

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 高等学校测绘工程专业核心教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

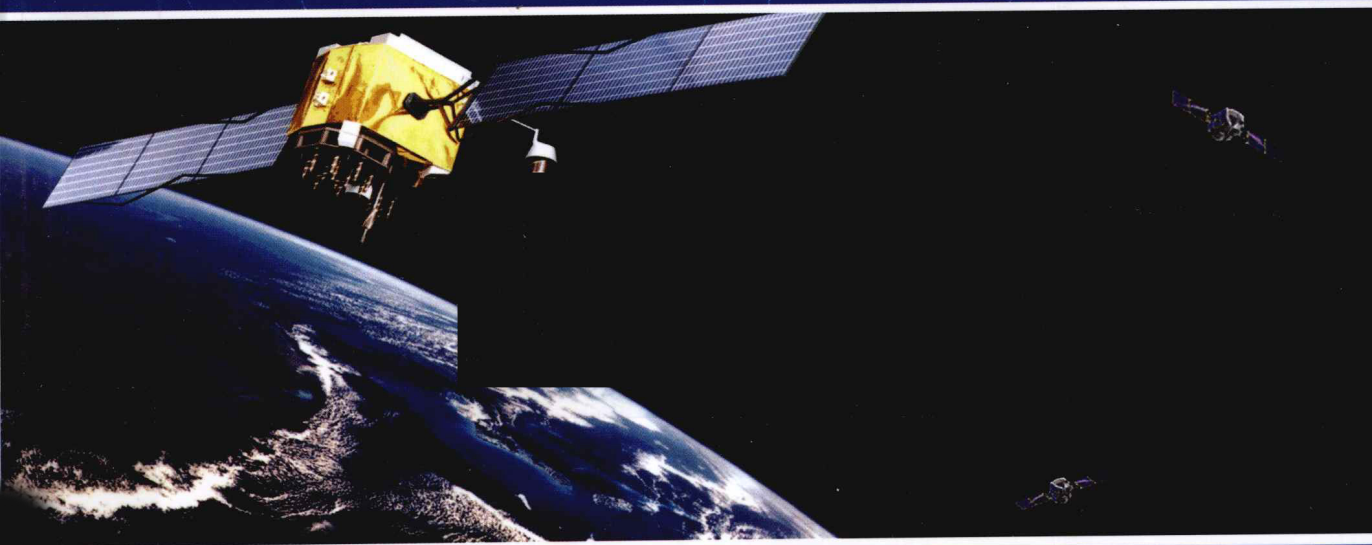
国家精品课程教材

(第二版)

# GPS 测量与数据处理

GPS Surveying and Data Processing

李征航 黄劲松 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家精品课程教材

高等学校测绘工程专业核心教材

# GPS测量与数据处理

GPS Surveying and Data Processing

( 第二版 )



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

GPS 测量与数据处理/李征航,黄劲松编著. —2 版. —武汉:武汉大学出版社,2010.9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家精品课程教材

高等学校测绘工程专业核心教材

ISBN 978-7-307-08160-4

I. G… II. ①李… ②黄… III. ①全球定位系统(GPS)—测量学—高等学校—教材 ②全球定位系统(GPS)—数据处理—高等学校—教材  
IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 170968 号

责任编辑:任翔      责任校对:刘欣      版式设计:支笛

---

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:湖北恒泰印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:23.5 字数:564千字

版次:2005年3月第1版      2010年9月第2版

2010年9月第2版第1次印刷

ISBN 978-7-307-08160-4/P·175      定价:38.00元

---

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

# 第一版前言

全球定位系统在交通、运输、测绘、通信、军事、石油勘探、资源调查、农林渔业、时间比对、大气研究、气象预报、地质灾害的监测和预报等部门和领域中有广泛的应用前景。全球定位系统的出现使导航技术和定位技术产生了一场深刻的变革,促进了相关行业的整体技术进步。因而 GPS 导航定位技术已成为高等学校各相关专业中的一门重要课程。

自 20 世纪 70 年代起,我院(系)就紧跟学科发展前沿,用空间大地测量技术对原专业进行改造和建设,对旧的课程体系进行了大规模的调整。在培养具有新的知识结构的符合社会需要的大批人才的同时,我院(系)还承担了大量的科研项目和科技开发(生产)项目,将一个逐渐老化且生源和需求都严重不足的老专业改造建设成为一个欣欣向荣、充满活力的用高新技术武装起来的新专业。“跟踪学科发展前沿,改造和建设大地测量专业的研究和实践”获湖北省和国家教学成果一等奖。目前,“GPS 测量原理及其应用”不仅是武汉大学测绘学院、遥感信息工程学院、资源和环境学院中相关专业的必修课程,而且也成为面向全校的一门公选课。

