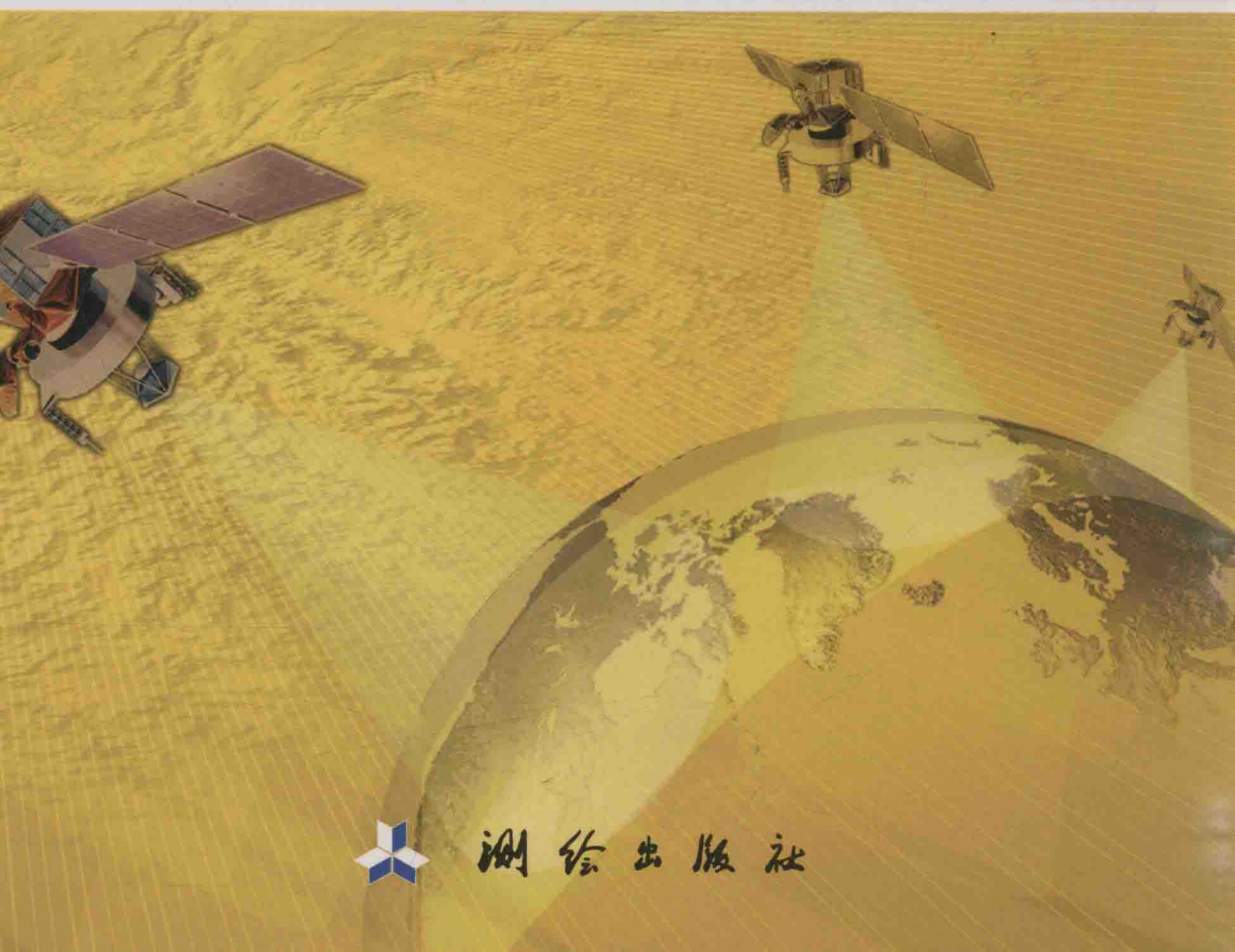


高等学校教材

# GPS测量实施与 数据处理 (第二版)

GPS Survey Practice and Data Processing

独知行 刘智敏 熊卫东 编著



测绘出版社

高等学校教材

修订说明

内容简介

# GPS 测量实施与数据处理

## GPS Survey Practice and Data Processing

### (第二版)

独知行 刘智敏 熊卫东 编著

图书在版编目(CIP)数据

GPS 测量实施与数据处理 / 独知行, 刘智敏, 熊卫东

北京: 测绘出版社, 2017.1

ISBN 978-7-8030-4027-9

I. ①G... II. ①独... ②刘... ③熊... III. ①全球定位系统—数据处理—教材 IV. ①P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第332719号

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第332719号

责任编辑	封面设计	文字编辑	责任校对	责任印制	出版发行
010-88231883(编辑部)	010-88231883(发行部)	010-88231883(编辑部)	www.chinamap.com	新华书店	测绘出版社 北京西城区三里河路50号 邮编 100045 电子邮箱 chinamap@chinamap.com 印刷北京新华印刷有限公司 规格 184mm×260mm 印数 832 版次 2010年7月第1版 2017年1月第2版 印数 3001-3600
010-88231883(发行部)	010-88231883(发行部)	010-88231883(编辑部)	www.chinamap.com	新华书店	测绘出版社 北京西城区三里河路50号 邮编 100045 电子邮箱 chinamap@chinamap.com 印刷北京新华印刷有限公司 规格 184mm×260mm 印数 832 版次 2010年7月第1版 2017年1月第2版 印数 3001-3600

测绘出版社

·北京·

ISBN 978-7-8030-4027-9

加印数量问题, 请与本社发行部联系。

© 独知行 刘智敏 熊卫东 2017  
所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了 GPS 接收机的结构及分类、GPS 静态测量、RTK 和 CORS 的测量实施、操作方法及内业数据处理等内容;介绍了几种常用的接收机、电子手簿、数据处理软件的特点、使用方法等;以 GPS 控制测量项目为例,详细说明了进行 GPS 的技术设计、外业数据采集、内业数据处理的方法和步骤等;并进一步分析了在 GPS 控制测量、地形测绘、工程放样等工作及数据处理软件操作中出现的问题和解决方法。

