍后形成的, 即 $f_2=1227.60\text{MHz}$, 其波长为 24.42cm 。GPS 现代化后又增加了第三民用频率 L5 载波, 是由基准频率 f_0 倍频 115 倍后形成的, 即 $f_5=1176.45\text{MHz}$, 其波长为 25.48cm 。

3. GLONASS

GLONASS 是苏联研制并组建的第二代卫星导航定位系统, 现由俄罗斯负责管理和维持。该系统和 GPS 一样, 也采用距离后方交会原理工作, 可为地球上任何地方及近地空间的用户提供连续的、精确的三维坐标、三维速度及时间信息。

从 1982 年 10 月 12 日发射第一颗 GLONASS 卫星起至 1995 年 12 月 14 日止,先后共发射了 73 颗 GLONASS 卫星,最终建成了由 24 颗工作卫星组成的卫星星座。GLONASS 星座由中轨道 (Medium Earth Orbit, MEO) 的 24 颗卫星组成,包括 21 颗工作星和 3 颗备份星,分布于 3 个圆形轨道面上,轨道高度约为 19100km,轨道倾角为 64.8° 。相邻轨道面的升交点赤经之差为 120° 。每个轨道面上均匀分布 8 颗卫星,卫星在几乎为圆形的轨道上飞行,运行周期为 11h 15min(图 1.2)。GLONASS 所用的时间系统是俄罗斯自己维持的协调世界时 (UTC) 时间,除了存在跳秒外,与 GPS 时间之间还有数十纳秒的差异。GLONASS 所用的坐标系是 PZ90 坐标系。GLONASS 卫星播发两种信号,和 GPS 系统不同, L1(1591~1610MHz) 和 L2(1240~1256MHz) 频段上采用频分多址 (Frequency Division Multiple Access, FDMA) 方式调制军用和民用信号 (Lechner et al., 2000)。具体地说,频率分别为 $L1=1602+0.5625\times k(\text{MHz})$ 和 $L2=1246+0.4375\times k(\text{MHz})$,其中 k 为 1~24(每颗卫星的频率编号),同一颗卫星满足 $L1/L2=9/7$ 。GLONASS 系统设计定位精度为:在 95% 的概率条件下,水平向为 $\pm 100\text{m}$,垂直向为 $\pm 150\text{m}$ 。

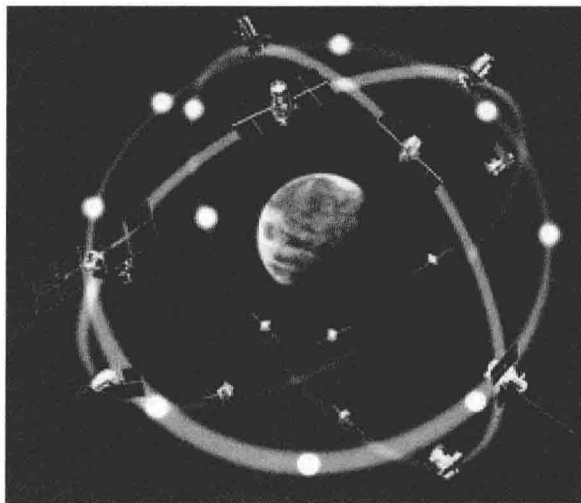


图 1.2 GLONASS 卫星星座

GLONASS 与 GPS 在技术方面有几点不同之处:①卫星发射频率不同, GPS 的卫星信号采用码分多址 (Code Division Multiple Access, CDMA) 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 FDMA 体制,卫星靠频率不同来区分,每组频率的伪随机码相同,因此 GLONASS 可以防止整个卫星导航系统被敌方干扰,具有更强的抗干扰能力。②坐标系不同, GPS 使用 WGS84 坐标系,而 GLONASS 使用 PZ90。③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。

4. 伽利略导航卫星系统

在 1993~1994 年期间,欧盟各国对建立国际社会控制下的民用全球导航卫星系统达成共识,认为现有的 GPS 和 GLONASS 只能当作辅助导航系统。欧盟提出了 GALILEO 全球导航卫星系统,但由于受各方面影响,直到 1999 年 2 月,欧盟才确定:欧洲将致力于发展新一代卫星导航系统,即 GALILEO 系统。2002 年 3 月,欧盟决定启动 GALILEO 系统的组建计划,以便使欧洲拥有自己的卫星导航定位系统,它是一个多国、民建、民控和民用的系统。