本书是武汉大学“十五”规划教材,其内容涵盖“GPS 测量原理及其应用”(省级优质课程)和“GPS 数据处理”两门课程。根据我们的经验,这两门课程的难点为:载波相位测量的原理,观测值的线性组合,周跳的探测修复,整周模糊度的确定以及网平差(无约束平差、约束平差、联合平差)等内容,因此本教材对这些问题作了较为详细的阐述。考虑到卫星导航定位系统正处于迅速发展和变革的时期,所以在教材中对 GLONASS 系统、伽利略系统、我国的北斗系统以及 GPS 的现代化等内容也作了简要介绍。按武汉大学测绘学院的教学计划,有关时间系统、坐标系统、卫星轨道理论的基本知识和卫星应用等方面的内容已在“大地测量学基础”、“空间大地测量理论基础”和“卫星应用概论”等前期课程中讲过,故本书中不再作介绍,以免造成过多的重叠。但为了顾及外校和其他相关专业学生使用的需要,对一些必要的内容仍作了简单介绍。此外,为了保持两门课程相对的独立性和完整性,编写时允许有极少量内容相互交叉和重叠。

全书共分三编。第一编为 GPS 定位原理、方法与数学模型,共分 4 章。第 1 章绪论简要介绍了全球定位系统的产生、发展、前景以及各个领域中的应用,对其他卫星导航定位系统也作了简要介绍。第 2 章介绍了全球定位系统的组成和信号结构以及卫星位置的计算。第 3 章介绍了影响 GPS 定位的各种误差源以及消除或削弱误差影响的方法。第 4 章介绍了测定卫地距的方法以及 GPS 定位的方法。第二编为技术设计与数据采集,共分 2 章。第 5 章介绍了技术设计的依据和方法。第 6 章介绍了选点与埋石、接收机检验、外业观测、成果验收等内容。第三编为数据处理,共分 5 章。第 7 章介绍了常用的时间标示方法及相互换算的方法。第 8 章介绍了 GPS 测量中常用的坐标系和参考框架。第 9 章介绍了 GPS 数据处理中常用的 RINEX 格式和 SP3 格式。第 10 章介绍了 GPS 基线向量解算和网平差中

的各种问题。第 11 章介绍了 GPS 高程测量。其中第一、二编(前 6 章)由李征航编写,第三编(后 5 章)由黄劲松编写,最后由李征航负责统稿。其中部分标注有“\* \*”的内容主要供研究生学习和相关科研人员参考,不一定作为本科生学习的内容。

由于作者水平有限,谬误不当及疏漏之处在所难免。当前 GPS 定位技术仍处于迅速发展阶段,虽然我们力求与时俱进,反映该领域中的最新成果,但未必如愿。真诚希望广大读者批评指正。

作 者

2005 年 1 月

## 第二版修订说明

自 2005 年本书第一版发行以来,该书重印多次,发行量超过 2 万册。该书已被多所大学用作本科教学的教材,同时也成为研究生及专业技术人员广为阅读的一本参考书。基于以下原因,我们对第一版进行了较大幅度的修改和补充:

(1) 5 年来,全球定位系统本身已作了重要改进,GPS 导航定位技术也有了新的发展。

(2) 经多年使用后,有必要根据广大师生的意见对第一版的内容作一些增补和调整,以便更好地满足教学的需要。

(3) 本书的修订版已被批准为普通高等学校“十一五”国家级规划教材。

本版主要修订内容为:

(1) 对第一版的结构作了部分调整。新增加了一章《GPS 测量中涉及的时间系统和坐标系统》,并将“全球定位系统的应用”抽出来单独作为一章。此外,在导航电文前增补了有关卫星轨道根数及轨道摄动的内容,使教材的结构更为合理,也便于缺乏相关预备知识的学生使用本教材。

(2) 增补了有关系统本身近年来所作改进的相关内容:

- 广播星历精度改进计划 L-ALL;
- 有关 L2C 码和 L5I 码, L5Q 码的相关内容;
- 调制在 L2C 码和 L5I 码上的导航电文;
- 信号在卫星内部的时延差 TGD、ISC 及其对卫星钟改正数和电离层延迟改正数的影响;
- 在导航电文中引入地球自转参数及其产生的影响。