本书可用于 GPS 测量工程的实践和教学,适用于高等学校的测绘工程、地理信息科学、遥感、土木工程、城市规划等相关专业的学生教学与实习,也可作为工程技术人员 GPS 测量实施和数据处理的培训教材及参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

GPS 测量实施与数据处理/独知行,刘智敏,熊卫东  
编著. —2 版. —北京:测绘出版社,2017.1  
ISBN 978-7-5030-4027-6

I. ①G… II. ①独… ②刘… ③熊… III. ①全球定位系统—测量—高等学校—教材②全球定位系统—数据处理—高等学校—教材 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 322719 号

责任编辑	巩 岩	封面设计	李 伟	责任校对	孙立新	责任印制	陈 超
出版发行	测绘出版社			电 话	010-83543956(发行部)		
社 址	北京西城区三里河路 50 号				010-68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010-68531363(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	184mm×260mm						
印 张	8.25			字 数	203 千字		
版 次	2010 年 7 月第 1 版 2017 年 1 月第 2 版			印 次	2017 年 1 月第 3 次印刷		
印 数	3001-3600			定 价	30.00 元		
书 号	ISBN 978-7-5030-4027-6						

如有印装质量问题,请与我社发行部联系。

# 修订说明

自2010年7月本书出版以来,受到广大读者的关爱,已被几所大学作为本科教学及实验实习的教材,同时也成为研究生及专业技术人员阅读的参考书。在此,向读者致以深切的谢意。

借此再版之际,对相关内容进行了修订更新:为了知识的系统性,增加了全球导航卫星系统的基本原理和方法;同时,本学科仍然处于迅速发展阶段,知识推陈出新、仪器更新换代速度快、规程规范不断修订,作者基于此力求不断增补、充实、调整、更新相关知识内容,也对几年来收集师生使用后的反馈意见,对书中存在的纰漏做了修正。欢迎同行专家、学者和广大读者批评指正。

本书以实务为主,力求做到深入浅出、即学即用,以满足测绘人员掌握GPS最新技术的实践需求及培训方法的需要。本书可用于GPS测量工程的实践和教学,适用于测绘工程、地理信息系统、遥感、土木工程、城市规划等相关专业的大学生教学。2016年10月于青岛  
技术人员进行GPS测量实施和数据处理的培训教材及参考用书。

本书的编写得到了南方测绘仪器公司济南分公司、北京壹格天空科技发展有限公司济南分公司的支持,武汉大学周卫明博士、山东科技大学阳凡林副教授等在本书编写过程中给予了诸多诚恳的建议,侯传岭、姜超、陈兰伟、马立斌、胡亚燕、刘尚等对绘图、文字修订等进行协助,在此一并致谢。由于作者的水平和经验有限,书中错误与不妥之处恳请同行专家、学者和广大读者批评指正。

作者

2016年4月于青岛

# 第一版前言

随着 GPS 技术的迅猛发展, GPS 已经广泛地应用到社会诸多领域中, 迫切需要关于 GPS 测量实施和数据处理方面的教科书或指导书。为此, 作者集多年 GPS 教学、实践和科研经验的知识积累, 结合 GPS 技术最新发展成果编著此书。

全书共分十章, 系统地阐述了 GPS 接收机的结构及分类、GPS 静态测量、RTK 和 CORS 的测量实施、操作方法及内业数据处理等内容; 介绍了几种常用的接收机、电子手簿、数据处理软件的特点、使用方法等; 以 GPS 控制测量项目为例, 详细说明了进行 GPS 技术设计、外业数据采集、内业数据处理的方法和步骤等; 进一步分析了在 GPS 控制测量、地形测绘、工程放样等工作及数据处理软件操作中出现的问题和解决方法。

本书以实用为主, 力求做到深入浅出、即学即用, 以满足测绘人员掌握 GPS 最新技术的发展态势及施测方法的需要。本书可用于 GPS 测量工程的实践和教学, 适用于高等学校的测绘工程、地理信息系统、遥感、土木工程、城市规划等相关专业的学生教学与实习, 也可作为工程技术人员进行 GPS 测量实施和数据处理的培训教材及参考用书。

本书的撰写得到了南方测绘仪器公司济南分公司、北京麦格天宝科技发展有限公司济南分公司的支持, 武汉大学唐卫明博士、山东科技大学阳凡林副教授等在本书编著过程中给予了诸多诚恳的建议, 狄桂栓、曾超、陈兰伟、马立斌、薛慧燕、刘鑫等对截图、文字修订等进行协助, 在此一并致谢。由于作者的水平和经验有限, 书中错误与不妥之处恳请得到同行专家、学者和广大读者批评指正。

作者

2010 年 4 月于青岛

第 1 章 GPS 接收机分类及产品	23
第 2 章 GPS 静态测量实施	31
§ 2.1 仪器配置	32
§ 2.2 测前实施	33
§ 2.3 数据处理流程	41
§ 2.4 静态测量操作	47
第 3 章 数据管理软件使用	53
§ 3.1 几种数据处理软件介绍	53
§ 3.2 TBC 软件使用	56
§ 3.3 HGO 软件使用	87
第 4 章 GPS RTK 测量与实施	94
§ 4.1 RTK 测量系统组成	94
§ 4.2 电子手簿示数——以天宝测量控制软件为例	94
§ 4.3 RTK 测量实施方法——以天宝 RTK 为例	95

国家自然科学基金项目(41274006)

青岛市博士后研究人员应用研究项目(2015186)

山东科技大学“空间大地测量”科研创新团队(2014TDJH101)

山东科技大学优秀教学团队建设计划(JXTD20160502)

