

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 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

李征航 黄劲松 编著



全国优秀出版社
武汉大学出版社

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

李征航 黄劲松 编著



全国优秀出版社
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. —武汉:武汉大学出版社,
2005. 3

高等学校测绘工程专业核心教材

ISBN 7-307-04443-9

I. G… II. ①李… ②黄… III. ①全球定位系统(GPS)—测量—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(2005)第 008426 号

责任编辑:任翔 责任校对:黄添生 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:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:华中科技大学印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:19.25 字数:485千字

版次:2005年3月第1版 2005年3月第1次印刷

ISBN 7-307-04443-9/P·89 定价:30.00元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,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。

内 容 提 要

全球定位系统(GPS)已在国民经济和国防建设的各个领域得到了广泛的应用。作者结合教学、科研和生产实践从定位原理、测量作业、数据处理等方面对 GPS 定位技术作了较详细的介绍。全书共分 11 章,其主要内容为:绪论,全球定位系统的组成及信号结构,GPS 定位中的误差源,距离测量与 GPS 定位,GPS 测量的技术设计,数据采集,时间标示法,地球坐标参照系,常用的数据格式,GPS 基线向量解算和网平差及 GPS 高程测量等。

本书可作为高等学校测绘工程及其相关专业本科生和研究生的教材,教师可根据专业性、学时数和学生的层次从中选择所需的内容。本书也可供测绘、交通、石油、地质、水利、农林等部门的相关科研工作人员参考。

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 and 科技开发(生产)项目,将一个逐渐老化且生源和需这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

目 录

第一编 GPS 定位原理、方法与数学模型

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 全球定位系统的产生, 发展及前景	1
§ 1.2 GPS 在各个领域中的应用	5
§ 1.3 美国政府的 GPS 政策	10
§ 1.4 其他卫星导航定位系统的概况	12
第 2 章 全球定位系统的组成及信号结构	17
§ 2.1 全球定位系统的组成	17
§ 2.2 GPS 卫星的信号结构	26
§ 2.3 GPS 卫星位置的计算	33
第 3 章 GPS 定位中的误差源	38
§ 3.1 概述	38
§ 3.2 钟误差	40
§ 3.3 相对论效应	43
§ 3.4 卫星星历误差	46
§ 3.5 电离层延迟	52
§ 3.6 对流层延迟	64
§ 3.7 多路径误差	71
§ 3.8 其他误差改正	74
第 4 章 距离测量与 GPS 定位	78
§ 4.1 利用测距码测定卫地距	78
§ 4.2 载波相位测量	83
§ 4.3 观测值的线性组合	87
§ 4.4 周跳的探测及修复	95
§ 4.5 整周模糊度的确定	99
§ 4.6 单点定位	110
§ 4.7 相对定位	112
§ 4.8 差分 GPS	119

第二编 技术与数据采集

第 5 章 GPS 测量的技术设计	128
§ 5.1 技术设计的依据	128
§ 5.2 GPS 网的精度和密度设计	129
§ 5.3 GPS 网的基准设计	130
§ 5.4 GPS 测量中的图形设计	132
§ 5.5 GPS 网的特征条件	136
第 6 章 数据采集	138
§ 6.1 选点与埋石	138
§ 6.2 GPS 接收机的选用及仪器检验	140
§ 6.3 数据采集	144
§ 6.4 成果验收和上交资料	150

第三编 数据处理

第 7 章 时间标示法	152
§ 7.1 时间标示法	152
§ 7.2 不同时间标示法间的相互转换	154
第 8 章 地球坐标参照系	156
§ 8.1 基本概念	156
§ 8.2 常用坐标系	159
§ 8.3 坐标系转换	163
§ 8.4 基准转换	167
§ 8.5 常用地球参照系和参考框架	172
第 9 章 GPS 测量应用中常用数据格式	182
§ 9.1 RINEX 格式	182
§ 9.2 SP3 精密星历数据格式	202
第 10 章 GPS 测量数据处理原理	216
§ 10.1 概述	216
§ 10.2 基线解算的模式	219
§ 10.3 基线解算中的系统性偏差	223
§ 10.4 接收机天线相位中心的特性	226
§ 10.5 基线解算的数据预处理	231
§ 10.6 基线解算的基本数学模型	235
§ 10.7 不同频率载波相位观测值的线性组合	241
§ 10.8 网平差的类型及作用	245

§ 10.9 网平差的流程	247
§ 10.10 网平差原理	251
§ 10.11 采用 GPS 技术建立独立坐标系	265
第 11 章 GPS 高程测量	270
§ 11.1 高程系统及其相互关系	270
§ 11.2 GPS 水准	273
参考文献	279
附录 1 引用的缩写词	287
附录 2 标石类型图	289
附录 3 GPS 测量手簿	291
附录 4 归心元素测定与计算	296