(3) 增加或补充了有关 RTK、网络 RTK 及 CORS 的相关内容,对卫星相位中心偏差 PCO 及相位中心变化 PCV 以及天线相位缠绕等内容也作了增补。

(4) 对第一版的“第二编 技术设计与数据采集”和“第三编 数据处理”进行了大幅度的调整,主要调整的内容如下:

- 将第一版中第二编与第三编合并成为一编——“测量与数据处理”,重点介绍 GPS 网建立的全过程及各个环节中的质量控制问题。

- 将原第 7 章、第 8 章和第 10.3 ~ 10.7 节的内容删除,对剩余章节进行了重新编排和补充,使本编的内容更侧重于工程应用。

本学科仍然处于迅速发展的阶段,知识更新速度很快,因而在修订过程中,我们继续坚持下列原则:既要讲清 GPS 测量与数据处理的具体方法、步骤和要求,并通过必要的实习使学生具备外业观测和数据处理的能力,以满足生产单位的需要;又要讲清楚基本原理,使学生明白为什么要这么做(这一点对于迅速发展中的学科来讲可能更为重要),以培养学生的创新能力,为今后卫星导航定位事业的发展作出贡献。

2010 年 7 月

# 目 录

## 第一编 GPS 定位原理、方法与数学模型

第 1 章 绪论	3
1.1 全球定位系统的产生与发展	3
1.1.1 子午卫星系统及其局限性	3
1.1.2 全球定位系统的产生和发展	5
1.2 美国政府的 GPS 政策	6
1.2.1 早期的 GPS 政策	6
1.2.2 GPS 政策的变化	8
1.3 其他卫星导航定位系统概况	9
1.3.1 全球导航卫星系统(GNSS)	9
1.3.2 区域性卫星导航定位系统	12
第 2 章 GPS 测量中所涉及的时间系统和坐标系统	15
2.1 有关时间系统的一些基本概念	15
2.2 恒星时与太阳时	18
2.3 原子时、协调世界时与 GPS 时	20
2.4 建立在相对论框架下的时间系统	23
2.5 GPS 中涉及的一些长时间计时方法	25
2.6 天球坐标系	28
2.6.1 岁差	28
2.6.2 章动	31
2.6.3 天球坐标系	32
2.7 地球坐标系	34
2.7.1 极移	34
2.7.2 瞬时(真)地球坐标系	34
2.7.3 协议地球坐标系	34
2.8 ITRS 与 GCRS 之间的坐标转换	37
第 3 章 全球定位系统的组成及信号结构	40
3.1 全球定位系统的组成	40
3.1.1 空间部分	40

3.1.2	地面监控部分	43
3.1.3	用户部分	45
3.2	载波与测距码	47
3.2.1	载波	47
3.2.2	测距码	47
3.3	导航电文	55
3.3.1	导航电文的总体结构	56
3.3.2	第1子帧(第一数据块)	56
3.3.3	第2、3子帧(第二数据块)	63
3.3.4	第4、5子帧(第三数据块)	66
3.4	卫星信号调制	70
3.5	GPS 卫星位置的计算	71
3.5.1	用广播星历计算卫星位置	71
3.5.2	用精密星历计算卫星位置	74
<b>第4章</b>	<b>GPS 定位中的误差源</b>	<b>75</b>
4.1	概述	75
4.1.1	误差分类	75
4.1.2	消除或削弱上述误差影响的方法和措施	76
4.2	相对论效应	77
4.2.1	近似公式	77
4.2.2	严格公式	79
4.2.3	需要说明的几个问题	80
4.3	钟误差	80
4.3.1	卫星钟误差	80
4.3.2	由于信号在卫星内的群延差而引起的卫星钟改正	81
4.3.3	接收机钟误差	82
4.3.4	在GPS测量中处理钟差的几种方法	83
4.4	卫星星历误差	84
4.4.1	GPS 卫星的广播星历和精密星历	84
4.4.2	国际GNSS服务	86
4.4.3	IGS的产品及其精度	87
4.4.4	星历误差对定位的影响	89
4.4.5	消除和削弱星历误差影响的方法和措施	91
4.5	电离层延迟	92
4.5.1	电离层的概况	92
4.5.2	电离层模型和经验改正公式	97
4.5.3	双频改正模型	99
4.5.4	利用GNSS双频观测资料建立VTEC模型	102