RTK	real-time kinematic	实时差分定位	RTK
SA	selective availability	选择性可用性	SA
SPS	standard positioning service	标准定位服务	SPS
TEC	total electron content and quality indicator	电离层总电子含量及质量指示器	TEC
TGO	Triplix geomatics office	三普大地测量公司	TGO
TR	Triplix business center	三普商务中心	TR
URA	user range accuracy	用户测距精度	URA
USNO	United States Naval Observatory	美国海军天文台	USNO
UTC	coordinated universal time	协调世界时	UTC
VRS	virtual reference station	虚拟参考站	VRS
WAAS	wide area augmentation system	广域增强系统	WAAS
RTS	real-time system	实时系统	
CVA	carrier wave amplitude modulation	载波幅度调制	
TA	total accuracy	总精度	
CLMA	carrier wave amplitude modulation	载波幅度调制	
CODE	Code for Earth Observation in Europe	欧洲地球观测代码	
CODES	carrier wave amplitude modulation	载波幅度调制	
CPU	central processing unit	中央处理器	
DOBS	Deep Ocean Pressure and Radi. Observing Instrument	深海压力辐射观测仪	
DTM	digital terrain model	数字地形模型	
ECNIN	European navigation satellite system	欧洲导航卫星系统	
EASA	European Space Agency	欧洲航天局	
FDMA	frequency division multiple access	频分多址	
FM	frequency modulation	频率调制	
GLONASS	Global Navigation Satellite System	全球导航卫星系统	
GNSS	global navigation satellite system	全球导航卫星系统	
GPS	Global Positioning System	全球定位系统	
GPFS	general packet radio service	通用分组无线服务	
GSN	global system of mobile communication	全球移动通信系统	
HGO	high-precision geomatics office	高精度大地测量公司	
IGS	International GNSS Service	国际地球参考框架维持系统	
IGSO	inclined geosynchronous orbit	倾斜地球同步轨道	
IA	initial operational capability	初期工作能力	
ITRI	International Technical Research Institute	国际技术研究中心	
JPL	Jet Propulsion Laboratory	喷气推进实验室	
MEO	medium earth orbit	中地球轨道	
NASA	National Aeronautics and Space Administration	美国国家航空航天局	
NAVSTAR	navigation system using satellite	导航卫星系统	
NMEA	national marine electronics association	国家海洋电子协会	
NNSS	Nav Navigation Satellite System	导航卫星系统	
ODBC	open database connectivity	开放数据库连接	
OTF	open text format	开放文本格式	
PLAP	positioning accuracy of precision	定位精度或精度因子	
PPS	precise positioning service	精密定位服务	
PRN	pseudo-random noise	伪随机噪声	
RAM	random access memory	随机存取存储器	
RAIM	receiver autonomous integrity monitoring	用户自主完好性监测	

# 第 1 目 录 论

<b>第 1 章 绪 论</b> .....	1
§ 1.1 GNSS 发展史 .....	1
§ 1.2 其他全球导航卫星系统 .....	4
<b>第 2 章 GPS 信号及卫星位置计算</b> .....	9
§ 2.1 GPS 信号 .....	9
§ 2.2 GPS 信号的调试与解调 .....	11
<b>第 3 章 GPS 定位模型</b> .....	16
§ 3.1 GPS 测码伪距定位 .....	16
§ 3.2 GPS 测相伪距定位 .....	18
§ 3.3 单点定位 .....	18
§ 3.4 相对定位 .....	20
§ 3.5 网络 RTK 技术 .....	22
<b>第 4 章 GPS 接收机</b> .....	25
§ 4.1 接收机构成 .....	25
§ 4.2 接收机分类及产品 .....	28
<b>第 5 章 GPS 静态测量实施</b> .....	32
§ 5.1 测前准备 .....	32
§ 5.2 测量实施 .....	40
§ 5.3 数据处理流程 .....	44
§ 5.4 静态测量操作 .....	47
<b>第 6 章 数据处理软件使用</b> .....	53
§ 6.1 几种数据处理软件介绍 .....	53
§ 6.2 TBC 软件使用 .....	55
§ 6.3 HGO 软件使用 .....	87
<b>第 7 章 GPS RTK 测量与实施</b> .....	94
§ 7.1 RTK 测量系统组成 .....	94
§ 7.2 电子手簿介绍——以天宝测量控制器为例 .....	94
§ 7.3 RTK 测量实施方法——以天宝 5800 为例 .....	95

# 目 录

§ 7.4	工程放样 .....	104
§ 7.5	地形图绘制 .....	108
<b>第 8 章 CORS 测量与实施 .....</b>		
§ 8.1	网络实时动态相对定位方法分类 .....	109
§ 8.2	CORS 系统数据流程 .....	111
§ 8.3	测量实施方法 .....	112
§ 8.4	CORS 测点正常高计算 .....	120
<b>参考文献 .....</b>		121
<b>专业术语索引 .....</b>		122



# 第 1 章 绪 论

全球导航卫星系统(GNSS)泛指所有的卫星导航系统,包括全球的、区域的和增强的,如美国的全球定位系统(GPS)、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 Galileo、中国的北斗卫星导航系统(BDS),以及相关的增强系统,即美国的广域增强系统(WAAS)、欧洲静地导航重叠系统(EGNOS)和日本的多功能运输卫星增强系统(MSAS)等,还涵盖在建和以后要建设的其他卫星导航系统。

鉴于 GPS 技术从接收机到数据处理软件已经发展较成熟,已作为先进的测量手段和新的生产力融入国民经济建设和社会发展的各个应用领域,因此本书在介绍其他 GNSS 发展外,以 GPS 为主进行测量实施。