按照规划, GALILEO 系统由空间段、地面段和用户段 3 部分组成。空间段由分布在 3 个轨道平面上的 30 颗 MEO 卫星构成,每个轨道平面上分布有 10 颗卫星,9 颗正常工作,1 颗运行备用;轨道平面倾角为 56° (Benedicto et al., 2000) (图 1.3)。地面段包括全球地面控制段、全球地面任务段、全球域网、导航管理中心、地面支持设施和地面管理机构等。用户段主要是用户接收机及其等同产品。GALILEO 考虑将与 GPS、GLONASS 的导航信号一起组成复合型卫星导航系统,因此其用户接收机将是多用途、兼容性的多模接收机。GALILEO 系统的典型功能是信号中继,即向用户接收机的数据传输可以通过一种特殊的联系方式或其他系统的中继来实现,如通过移动通信网。GALILEO 的接收机不仅可以接收本系统信号,而且也可以接收 GPS、GLONASS 这两大系统的信号,同时具有导航功能与移动电话功能相结合、与其他导航系统相融合的优越性能。首先, GALILEO 是世界上

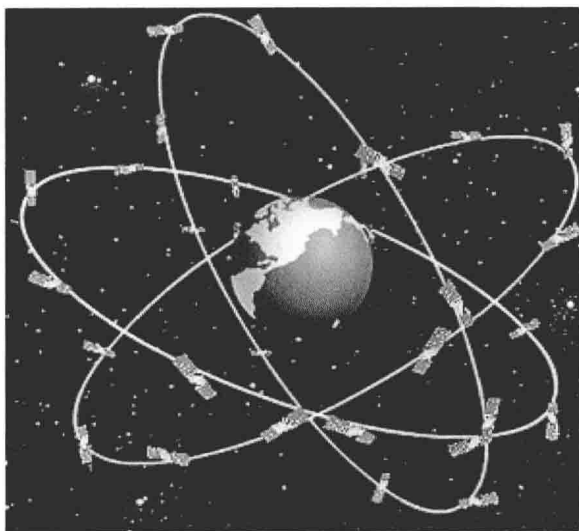


图 1.3 GALILEO 卫星星座

第一个基于民用的全球卫星导航定位系统,将来投入运行后,全球的用户将使用多制式的接收机,获得更多的导航卫星信号,这将极大提高导航定位和授时的精度。其次,GALILEO 计划是欧洲自主、独立的全球多模式卫星导航系统,可提供高精度、高可靠性的定位服务,实现完全非军方控制和管理、覆盖全球的导航和定位功能。GALILEO 还能够和 GPS、GLONASS 实现多系统内的相互合作,任何用户将来都可以用 1 个多系统接收机采集各个系统的数据或者各系统数据的组合来实现定位导航的要求。再次,GALILEO 可以发送实时的高精度定位信息,同时其还能够保证在许多特殊情况下提供服务,如果通信失败也能在几秒钟内通知用户。

5. 北斗导航卫星系统

我国北斗导航卫星系统按照“自主、开放、兼容、渐进”的发展原则,遵循“先区域、后全球”的总体思路(杨元喜,2010),分三步走,稳步有序推进北斗发展:第一步,1994 年启动北斗卫星导航试验系统建设,并于 2000 年形成区域有源服务能力;第二步,2004 年启动北斗卫星导航系统建设,2012 年形成区域无源服务能力;第三步,2020 年北斗卫星导航系统形成全球无源服务能力。

第一代北斗卫星导航定位系统是一种区域性的有源导航定位系统,投资小、建成快。该系统是利用两颗地球同步轨道卫星进行导航定位的设想而建立的。双星定位只能确定用户的平面位置,高程则需依靠中心站内的地面高程模型来确定。2000 年 10 月 31 日和 2000 年 12 月 21 日,我国自行研制的两颗北斗导航试验卫星相继从西昌卫星发射中心升空并准确进入预定的地球同步轨道(分别位于东经 80° 和 140° 赤道上空),组成了我国第一代卫星导航定位系统的卫星星座,即双星系统。此后,我国又将另一颗备用卫星准确送入预定轨道(东经 110.5° 赤道上空)。北斗卫星系统由空间部分、地面控制部分和用户终端三个部分组成,除了进行导航和定位以外,北斗卫星系统还具有通信和精密授时等功能。