4.5.5	利用三频观测值进行电离层延迟改正 .....	105
4.6	对流层延迟 .....	107
4.6.1	基本原理 .....	107
4.6.2	普通 GPS 测量中常用的几种对流层延迟模型 .....	108
4.6.3	高精度 GPS 测量时所用的对流层延迟改正方法 .....	112
4.6.4	投影函数 .....	113
4.7	多路径误差 .....	116
4.8	其他误差改正 .....	120
4.8.1	地球自转改正 .....	120
4.8.2	天线相位缠绕 .....	120
4.8.3	天线相位中心的误差 .....	121
<b>第 5 章</b>	<b>距离测量与定位方法 .....</b>	<b>126</b>
5.1	利用测距码测定卫地距 .....	126
5.2	载波相位测量 .....	131
5.2.1	概论 .....	131
5.2.2	载波相位测量原理 .....	133
5.2.3	载波相位测量的实际观测值 .....	133
5.2.4	载波相位测量的观测方程 .....	135
5.3	单差、双差、三差观测值 .....	136
5.4	其他一些常用的线性组合观测值 .....	141
5.4.1	同类型不同频率观测值的线性组合 .....	141
5.4.2	不同类型观测值的线性组合 .....	142
5.5	周跳的探测及修复 .....	143
5.5.1	产生整周跳变的原因 .....	144
5.5.2	周跳的探测及修复 .....	145
5.6	整周模糊度的确定 .....	149
5.6.1	静态定位中常用的方法 .....	150
5.6.2	快速定位中常用的方法 .....	152
5.6.3	动态定位中常用的方法 .....	158
5.7	单点定位 .....	160
5.7.1	坐标系 .....	160
5.7.2	用测码伪距观测值进行单点定位 .....	160
5.7.3	精密单点定位 .....	162
5.8	相对定位 .....	162
5.8.1	GPS 定位中的几个基本术语 .....	162
5.8.2	静态相对定位 .....	163
5.8.3	动态相对定位 .....	166
5.8.4	RTK .....	168

5.9	网络 RTK 及连续运行参考系统 CORS .....	169
5.9.1	网络 RTK .....	169
5.9.2	连续运行参考系统 .....	171
5.10	差分 GPS .....	173
5.10.1	概况 .....	173
5.10.2	差分 GPS 原理 .....	173
5.10.3	差分 GPS 的分类 .....	175
5.10.4	差分 GPS 的新进展 .....	180
<b>第 6 章</b>	<b>全球定位系统的应用</b> .....	<b>181</b>
6.1	GPS 在测量领域中的应用 .....	181
6.1.1	GPS 在大地测量与地球动力学中的应用 .....	181
6.1.2	GPS 在工程测量中的应用 .....	182
6.1.3	GPS 在航测和遥感中的应用 .....	183
6.1.4	GPS 在地籍测量及地形测量中的应用 .....	184
6.2	GPS 在军事中的应用 .....	184
6.3	GPS 在交通运输业中的应用 .....	185
6.4	GPS 在大气科学中的应用 .....	186
6.5	GPS 在其他领域中的应用 .....	188

## 第二编 GPS 测量与数据处理

<b>第 7 章</b>	<b>GPS 网及其建立</b> .....	<b>193</b>
7.1	GPS 网 .....	193
7.1.1	GPS 静态测量的特点 .....	193
7.1.2	GPS 网 .....	194
7.2	GPS 网的建立过程 .....	195
7.2.1	设计准备 .....	196
7.2.2	测量实施 .....	196
7.2.3	数据处理 .....	197
7.3	GPS 测量中的几个基本概念 .....	197
7.3.1	观测时段 .....	198
7.3.2	同步观测 .....	198
7.3.3	基线向量 .....	198
7.3.4	复测基线及其长度较差 .....	198
7.3.5	闭合环及环闭合差 .....	198
7.3.6	同步观测环和同步环检验 .....	199
7.3.7	独立基线向量 .....	199
7.3.8	独立观测环和独立环检验 .....	199
7.4	GPS 网的质量及质量控制 .....	201