## § 1.1 GNSS 发展史

### 1.1.1 子午卫星导航系统及其不足

1957 年 10 月,世界上第一颗人造地球卫星的发射成功成为卫星定位技术的开端。美国约翰霍普金斯大学应用物理实验室的吉尔博士和魏芬巴哈博士指出,利用地面跟踪站上的多普勒测量资料可以精确确定卫星轨道;在应用物理实验室工作的麦克卢尔博士和克什纳博士则指出,对一颗已被精确确定的卫星进行多普勒测量可以获得用户的位置。这为子午卫星系统的诞生奠定了基础。

1958 年 12 月,在克什纳博士的领导下,应用物理实验室研发了海军导航卫星系统(NNSS),用于美国海军对潜艇的惯性导航系统的辅助导航,从而削弱惯性导航的积累误差影响。该研究的主要工作是研制子午卫星、建立地球重力场模型、研制多普勒接收机。

1964 年 1 月,NNSS 正式建成投入军用,由卫星网、监测站、接收机三部分组成。卫星网共 6 颗子午卫星,分别在 6 个轨道面上并都通过地球南北极,卫星平均高度 1 075 km,单点定位精度为几十米,联测定位精度为 0.5~1 m;全天候观测,数据处理为事后处理。

1967 年 7 月,美国政府批准该系统解密,并提供民用,用户数量激增,最终达到 950 00 多家,而军方只有 650 家,不足 1%。由于该系统克服了传统测量的局限性,如不受气候影响、自动化程度高、具有良好的三维定位精度,在大地测量界也引起了极大关注。

同时,该系统也存在以下不足:

(1) 卫星少,不能实时定位。子午卫星导航系统采用 6 颗卫星,两次卫星通过的时间间隔约为 0.8~1.6 小时,无法进行实时定位。

(2) 轨道低,难以精密定轨。子午卫星飞行高度平均为 1 075 km,运动速度快,受地球非中心引力、大地阻力等摄动力影响大,定轨精度低。

(3) 频率低,难以补偿电离层效应的影响。子午卫星的射电频率分别为 400 MHz 和 150 MHz,难以削弱电离层效应的高阶项影响,使卫星多普勒定位精度局限在米级。

总之,用 NNSS 无法实现连续、实时、厘米级定位,因此其应用受到了较大限制。随之,第二代的卫星导航定位系统——GPS 便应运而生。

### 1.1.2 GPS 的建立与系统构成

1973 年 12 月,美国国防部批准陆海空三军联合研制新的卫星导航系统——卫星时距导航系统/全球定位系统(NAVSTAR/GPS)。该系统是以卫星为基础的无线电导航定位系统,具有全天候、全球性、连续性、实时性的陆海空导航、定位、授时功能,为用户提供高精度的三维坐标、速度、时间。

经历了 1974 年至 1978 年的方案论证、1979 年至 1987 年的系统论证、1988 年至 1993 年的试验生产三个阶段,1993 年 7 月,进入轨道可正常工作的试验卫星和工作卫星总和达到 24 颗,GPS 已具备了全球连续导航定位能力。

1993 年 12 月 8 日美国国防部正式宣布 GPS 已具备初步工作能力(IOC),系统进入了正常运行阶段。

1995 年 4 月 27 日美国空军空间部宣布全球定位系统已具有完全工作能力(FOC),系统进入预定轨道的正常工作卫星已达 24 颗。

GPS 由卫星星座、地面监控站、用户接收机三部分构成。卫星星座基本参数是:卫星轨道面为 6 个,卫星高度平均约为 20 200 km,轨道面倾角  $55^\circ$ ,卫星颗数 24,运行周期为 11 小时 58 分钟,载波频率为 1 575.42 MHz、1 227.60 MHz、1 176.45 MHz(第三代开始添加的第三民用频率),全球覆盖率达到 98%。与 NNSS 的参数对比如表 1.1 所示,可知 GPS 弥补了 NNSS 的三个不足,具有可实时性、高精度定轨和去电离层折射影响后的高精度定位结果。

表 1.1 GPS 与 NNSS 的参数对比

参数	GPS	NNSS
载波频率/MHz	1 575,1 227	400,150
卫星数/颗	21+3	6
轨道平面上卫星数/颗	4(不均匀分布)	1(均匀分布)
轨道数/个	6	6
轨道倾角/ $^\circ$	55	近 90
距地距离/km	20 200	1 075

地面监控站部分由主控站、监测站、注入站组成,整个 GPS 设立了 17 个监测站,全球均匀分布,其中 6 个为美国空军的监测站,分别位于科罗拉多斯普林斯、卡纳维拉尔角、夏威夷、阿森松岛、迭戈加西亚和夸贾林;11 个国家及地区地球空间信息局,分别位于美国海军天文台、英国、阿根廷、厄瓜多尔、巴林、澳大利亚、美国阿拉斯加、韩国、南非、新西兰和法属塔西提岛。同时,考虑战争发生时,地面监控站被敌方摧毁导致 GPS 失效,故为了减少对地面监控站的依赖程度,第三代卫星 Block II R 开始增加卫星之间的伪距测量、多普勒测量、相互通信能力,可以使 180 天星历的用户测量精度(URA)仍达到 6 m 的水平,大大增加了 GPS 自主导航能力。

### 1.1.3 美国政府的 GPS 政策

在 GPS 研制组建阶段,大量实验结果表明,即使使用 C/A 码进行导航定位也能达到士(15~40)m 的精度。考虑 GPS 在军事上的巨大应用潜力,为防止敌方利用 GPS 危害美国的国家安全,美国政府分别实施了选择可用性(SA)政策和反欺骗(AS)政策,这对精密定位服务(PPS)用户而言,是没有任何不良影响的,实施前后定位精度不变。

美国国防部从 1991 年 7 月 1 日开始实施 SA 政策,其主要内容是在 GPS 工作卫星的广播星历中人为加入误差,降低卫星星历的精度,称为  $\epsilon$  技术;同时使卫星钟频产生一种快速变化,从而降低钟的稳定度,达到降低导航定位精度的目的,称为  $\delta$  技术。