自 2007 年 4 月,第一颗北斗二代试验卫星 COMPASS-M1 发射成功,经过 5 年发射组网,2012 年 10 月北斗区域卫星导航系统组网完成,2012 年 12 月正式向亚太地区提供区域服务,系统连续稳定运行。第二代北斗系统空间部分由 5 颗地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星、5 颗倾斜地球同步轨道(Inclined Geosynchronous Satellite Orbit, IGSO)卫星和 4 颗 MEO 卫星组网,具备区域服务能力。5 颗 GEO 卫星分别定点在东经 58.75° 、 80° 、 110.5° 、 140° 和 160° ; 5 颗 IGSO 卫星分别在间隔 120° 的 3 条轨道上,轨道倾角为 55° ; 4 颗 MEO 卫星轨道高度为 21528km,轨道倾角为 55° 。BDS 卫星采用 CDMA 扩频通信体制,在 B1(1561.098MHz)、B2(1207.14MHz)和 B3(1268.52MHz)频段上调制导航信号。北斗卫星导航系统采用的坐标系是 2000 中国大地坐标系(China Geodetic Coordinate System 2000, CGCS2000),时间系统是北斗时,其秒长取为国际单位制 SI 秒(Gao

et al., 2012; 刘颖等, 2012; 杨元喜等, 2014)。BDS 计划于 2020 年实现全球服务能力, 建成国际一流的全球导航卫星系统。全球性覆盖的北斗卫星系统星座部分将由 5 颗 GEO 卫星和 30 颗非地球静止轨道卫星组成。GEO 卫星分别定点于东经 58.75° 、 80° 、 110.5° 、 140° 和 160° 。非地球静止轨道卫星由 27 颗 MEO 卫星和 3 颗 IGSO 卫星组成。其中, MEO 卫星轨道高度为 21500km, 轨道倾角为 55° , 均匀分布在 3 个轨道面上; IGSO 卫星轨道高度为 36000km, 均匀分布在 3 个倾斜同步轨道面上, 轨道倾角为 55° , 3 颗 IGSO 卫星星下点轨迹重合, 交叉点经度为东经 118° , 相位差 120° (图 1.4)。届时, 30 余颗新一代北斗导航卫星将覆盖全球, 为全球用户提供更精准、更可靠的定位、导航和授时服务, 并通过星间链路实现星-星组网、互联互通 (Han, 2014)。

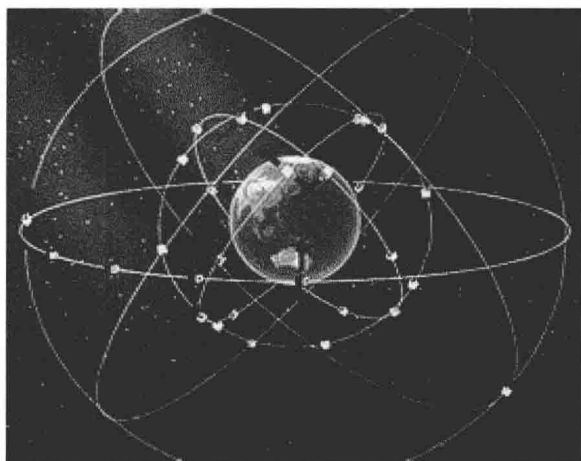


图 1.4 北斗全球卫星导航系统卫星星座

6. 日本和印度区域导航卫星系统

准天顶卫星系统 (Quasi-Zenith Satellite System, QZSS) 是日本开发的区域导航卫星系统, 主要是为城市高楼和山区环境提供导航服务而设计。QZSS 采用 CDMA 扩频通信体制, 在 L1(1575.42MHz)、L2(1227.60 MHz)、L5(1176.45MHz)、LEX/E6 (1278.750MHz) 四个频率上发射 8 种不同的信号。QZSS 星座由 3 颗高倾斜椭圆轨道 (Highly Elliptical Orbit, HEO) 卫星组成, 轨道倾角 45° , 地面轨迹为非对称的“8”字形形状, 平均中央经度为 135°E (Inaba et al., 2009)。

2006 年, 印度批准开发印度区域导航卫星系统 (Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS), 以便为印度大陆提供自主导航服务。IRNSS 系统空间星座由 7 颗卫星组成, 其中 3 颗为 GEO 卫星, 分别位于东经 32.5° 、 83° 和 131.5° ;