7.4.1	GPS 网的质量 .....	201
7.4.2	GPS 网的质量控制 .....	201
7.4.3	GPS 网质量的影响因素 .....	201
<b>第 8 章</b>	<b>GPS 测量的技术设计 .....</b>	<b>203</b>
8.1	概述 .....	203
8.1.1	技术设计及其作用 .....	203
8.1.2	技术设计的依据 .....	203
8.2	GPS 网的精度和密度设计 .....	204
8.2.1	GPS 测量的等级及其用途 .....	204
8.2.2	GPS 测量的精度及密度指标 .....	204
8.2.3	GPS 网的精度和密度设计 .....	206
8.3	GPS 网的基准设计 .....	206
8.3.1	GPS 网的基准设计 .....	206
8.3.2	最小约束平差与约束平差 .....	207
8.4	GPS 网的布网形式 .....	208
8.4.1	跟踪站式 .....	208
8.4.2	会战式 .....	208
8.4.3	多基准站式 .....	209
8.4.4	同步图形扩展式 .....	209
8.4.5	单基准站式 .....	210
8.5	GPS 网的图形设计 .....	211
8.5.1	三角形网 .....	211
8.5.2	多边形网 .....	211
8.5.3	附合导线网 .....	211
8.5.4	星形图 .....	213
8.6	GPS 网的设计准则 .....	213
8.6.1	网形与 GPS 网质量的关系 .....	213
8.6.2	提高 GPS 网质量的方法 .....	214
8.6.3	起算数据的选取与分布 .....	215
8.7	GPS 网的设计指标 .....	215
8.7.1	GPS 网的特征值 .....	216
8.7.2	效率指标 .....	217
8.7.3	可靠性指标 .....	217
8.7.4	精度指标 .....	217
8.8	技术设计书的编写 .....	218
<b>第 9 章</b>	<b>GPS 测量的外业 .....</b>	<b>219</b>
9.1	选点与埋石 .....	219

9.1.1	选点准备 .....	219
9.1.2	选点 .....	219
9.1.3	埋石 .....	220
9.2	接收机的维护和保养 .....	222
9.3	接收机的检验 .....	223
9.3.1	一般性检视 .....	223
9.3.2	通电检验 .....	223
9.3.3	附件检验 .....	223
9.3.4	试测检验 .....	223
9.3.5	接收机的检验要求 .....	225
9.3.6	野外检定场 .....	226
9.4	观测方案设计 .....	226
9.4.1	基本技术要求 .....	226
9.4.2	观测方案内容 .....	227
9.5	作业调度 .....	228
9.5.1	作业调度的内容 .....	228
9.5.2	同步图形的连接方式 .....	230
9.5.3	迁站方案 .....	231
9.6	观测作业 .....	233
9.6.1	准备工作 .....	233
9.6.2	观测作业 .....	234
9.6.3	记录 .....	234
9.6.4	外业观测成果的质量检核 .....	236
9.6.5	补测和重测 .....	237
9.7	成果验收和上交资料 .....	237
9.7.1	成果验收 .....	237
9.7.2	上交资料 .....	238
9.8	外业进度估算及项目成本预算 .....	238
9.8.1	外业进度估算 .....	238
9.8.2	项目成本预算 .....	239
<b>第 10 章</b>	<b>GPS 测量中的数据格式 .....</b>	<b>240</b>
10.1	RINEX 格式 .....	240
10.1.1	概述 .....	240
10.1.2	文件类型及命名规则 .....	240
10.1.3	文件结构及特点 .....	241
10.1.4	RINEX 2.10 格式说明 .....	242
10.1.5	RINEX 格式文件实例 .....	255
10.2	SP3 精密星历数据格式 .....	261

10.2.1	概述	261
10.2.2	SP3 格式文件实例	262
10.2.3	SP3 格式定义及说明	262
<b>第 11 章</b>	<b>GPS 基线解算</b>	<b>275</b>
11.1	概述	275
11.2	基线的解算模式	276
11.2.1	基线向量解	276
11.2.2	单基线解模式	278
11.2.3	多基线解模式	279
11.2.4	整体解/战役模式	280
11.3	基线解算的过程及结果	281
11.3.1	GPS 基线解算的过程	281
11.3.2	基线解的输出结果	282
11.4	基线解算的质量控制	282
11.4.1	质量的控制指标	282
11.4.2	质量的参考指标	285
11.4.3	基线的精化处理	286
<b>第 12 章</b>	<b>GPS 网平差</b>	<b>290</b>
12.1	网平差的类型及作用	290
12.1.1	网平差的目的	290
12.1.2	网平差的类型	290
12.2	网平差的流程	292
12.2.1	网平差的整体流程	292
12.2.2	无约束平差的流程	293
12.2.3	约束平差的流程	294
12.2.4	联合平差的流程	294
12.3	网平差原理及质量控制	296
12.3.1	基本数学模型	296
12.3.2	三维无约束平差	305
12.3.3	三维约束平差	308
12.3.4	三维联合平差	312
12.4	采用 GPS 技术建立独立坐标系	313
12.4.1	独立坐标系	313
12.4.2	建立独立坐标系基本方法	314
12.4.3	投影面的转换	315
12.4.4	坐标的相似变换	317
12.5	GPS 高程测量	317