实施 SA 政策后,未经美国政府授权的标准定位服务(SPS)用户的精度(置信度为 95%)降低为:平面位置为士 100 m,高程为士 156 m,速度为士 0.3 m/s,时间为士 340 ns。SPS 用户可以采用差分技术削弱 SA 政策对定位精度的影响。在 2000 年 5 月 2 日凌晨,美国政府取消了限制民用精度的 SA 政策,仅在局部或个别卫星上实施 SA 技术。

1994 年 1 月 31 日美国国防部为防止敌方对 GPS 信号的电子欺骗和电子干扰而采取了 AS 政策。其具体措施就是在 P 码上加上严格保密的 W 码,使其模二相加产生完全保密的 Y 码。AS 政策虽然是一种防卫性措施,但客观上限制了广大 SPS 用户使用 Y 码的可能性,无法获得高精度的测码伪距,不但降低了导航定位精度,也增加了测相伪距数据处理的难度。近年来,一般 SPS 用户通过采用 Z 跟踪技术利用 P 码进行测距,克服 AS 政策所造成的消极影响。

### 1.1.4 GPS 现代化

1999 年 1 月 25 日美国副总统戈尔提出了 GPS 现代化计划,简称 3P 计划。

(1)保护(protection),即 GPS 现代化是为了更好地保护美方和友好方的使用,要发展军码和强化军码的保密性能,加强抗干扰能力。

(2)阻止(prevention),即阻挠敌对方的使用,施加干扰,施加 SA、AS 政策等。

(3)改善(preservation),即在有威胁地区以外,使民用用户有更精确、更安全的使用,增加第三民用频率等。

美国军方采取了 4 项 GPS 现代化的技术措施。

(1)增加 GPS 卫星发射的信号强度,以增加抗电子干扰能力。

(2)在 GPS 信号频道上,增加新的军用码(M 码),与民用码分开。M 码有更好的抗破译的保密和安全性能。

(3)军用接收设备比民用设备有更好的保护装置,其抗干扰能力和快速初始化功能更强。

(4)创造新的技术,以阻止和阻挠敌方使用 GPS。

美国为满足民用导航、定位、大气探测等方面的需求,采取了 5 项 GPS 现代化的技术措施。

(1)改善民用导航和定位的精度。

(2)扩大服务的覆盖面和改善服务的持续性。

(3)提高导航的安全性(integrity),如增强信号功率、增加导航信号和频道。

(4)保持 GPS 在全球各种定位系统中技术和销售的领先地位。

(5)注意与现有的和将来的民用其他空间导航系统的匹配和兼容。

## § 1.2 其他全球导航卫星系统

### 1.2.1 俄罗斯全球导航卫星系统

#### 1. GLONASS 的建立与系统构成

20 世纪 70 年代, GLONASS 由苏联国防部在总结第一代卫星导航系统 CICADA 的基础上, 构想了 GLONASS, 自 1982 年 10 月 12 日开始发射第二代导航卫星系统。于 1996 年 1 月 18 日完成设计卫星数(24 颗), 并开始整体运行。GLONASS 的主要作用是实现全球、全天候的实时导航、定位及全球时间传递。目前, GLONASS 由俄罗斯负责。

在 20 世纪 80 年代, 除了卫星轨道的一般特征和传送导航信息的频率之外, 苏联国防部未披露其他信息。1993 年, 随着苏联的解体, 俄罗斯政府正式将 GLONASS 交由俄罗斯空军负责 GLONASS 的航天器部署及在轨维护。1995 年 11 月 4 日, 在加拿大蒙特利尔国际民用航空组织第二次会议上, 俄罗斯将其最新版本的界面控制文件交给大会的导航卫星系统讨论组。自此, 有关 GLONASS 的信息越来越明朗。GLONASS 在系统组成和工作原理上与 GPS 十分相似, 也分为空间卫星、地面监控和用户设备三部分。

(1) 空间卫星部分。空间卫星部分由 24 颗 GLONASS 卫星组成, 其中工作卫星 21 颗, 在轨备用卫星 3 颗, 均匀地分布在 3 个轨道面上。3 个轨道面互成  $120^\circ$  夹角, 每个轨道上均匀分布 8 颗卫星, 轨道高度约 19 100 km, 轨道偏心率为 0.01, 轨道倾角为  $64.8^\circ$ 。这样的分布可以保证地球上任何地方在任意时刻都能收到至少 4 颗卫星的信号, 为用户的导航定位提供保障。每颗 GLONASS 卫星上都装备着稳定度的铯原子钟, 并接收地面控制站的导航信息和控制指令。星载计算机对其中的导航信息进行处理, 生成导航电文向用户广播, 控制信息则用于控制卫星在空间的运行。

(2) 地面监控部分。地面监控部分实现对 GLONASS 卫星的整体维护和控制, 包括系统控制中心(位于莫斯科的戈利岑诺(Geolisyno))和分散在俄罗斯整个领土上的跟踪控制站网。地面控制设备负责搜集、处理 GLONASS 卫星的轨道和信号信息, 并向每颗卫星发射控制指令和导航信息。

(3) 用户设备部分。用户通过 GLONASS 接收机接收 GLONASS 卫星信号, 并测量其伪距或载波相位, 同时结合卫星星历进行必要的处理, 便可得到用户的三维坐标、速度和时间。

GLONASS 的广播星历是直接给出参考历元的卫星位置、速度及日月的摄动加速度, 每隔 30 分钟更新一组星历参数, 精度通常为  $\pm 12$  m, 通常用 4 阶的龙格-库塔(Runge-Kutta)法进行数值积分求解卫星受摄运动方程, 而 GLONASS 精密星历精度则优于  $\pm 15$  cm。

#### 2. GLONASS 与 GPS 对比

GLONASS 定位的原理也是距离后方交会。GLONASS 卫星在任意时刻的位置可以通过卫星星历计算出来, 理论上, 只要知道用户到 4 颗卫星的距离, 便可计算出用户的位置和接收机钟差。