另外 4 颗为 IGSO 卫星,分布在两个倾角为 29° 的轨道上,地面轨迹中央经度分别为 55°E 和 111.5°E 。星座设计覆盖范围为 $40^\circ\text{E}\sim 140^\circ\text{E}$ 和 $40^\circ\text{S}\sim 40^\circ\text{N}$, 可以为用户播发单频和双频信号,标准服务定位精度优于 20m。IRNSS 将采用 CDMA 扩频通信体制在 L5/E5a 和 S 频段 (2492.028 MHz) 上调制导航信号 (Lele, 2014)。

1.1.2 GNSS 现代化

1. GPS 现代化

1999 年 1 月 25 日,美国时任副总统戈尔提出了 GPS 现代化的计划。为了使 GPS 更好地满足军事、民间和商业用户不断增长的应用需求,美国决定用先进技术改进和完善 GPS 系统。GPS 现代化计划主要包括以下内容:

(1) 增加新的 GPS 信号。2005~2008 年期间发射 8 颗改进的导航卫星,在卫星上播发新的军码和第二民码,同时计划在 2006~2010 年期间发射的导航星上增设第三民码。

(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。早在 2004 年,美国 DOD 开始研究 GPS III 的采购和结构概念,以满足验证系统的要求 (Li et al., 2013)。GPS III 将选择全新的优化设计方案,放弃现有的 24 颗 MEO 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 2016~2020 年实现。

2010 年 8 月,美国发射了第一颗 Block II F 卫星,新一代 Block II F 卫星在设计上提高了信号精度,预计卫星寿命可延长到 12 年,开始了用 3 个 GPS 导航定位信号 (L1、L2、L5) 进行导航定位的新局面 (刘基余, 2011)。L5 信号经过多年的研究、开发和测试,随着 Block II F 卫星的发射而正式投入使用,发射中心频率为 1176.45MHz。目前,一方面 GPS 地面段现代化改造,进行地面系统升级以支持新发射的 Block II F 卫星;另一方面加快 GPS III 地面段 (即 GPS OCX) 建设 (唐浩, 2010)。

GPS III 卫星 (即第四代 GPS 工作卫星) 于 2001 年开始实质性的研制。按计划,将耗资 35.7 亿美元研制 36 颗 A、B、C 三种类型的 GPS III 卫星,即 12 颗 GPS III A 卫星、8 颗 GPS III B 卫星和 16 颗 GPS III C 卫星。GPS III 卫星全部投入运行后,将改变现行的 6 轨道 24 颗 Block II / II A / II R 卫星星座的布局 and 结构,用 33 颗卫星构建成 HEO 和 GEO 相结合的新型 GPS 混合星座 (Luba et al., 2005)。

截止到 2015 年 12 月 11 号, GPS 在轨运行卫星为 31 颗, 包括 1 颗 Block II A 型卫星、12 颗 Block II R 型卫星、7 颗 Block II R-M 型卫星、11 颗 Block II F 型卫星。GPS III 正在研制测试中, 计划于 2017 年发射第一颗 GPS III 卫星。

2. GLONASS 现代化

2001 年 8 月 20 日, 俄罗斯政府批准了 GLONASS 发展计划, 拉开了 GLONASS 系统恢复和现代化的序幕。GLONASS 现代化包括卫星现代化、地面控制区段现代化以及开展国际合作等, 特别是包括 GLONASS 卫星信号在内的整体性能的改善与提高。2003 年 12 月 10 日, 第一颗 GLONASS-M 卫星入轨运行, 并于 2004 年 12 月 8 日开始向用户发送导航定位信号, 这标志着 GLONASS 现代化迈出了坚实的第一步 (刘基余, 2010)。

GLONASS 卫星现代化包括:

(1) 2003 年开始发射第二代 GLONASS 卫星, 即 GLONASS-M I 卫星和 GLONASS-M II 卫星。第一代 GLONASS 卫星寿命只有三年左右, 提供一个民用信号。与第一代 GLONASS 卫星相比, GLONASS-M 卫星寿命更长, 可达七年, 时间精度更高, 并且在 L2 上增发了第二民用信号。由于频道号的限制, GLONASS 为同一轨道面对径上的两颗卫星分配了同一个通道号。地面接收机不需要同时跟踪这两颗卫星, 但星载/空基接收机必须通过一定的判别方法 (如多普勒频移检查等) 区分轨道面对径上的两颗卫星。对于 GLONASS-M 卫星, 空基接收机还可以通过电文中的在轨卫星编号予以判别。GLONASS-M 卫星的导航电文较第一代卫星在内容上更为丰富, 还增加了星上电文完整性检验标志、时间系统转换等相关参数。