# 第1章 绪 论

## 1.1 全球定位系统的产生与发展

### 1.1.1 子午卫星系统及其局限性

#### 1. 子午卫星系统

子午卫星系统(Transit)是美国海军研制、开发、管理的第一代卫星导航定位系统,又称海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System, NNSS)。该系统采用多普勒测量的方法来进行导航和定位。1957年10月,前苏联成功地发射了第一颗人造地球卫星。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对该卫星发射的无线电信号的多普勒频移产生了浓厚的兴趣。他们的研究表明,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另外两位科学家麦克卢尔博士和克什纳博士则指出,对一颗轨道已被精确确定的卫星进行多普勒测量,可以确定用户的位置。上述工作为子午卫星系统的诞生奠定了基础。当时美国海军正在寻求一种可对北极星潜艇中的惯性导航系统进行间断地、精确地修正的方法,故积极资助应用物理实验室开展进一步的研究。1958年12月,在克什纳博士的领导下开展了三项研究工作:研制子午卫星;建立地球重力场模型,以便能准确确定和预报卫星轨道;研制多普勒接收机。1964年1月,子午卫星系统正式建成并投入军用。1967年7月,该系统解密,同时供民用。用户数激增,最终达到95000个用户。其中军方用户只有650家,不足总数的1%。

子午卫星系统在几乎是圆形的极轨道(轨道倾角 $i \approx 90^\circ$ )上运行。卫星离地面的高度约为1075km,卫星的运行周期为107min。子午卫星星座一般由6颗卫星组成。这6颗卫星应均匀地分布在地球四周,即相邻的卫星轨道平面之间的夹角均应为 $30^\circ$ 。但由于各卫星轨道面的倾角 $i$ 不严格为 $90^\circ$ ,故进动的大小和符号各不相同。这样,经过一段时间后,各轨道面的分布就会变得疏密不一。位于中纬度地区的用户平均1.5h左右可观测到一颗卫星,但最不利时要等待10h才能进行下一次观测。

子午卫星系统采用多普勒测量的方法来进行导航定位,当子午卫星系统以 $f_s$ 的频率发射信号时,由于多普勒效应,接收机所接收到的信号频率将变为 $f_r$ 。接收频率 $f_r$ 和发射频率 $f_s$ 间存在下列关系:

$$f_r = \left(1 - \frac{1}{c} \frac{dD}{dt}\right) f_s \quad (1-1)$$

式中, $D$ 为信号源与接收机间的距离; $c$ 为真空中光速。

若接收机产生一个频率为 $f_0$ 的本振信号并与接收到的频率为 $f_r$ 的卫星信号混频,然后

将差频信号在时间段  $[t_1, t_2]$  间进行积分,则积分值  $N$  和距离差  $(D_2 - D_1)$  间有下列关系:

$$N = \int_{t_1}^{t_2} (f_0 - f_R) dt = \int_{t_1}^{t_2} (f_0 - f_S) dt + \int_{t_1}^{t_2} (f_S - f_R) dt$$

$$= (f_0 - f_S)(t_2 - t_1) + \int_{t_1}^{t_2} \frac{f_S}{c} \frac{dD}{dt} \cdot dt = (f_0 - f_S)(t_2 - t_1) + \frac{f_S}{c}(D_2 - D_1) \quad (1-2)$$

式中,  $N$  称为多普勒计数,是多普勒测量中的观测值;积分间隔  $(t_2 - t_1)$  一般可取 4.6s、30s 或 2min,作业人员可自行选择;  $D_1$  和  $D_2$  分别为  $t_1$  和  $t_2$  时刻卫星至接收机的距离。由式 (1-2) 知,进行多普勒测量后,我们即可据多普勒计数  $N$  求得  $t_1$ 、 $t_2$  时刻卫星至接收机的距离差  $(D_2 - D_1)$  :

$$D_2 - D_1 = \frac{c}{f_S} [N - (f_0 - f_S)(t_2 - t_1)] = \lambda_S [N - (f_0 - f_S)(t_2 - t_1)] \quad (1-3)$$

式中,  $\lambda_S$  为发射信号的波长。若该卫星的轨道已被确定,  $t_1$ 、 $t_2$  时刻卫星在空间的位置  $s_1$  和  $s_2$  已知,那么我们就以  $s_1$  和  $s_2$  为焦点作出一个旋转双曲面,该双曲面上的任意一点至这两个焦点的距离之差恒等于  $(D_2 - D_1)$ 。显然,用户必位于该旋转双曲面上。如果我们继续在时间段  $[t_2, t_3]$  和  $[t_3, t_4]$  内进行多普勒测量,求得距离差  $(D_3 - D_2)$  和  $(D_4 - D_3)$ ,就能按照上述方法做出第二个旋转双曲面和第三个旋转双曲面,从而交会出用户在空间的位置。