GLONASS 卫星同时发射粗码(C/A 码)和精码(P 码), C/A 码用于向民间提供标准定位, 而 P 码用于俄罗斯军方高精度定位或科学研究。

GLONASS 与 GPS 除了采用不同的时间系统和坐标系统以外, 二者最大区别是: 所有

GPS 卫星的信号发射频率是相同的,而不同的 GPS 卫星发射的伪随机噪声(PRN)码是不同的,用户以此来区分卫星,称为码分多址(CDMA);而所有 GLONASS 卫星发射的伪随机噪声码是相同的,不同卫星的发射频率是不同的,用以区分不同的卫星,称为频分多址(FDMA)。另外,与 GPS 不同,GLONASS 没有任何人为降低定位精度的措施。两系统的参数对比如表 1.2 所示。

表 1.2 GPS 与 GLONASS 的参数对比

参数	GPS	GLONASS
卫星数/颗	21+3	21+3
轨道平面上卫星数/颗	4(不均匀分布)	8(均匀分布)
轨道数/个	6	3
轨道倾角/(°)	55	64.8
轨道半轴/km	26 560	25 510
运行周期	11 小时 58 分钟	11 小时 15 分钟
地面跟踪重复周期	1 个恒星日	8 个恒星日
码速率/MHz	P 码:10.23 C/A 码:1.023	P 码:5.11 C/A 码:0.511
码元宽度/m	P 码:29.3 C/A 码:293	P 码:58.7 C/A 码:587
码长度/bits	P 码: $6.187\ 104 \times 1\ 012$ C/A 码:1 023	P 码: $5.11 \times 106$ C/A 码:511
主帧电文重复率/分钟	12.5	2.5
P 码保密	有	无
信号区分法	CDMA	FDMA
载波频率/MHz	L1:1 575.42 L2:1 227.60	L1: $1\ 602 + 0.562\ 5 \times k$ ( $1 < k < 24$ ) L2: $1\ 246 + 0.437\ 5 \times k$ ( $1 < k < 24$ )
时间参考系	UTC(USNO)	UTC(SU)
坐标系	WGS-84	PZ-90

### 3. GLONASS 的发展

目前,GLONASS 正在全面部署在轨卫星,截至 2012 年 12 月 26 日,星座上共有 29 颗卫星,其中 24 颗工作卫星。北京地区观测到的 GLONASS 卫星数介于 6~10 颗之间,可以实现全天应用。GLONASS 在高纬度地区的位置精度衰减因子(PDOP)值较小,其系统可用性明显优于低纬度地区;在中国地区,GLONASS 的 PDOP 值介于 1~3 之间,完整可用性接近 100%。

与老旧的 GLONASS 卫星相比,GLONASS-M 虽然仍沿用了 GLONASS 卫星的加压、密封式结构,但做了许多新的改进,包括:使星载电子设备性能更优、寿命更长,增加了 L2 的民用信号,改善了导航电文等。

2011 年 2 月,首颗 GLONASS-K1 卫星在发送 L1、L2 频段的 FDMA 信号的同时,还在 L3 频段上发送了 GLONASS 首个 CDMA 信号 L3OC,这是 GLONASS 导航信号现代化发展战略的第一步;2011 年年底再次实现了满星座运行。GLONASS-K2 是 GLONASS-K1 卫星

的改进型号,将再增加 3 个 CDMA 信号,即民用信号 L1OC、军用信号 L1SC 和 L2SC。

此外,俄罗斯正在研制的 GLONASS-KM 卫星增加了 L5 载波,载波频率为 1 176.45 MHz,该卫星的 CDMA 信号达到了 8 个,于 2015 年首次发射。为了维持系统的在轨卫星数目,到 2020 年间,GLONASS 系统将拥有 13 颗 GLONASS-M 卫星及 22 颗新一代的 GLONASS-K 卫星。

GLONASS 在通过卫星的更迭不断改善卫星性能、功能和寿命的同时,也在进行着地面控制区段的现代化改造:一是改进地面站的设备(包括软、硬件及时间保持系统等),二是增加地面站数量。新的地面控制段现代化改造计划将再增加 6 个地面监测站。此外,俄罗斯还在本国境内及世界各地建设大量的差分站,从而支持其差分校正和监测系统(SDCM)的部署。

随着 GLONASS 的全面应用,GPS/GLONASS 接收机的生产和使用也被广泛普及,其主要优势在于:

(1)用户可同时接收的可见卫星的数目约增加 1 倍,因而可以明显改善观测卫星的几何配置,提高定位的精度。

(2)利用两个独立的卫星定位系统,可大大提高导航的可靠性与安全性。

(3)由于可见卫星数目增加,在一些卫星被遮挡的情况下,也能进行正常的导航和测量,这对于城市测量与城市交通管理与监控极为重要。

(4)可有效地削弱美国、俄罗斯两国对各自定位系统的可能限制,保障用户利用导航系统的安全性及可靠性。

## 1.2.2 北斗卫星导航系统

### 1. 北斗卫星导航系统构成与发展现状

我国正在建设北斗卫星导航系统,该系统是中国独立发展、自主运行的全球卫星导航与通信系统,是继美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧盟的 Galileo 之后,又一全球卫星导航系统。

北斗卫星导航系统由空间卫星、地面监控和用户三部分组成,用户段由北斗用户终端及与美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧洲 Galileo 等卫星导航系统兼容的终端组成;地面段包括主控站、注入站和监测站等若干个地面站;空间部分由卫星星座构成,不同的卫星导航系统在卫星星座选择上有所不同。GPS 与 GLONASS 都由中圆地球轨道(MEO)卫星构成。卫星导航系统空间端包括 35 颗卫星,由 5 颗地球静止轨道(GEO)卫星、27 颗中圆地球轨道卫星、3 颗倾斜地球同步轨道卫星(IGSO)构成。至 2012 年年底北斗亚太区域导航正式开通时,北斗二代在西昌卫星发射中心已发射卫星 16 颗,可用卫星 14 颗,5 颗地球静止轨道卫星定点位置为东经 58.75°、80°、110.5°、140°、160°,5 颗倾斜地球同步轨道卫星均在倾角 55°的轨道面上,4 颗中圆地球轨道卫星均在倾角 55°的轨道面上,如表 1.3 所示。