(2) 2010 年 12 月开始研发第三代 GLONASS 导航卫星, 即 GLONASS-K1 卫星。与 GLONASS-M 卫星相比, GLONASS-K1 卫星寿命进一步延长, 可达十年, 时间精度也进一步提高, 并且增加了 L3OC 信号 (L3 载频上 CDMA 体制的第三民用信号)。第一颗 GLONASS-K1 卫星已于 2011 年 2 月 26 日发射升空, 截至 2013 年 4 月, 该卫星仍处于飞行测试阶段。2014~2017 年发射的 GLONASS-M 卫星也将增加 L3OC 信号。

(3) 分别于 2015 和 2025 年开始发射更新一代的 GLONASS-K2 卫星和 GLONASS-KM 卫星, 增强系统的整体功能, 扩大 GLONASS 应用领域, 提高 GLONASS 与 GPS 的竞争能力。GLONASS-K2 卫星将在 L1、L2 载频上发射 CDMA 信号, 加上 L3OC 信号, 民用信号将达到 5 个。K2 卫星将从 2017 年起逐步替代现有的 M 卫星。KM 卫星载频数量将达到 6 个, 民用信号达到 8 个, 即 2 个 FDMA 信号 (L1OF、L2OF) 和 6 个 CDMA 信号 (L1OC、L2OC、L3OC、L1OCM、L3OCM、L5OCM)。

地面控制区段现代化包括：改善地面控制设施，增加卫星监测站；改善卫星时钟的稳定度；改善动力学模型；改进时间保持系统。

1.1.3 GNSS 的应用

1. GNSS 在导航中的应用

用户通过 GNSS 信号接收机能够捕获到按一定卫星截止高度角所选择的待测卫星，并跟踪这些卫星的运行。当接收机捕获到跟踪的卫星信号后，就可测量出接收天线至卫星的距离及其变化率，解调出卫星轨道参数等数据。根据这些数据，接收机中的微处理计算机就可进行定位计算，计算出用户所在地理位置的经纬度、高度、速度、时间等信息。GNSS 广泛用于飞行器、船舶、汽车等交通设备有关的导航，还可以配合完成武器投射、侦察、巡逻、反潜和援救等任务。

2. GNSS 在测绘中的应用

由于 GNSS 定位技术具有高精度、全天候、测站间无需保持通视等优点，因而已基本取代传统测量方法而成为建立各级平面控制网的主要手段。利用 GNSS 来布设国家控制网、城市控制网、工程测量控制网时，所需的工天数大约为常规方法的 1/6，所需费用在国外为常规方法的 1/6 左右，在国内为常规方法的 1/3 左右，而且精度也比常规方法好，因而已得到了广泛的应用。GNSS 已广泛应用于高精度大地测量和控制测量、地籍测量和工程测量、道路和各种线路放样、水下地形测量、大坝和大型建筑物变形监测、海洋大地测量、海面地形和海底地形测量等领域，特别是山区的大地测量和地形测绘，GNSS 相对传统方法更节省了大量的时间、人力、物力和财力。

目前 GNSS 已成为建立和维持全球性参考框架的重要手段。自从 1992 年国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service, IGS) 开始工作以来，就在不断地增加跟踪站数量，提高定位精度以支持国际地球参考框架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) 系列的建立和维持工作。

3. GNSS 在其他领域中的应用

在运输方面，空运上通过 GNSS 接收设备，驾驶员着陆时能准确对准跑道，同时还能使飞机紧凑排列，提高机场利用率，引导飞机安全进离机场。水运上能实现船舶远洋导航和进港引水。陆运上利用 GNSS 技术对车辆进行跟踪、调度管理，合理安排车辆，以最快的速度响应用户的驾乘车或送货请求，降低能源消耗，节省运输成本；建立数字化城市交通电台，实时发播城市交通信息，车载设备通过 GNSS 进行精确定位，结合电子地图以及实时的交通状况，自动匹配最优路径，实现车辆的自主导航。