## 2. 子午卫星系统的局限性

### (1) 一次定位所需的时间过长

这一缺点是由多普勒定位方法的本质所决定的。如前所述,在多普勒定位中,旋转双曲面的焦点  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ 、 $\dots$  是由同一卫星在运行过程中逐步形成的。为了保证定位精度,这些焦点与地面测站之间的夹角不能过小,以便能组成较好的几何图形。所以,利用子午卫星多普勒观测进行导航时,通常需观测一次完整的卫星通过(一般为 8~18min)。而利用 GPS 进行距离交会时,由于空间的“已知点”是由同一瞬间的不同卫星来提供的,故只进行一个历元的观测就有可能获得几何强度极佳的一组观测值。一次定位所需时间过长会带来一系列问题,如:

① 无法为飞机、导弹、卫星等高动态用户服务,也难以满足汽车等运行轨迹较为复杂的地面车辆导航定位的需要。

② 为尽量减少一次导航定位所需的时间,只能采用低轨道卫星。这是因为:(a)当卫星运动速度相同时,从地面测站上所看到的低轨卫星的方向变化远比高轨卫星快。(b)低轨卫星运行的线速度比高轨卫星快,如果把子午卫星发射至离地面 20000km 的 GPS 卫星轨道上,那么为了获得同样的几何图形,观测时间就必须增加 6~7 倍。也就是说,一次导航定位的时间需 1~2h,这样长的观测时间显然是用户难以接受的。所以,采用多普勒测量方法来导航定位的卫星通常都是低轨卫星。而采用低轨卫星又会产生一系列特殊问题,例如,卫星所受到的大气阻力较大,其轨道难以准确测定和预报;由于每个卫星跟踪站能观测到的卫星轨道较短,因而需在全球布设大量的卫星跟踪站才有可能对卫星进行连续观测,然而由于自然地理条件的限制以及政治方面的原因,这是很难做到的(指当时的技术条件)。

③ 即使是对船舶等低动态用户来说,由于在一次导航定位过程中载体仍处于运动状态中,故各观测值所对应的用户位置是不相同的,其变化量一般可达 5~10km。解算时,需根据船速等信息将这些观测值归算至同一参考时刻。由于一次导航定位所需的时间过长,船

速等参数的误差将影响定位精度。

上述各种问题是由多普勒定位方法本身引起的,难以解决。

## (2) 不是一个连续的、独立的卫星导航系统

如前所述,美国海军研制组建子午卫星系统的目的是为了能给惯性导航系统提供一种间断的、精确的修正,故该系统没有采用频分、码分、时分等多路接收技术。接收机在某一时刻只能接收一个卫星信号,这就意味着子午卫星星座中所含的卫星数不能太多。为防止在高纬度地区的视场中同时出现两颗子午卫星,而造成信号相互干扰的可能性,子午卫星星座中的卫星一般不超过 6 颗,从而使中低纬度地区两次卫星通过的平均间隔达 1.5h 左右。由于各卫星轨道面进动的大小和方向不一,最终造成各轨道面之间的间隔疏密不一。相邻轨道面过密时,会导致两颗卫星同时进入用户视场,造成信号的相互干扰,此时控制中心不得不暂时关闭一颗卫星使其停止工作。轨道面过疏时,用户的等待时间有可能长达 8 ~ 10h。导航定位的不连续性使子午卫星系统无法成为一种独立的导航定位系统,而只能成为一种辅助系统,多种导航的并存不仅增加了用户的费用,而且还有可能导致信号相互干扰。

正因为从导航的角度讲子午卫星系统存在上述两大缺点,所以在该系统投入使用后不久,美国国防部即组织陆、海、空三军着手研制第二代卫星导航定位系统——全球定位系统 GPS。

此外,从测量的角度讲,子午卫星系统也存在不少问题,主要有:

### (1) 所需时间长,作业效率偏低

利用子午卫星进行测量时,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

子午卫星多普勒定位一般只能获得分米级至米级的定位精度,从而限制了它的应用范围。究其原因主要是:

① 卫星钟和接收机钟的频率都不够稳定,而在一次卫星通过中,我们通常只引入一个频漂参数  $d\Delta f$  来表示这两台钟之间实际的频率差相对于其理论值  $\Delta f_0$  的偏差:  $d\Delta f_0 = (f_0 - f_1) - \Delta f_0$ 。但实际上,该值在这么长的时间内是无法保持稳定不变的。研究表明,当卫星钟的稳定度为  $5 \times 10^{-12}$  时,在一次卫星通过时,只引入一个参数(而不是在每个观测历元分别引入一个参数),会导致 0.8 ~ 1.0m 的定位误差。

② 由于子午卫星所用的频率较低,而电离层延迟改正模型中一般只顾及  $f^2$  项,在中等的太阳活动年份中,在地球赤道附近被略去的高阶项的影响将大于 1.0m。

③ 由于卫星的轨道较低,在当时的技术水平下,地球重力场模型和大气阻力摄动的误差对定位的影响将达 1 ~ 2m。观测 50 ~ 100 次卫星通过后,才能削弱至分米级水平。

上述缺陷也从另一个侧面说明了用全球定位系统取代子午卫星系统的必要性。

## 1.1.2 全球定位系统的产生和发展

由于子午卫星系统存在上述局限性,所以在该系统投入运行后不久,各军兵种立即开展了相关的研究工作来设计适合于自己的卫星导航定位系统,其中较著名的有美国海军提出



的 Timation 计划和美国空军提出的 621 B 计划。Timation 主要用于高精度的时间传递,同时也可提供导航信息。由于使用了高精度的卫星钟(铷原子钟、铯原子钟),从而大大改善了预报星历的精度,增加了两次卫星星历输入的时间间隔。621 B 则采用伪随机噪声码(Pseudo Random Noise, PRN)来进行伪距测量。经适当选择后的 PRN 码几乎都是互相正交的,故可采用码分多址技术来识别和处理不同的卫星信号。此外,还可以在 PRN 码上调制卫星导航电文。采用这些伪随机噪声码作为测距码时,即使信号的功率密度不足环境噪声的 1%,仍可将信号检测出来。

为提高效率,减少各军种之间的矛盾,美国国防部于 1973 年成立了由空军、海军、陆军、国防制图局、海岸警卫队、交通部以及北约和澳大利亚等方代表组成的联合工作办公室(Joint Program Office, JPO)负责新的卫星导航定位系统的设计、组建、管理等工作。同年, JPO 在集 Timation、621 B 等方案优点的基础上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。该方案于 1973 年 12 月 17 日获美国国防系统采办和评审委员会(DSARC)批准。JPO 在全球定位系统的研制和组建过程中起了极其重要的作用,其具体职责为:

- ① 负责 GPS 卫星的设计、研制、试验、改进、订购等工作,并负责将它们送入预定轨道。
- ② 建立地面控制系统,负责整个系统的管理和协调工作,维持系统的正常运行。
- ③ 为美国及其盟国的军方用户设计、试验、生产 GPS 接收机。

全球定位系统(GPS)是美国继阿波罗登月计划和航天飞机计划之后的又一重大空间计划。整个系统的研制组建工作分方案论证、大规模工程研制和生产作业三个阶段进行,耗资 200 亿美元。经过 20 年的努力,该系统终于建成并投入运行。

1993 年 7 月,进入轨道可正常工作的 Block I 试验卫星和 Block II、Block IIA 型工作卫星的总和已达 24 颗,系统已具备了全球连续导航定位能力,故美国国防部于 1993 年 12 月 8 日正式宣布全球定位系统已具备初步工作能力 IOC(Initial Operational Capability)。这是系统研制组建过程中具有重要意义的事件,它标志着研制组建试验阶段已结束,整个系统已进入了正常运行的阶段。此后,除了非常时期外,美国政府应该以公开承诺的精度向全世界的用户提供连续的导航定位服务,且不能未经通知而擅自修改、变更卫星信号。

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的工作能力 FOC(Full Operational Capability)。因为此前不计试验卫星在内,已进入预定轨道能正常工作的 Block II 和 Block IIA 型工作卫星已达 24 颗。

目前,GPS 作为新一代的卫星导航定位系统,已在军事、交通运输、测绘、高精度时间比对及资源调查等领域中得到了广泛的应用。

## 1.2 美国政府的 GPS 政策

随着国际和国内形势的变化,美国政府不断对自己的 GPS 政策作出调整,以最大限度地维护其国家利益。

### 1.2.1 早期的 GPS 政策

20 世纪 80 年代末 90 年代初以前,美国、苏联两个超级大国为争夺世界霸权而展开激