北斗二代系统提供两种服务方式:开放服务和授权服务。开放服务是在服务区免费提供定位、测速和授时服务,定位精度为 10 m,授时精度为 50 ns,测速精度为 0.2 m/s。授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务及系统完好性信息。根据系统建设总体规划,北斗系统计划三步走:①2000 年建成北斗卫星导航试验系统,使中国成为世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家;②建设北斗卫星导航系统,2012 年 12 月已具备覆盖亚太地区的定位、导航和授时及短报文通信服务能力;③2020 年左右,系统形成全球覆盖能力。目前,北斗卫星导航系统已走到第三步,2016 年 6 月又成功发射了第 23 颗新一代北斗导航卫星。

表 1.3 北斗卫星导航系统卫星星座现状

日期	火箭	卫星	轨道	运行状况	系统世代
2000-10-31	CZ-3A Y5	北斗-1A	废弃卫星轨道	停止工作	北斗一代
2000-12-21	CZ-3A Y6	北斗-1B	废弃卫星轨道	停止工作	
2003-5-25	CZ-3A Y7	北斗-1C	地球静止轨道 85.3°E	正常	
2007-2-3	CZ-3A Y12	北斗-1D	废弃卫星轨道	失效	
2007-4-14	CZ-3A Y13	北斗-M1	中圆地球轨道~21 500 km	测试星未使用	北斗二代
2009-4-15	CZ-3C Y3	北斗-G2	地球静止轨道 110°E	失效未使用	
2010-1-17	CZ-3C Y2	北斗-G1	地球静止轨道 140°E	正常	
2010-6-2	CZ-3C Y4	北斗-G3	地球静止轨道 84°E	正常	
2010-8-1	CZ-3A Y16	北斗-II	倾斜地球同步轨道倾角 55°	正常	
2010-11-1	CZ-3C Y5	北斗-G4	地球静止轨道 160°E	正常	
2010-12-18	CZ-3A Y18	北斗-I2	倾斜地球同步轨道倾角 55°	正常	
2011-4-10	CZ-3A Y19	北斗-I3	倾斜地球同步轨道倾角 55°	正常	
2011-7-27	CZ-3A Y17	北斗-I4	倾斜地球同步轨道倾角 55°	正常	
2011-12-2	CZ-3A Y23	北斗-I5	倾斜地球同步轨道倾角 55°	正常	
2012-2-25	CZ-3C Y6	北斗-G5	地球静止轨道 58.5°E	正常	北斗三代
2012-4-30	CZ-3B Y14	北斗-M3	中圆地球轨道~21 500 km	正常	
2012-4-30	CZ-3B Y14	北斗-M4	中圆地球轨道~21 332 km	正常	
2012-9-19	CZ-3B Y15	北斗-M5	中圆地球轨道~21 332 km	正常	
2012-9-19	CZ-3B Y15	北斗-M6	中圆地球轨道~21 332 km	正常	
2012-10-25	CZ-3C Y	北斗-G6	地球静止轨道 110.5°E	正常	
2016-3-29	CZ-3A	北斗-IGSO6	倾斜地球同步轨道倾角 55°	正常	
2016-6-12	CZ-3C	北斗-II	地球静止轨道	正常	
2015-3-30	CZ-3C	北斗-II-S	倾斜地球同步轨道倾角 55°	正常	
2015-7-25	CZ-3B	北斗-M1-S	中圆地球轨道~21 332 km	正常	
2015-7-25	CZ-3B	北斗-M2-S	中圆地球轨道~21 332 km	正常	
2015-9-30	CZ-3B	北斗-I2-S	倾斜地球同步轨道倾角 55°	正常	
2016-2-01	CZ-3C	北斗-M3-S	中圆地球轨道~21 332 km	正常	

## 2. 北斗卫星导航系统与 GPS 对比

与目前世界上被广泛使用的 GPS 相比,北斗卫星导航系统在未来的设计应用上主要存在三大难点:

(1) 卫星钟。如果要保持卫星导航的高精度,卫星上必须配有高稳定性、高精度的原子钟,在原子钟的技术精度和稳定性上,我国和美国还有差距,需要更多的研究进行自主研发。

(2) 地面监控站分布的全球性。美国实现了在全球范围内布控卫星监控网络,这是由美国拥有雄厚的经济实力,并掌握着其他国家难以企及的战略资源决定的。中国的地面监控站除了在本国陆地及沿海布网外,已逐步增加在其他国家地区设站布网,这对于卫星的测控和维护将提供更有利的发展。

(3) 太阳光压改正数学模型。GPS 在问世的近 30 年时间里积累了大量的空间实验数据,根据太阳光压变化对于卫星所产生影响的数据,GPS 已经建立了精度很高的数据模型。而中国的北斗卫星导航系统还处于起步阶段,需要在摸索中前进。

### 1.2.3 Galileo 卫星导航系统

#### 1. 建设中的 Galileo 卫星导航系统

为了能在卫星导航领域中占有一席之地,欧洲认识到建立拥有自主知识产权的卫星导航系统的重要性。同时,在欧洲一体化的进程中,建立欧洲自主的卫星导航系统将会全面加强欧盟诸成员国间的联系和合作。在这种背景下,欧盟决定启动一个军民两用的、与现有的卫星导航系统相兼容的全球卫星导航计划——Galileo 计划。

欧盟在 1999 年 2 月首次提出 Galileo 计划,是世界上第一个基于民用的全球卫星导航系统,服务范围覆盖全球,可以提供导航、定位、时间、通信等服务。

Galileo 系统计划发射 30 颗卫星,其中 27 颗卫星为工作卫星,3 颗为候补卫星。空间段的 30 颗卫星均匀分布在 3 个中高度圆形地球轨道上,轨道高度为 23 616 km,轨道倾角为  $56^\circ$ ,轨道升交点在赤道上相隔  $120^\circ$ ,卫星运行周期为 14 小时,每个轨道面上有 1 颗备用卫星。其服务方式包括开放服务、商业服务、官方服务。该系统可以发送实时的高精度定位信息,这是现有的卫星导航系统所没有的,同时也能够保证在许多特殊情况下提供服务,如果失败也能在几秒内通知客户。

#### 2. Galileo 与 GPS 对比

与美国的 GPS 相比,建成后的 Galileo 系统将具备至少三方面优势:首先,其覆盖面积将是 GPS 的 2 倍,可为更广泛的人群提供服务;其次,其地面定位误差不超过 1 m,而 GPS 仅为 10 m;最后,Galileo 系统使用多种频段工作,在民用领域比 GPS 更经济、更透明、更开放。

#### 3. Galileo 系统发展现状与前景

Galileo 计划于 2008 年开始运营,实际上,由于诸多原因 Galileo 计划的实施一再拖延。

2011 年 10 月 21 日,首批 2 颗卫星从位于法属圭亚那的库鲁航天中心成功发射升空。2012 年 10 月,第 3 颗和第 4 颗 Galileo 在轨验证卫星搭乘“联盟”火箭发射升空。这 4 颗 Galileo 卫星组成初步网络,定位于距地 23 222 km 高的中地球轨道。

2014 年 8 月 22 日,Galileo 全球卫星导航系统第三批 2 颗卫星从法属圭亚那发射升空,未能进入预定轨道。2015 年 3 月 27 日,由“联盟”火箭在法属圭亚那成功发射第 7、第 8 两颗 Galileo 系统的全面工作能力阶段卫星,这是“联盟”火箭在库鲁航天中心的第 11 次发射,是上次送入错误轨道后首次恢复执行 Galileo 卫星部署任务。

欧盟预计 2020 年完成 30 颗卫星发射组网。Galileo 系统一旦完成,不仅能使人们的生活更加方便,还将为欧盟的工业和商业带来可观的经济效益。更重要的是,欧盟将从此拥有自己的全球卫星导航系统,这有助于打破美国 GPS 的垄断地位,从而在全球高科技竞争中获取有利地位,更可为将来建设欧洲独立防务创造条件。

可以预测,在 2020 年左右将出现四大卫星导航系统并存的情况,共有 100 多颗卫星在空中为全球的民众提供卫星导航服务。这种局面的出现使卫星导航系统领域的竞争异常激烈,技术和性能领先的系统将成为主导,而技术和性能落后的系统将被逐渐边缘化。对全人类来说,这是巨大的福祉,人们的生活将变得更加便利。



## 第 2 章 GPS 信号及卫星位置计算

GPS 卫星定位测量是通过对用户接收机接收的 GPS 卫星信号进行处理和计算,从而解算出测站点的三维坐标。用户通过接收机接收 GPS 卫星发播的信号,根据接收的卫星星历信息,就可以计算卫星的空间位置。

### § 2.1 GPS 信号

GPS 信号是 GPS 卫星上的振荡器所产生的信号。GPS 卫星发射的信号主要分为载波、测距码和导航电文三部分,如图 2.1 所示。

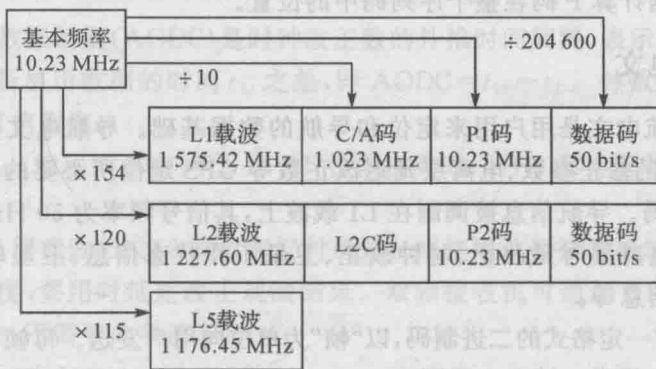


图 2.1 GPS 卫星信号示意

#### 2.1.1 载波信号

载波信号的作用是搭载其他信号,在无线电通信中为有效地传播信息,一般将频率较低的信号加载到频率较高的载波上,此时频率较低的信号称为调制信号。GPS 卫星采用两种不同频率的电磁波作为信号载波,它们均位于微波的 L 波段,分别称为 L1 载波和 L2 载波。载波信号是一种高频信号,其频率为卫星上原子钟所产生的基本频率  $f_0$  的整数倍,  $f_0 = 10.23$  MHz。L1 载波的频率为基本频率的 154 倍,即 1 575.42 MHz,波长  $\lambda_1$  为 19.03 cm, L2 载波的频率为基本频率的 120 倍,即 1 227.60 MHz,波长  $\lambda_2$  为 24.42 cm。现代化后,增加 L5 载波,频率为基本频率的 115 倍,即 1 176.45 MHz,波长  $\lambda_5$  为 25.48 cm。

采用 L 波段的高频率载波可以较为精确地测定多普勒频移和载波相位,提高测速和定位精度。使用两个频率还可以测定电离层延迟。

#### 2.1.2 测距码

GPS 卫星的测距码有两种,都属于二进制伪随机噪声码,主要包括 C/A 码和 P 码。C/A 码是进行粗略测距和捕获 P 码的粗码,也称捕获码。周期  $T_u$  仅为 1 ms,一个周期