第一编 GPS 定位原理、方法与数学模型

第1章 绪 论

§ 1.1 全球定位系统的产生、发展及前景

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(NNSS—Navy Navigation Satellite System)。该系统采用多普勒测量的方法进行导航和定位。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,对一颗轨道已被准确确定的卫星进行多普勒测量的话,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95 000个用户。其中军方用户只有650家,不足总数的1%。

子午卫星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1 075km,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° 。但由于各卫星轨道面的倾角 i 不严格为 90° ,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。

子午卫星系统是采用多普勒测量的方法进行导航定位的。当子午卫星以 f_t 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_t 间存在下列关系:

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

式中: D 为信号源与接收机间的距离; c 为真空中的光速。

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。从式(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, λ_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 是已知的,那么我们就能以 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 $[D_4 - D_3]$,就能按照上述方法作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,也无法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较高轨卫星快。(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 20 000km 的 GPS 卫星轨道上的话,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。

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,美国海军研制组建立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,故该系统中没有采用频分、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,多种导航系统的并存不仅增加了用户的费用,而且还有可能导致相互干扰。

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 Δf_0 的偏差: $d\Delta f_0 = (f_0 - f_s) - \Delta f_0$ 。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 5×10^{-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,在地磁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,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、发展及前景

1. 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 621B 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间的时间间隔。621B 则采用伪随机噪声码(PRN—Pseudo Random Noise)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,减少各军兵种之间的矛盾,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(JPO—Joint Program Office)负责新的卫星导航定位系统的设计、组建、管理等项工作。同年,JPO 在集 Timation,621B 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 II A 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 II A 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。

2. 前景

据专家预测,今后几年内 GPS 在通信、大气探测、精细农业以及环境保护等领域中也将得到广泛的应用,GPS 将进入各行各业。还有专家预测,不久的将来人们将生产出电子手表式的 GPS 接收机且价格将降至普通人人都能接受的水平。到那时人们不仅能方便地获得时间信息,而且能方便地获得三维位置和三维速度信息,从而深刻地改变人们的生活方式。全球定位系统将作为 20 世纪最伟大的科学成就之一而载入史册。

§ 1.2 GPS 在各个领域中的应用

1.2.1 GPS 在军事中的应用

GPS 已在军事领域中得到了广泛的应用。例如利用 GPS 为导弹和智能炸弹进行精确的制导,使其能准确命中目标,以摧毁对方的指挥中心、通信系统、防空系统、机场、油库、弹药库等重要军事目标,并大量杀伤对方的有生力量。在 JPO 的办公室里有一张标语:“让 5 个导弹(炸弹)从同一个弹孔中打进去。”据报道,在 2003 年的伊拉克战争中,美英联军所使用的精确制导武器已占总数的 70%。与地形匹配技术和激光制导技术相比,GPS 卫星导航定位技术具有准备工作简单快速,制导不受雾、烟等外界条件的影响和干扰等优点,因而被广泛采用。从朝鲜战争和越南战争时期的地毯式、卷席式的轰炸到现在的远距离非接触式的精确打击(有人将其称为外科手术式的战争),战争的形态和方式已发生了巨大变化。这种变化所产生的影响是极其深远的。远距离非接触式精确打击不仅可以大大减少己方作战人员的伤亡,而且可避免大量误伤平民、大量误炸非军事目标等悲剧的发生。

此外,GPS 在多军兵种的协同作战、定点轰炸、火力支援、空中加油、空投后勤补给、营救被击落飞机的飞行员等方面也都得到了广泛的应用。在 1991 年的海湾战争中,以美国为首的多国部队共配备了 17 000 台 GPS 接收机。GPS 成为武器效率的倍增器,是以美国为首的多国部队赢得海湾战争胜利的重要技术条件之一。

1.2.2 GPS 在交通运输业中的应用

GPS 在能见度极差的条件下(如浓雾、沙尘暴等气候条件下)飞机的起飞、进场、着陆以及飞机的途中导航方面,在船舶的进港、内河航行以及途中导航方面以及外宾车队、首长车队、运钞车、救护车、消防车、警车等地面车辆的导航、监控、调度、管理等方面都得到了广泛的应用。

1. GPS 在航空领域的应用

在飞越大洋的民航飞机上安置了 GPS 接收机后,飞机就能沿着最短的航线(大地线)飞行而不必沿着地面的导航设备作曲线飞行。据估计,仅此一项即可缩短 8% ~ 10% 的飞行距离,燃料消耗、飞行时间、飞机的利用效率等也都产生了相应的变化,从而产生巨大的经济效益。

1990 年乘坐美国国内航班的旅客数为 5 亿人次,全球为 11 亿人次,到 2000 年,上述数量翻了一番。旅客人数的不断增加将会使空中交通管制的难度越来越大。目前每架飞越大洋的民航飞机所占用的空间为:上下 2 000ft(1ft = 0.304 8m),前后左右各为 60mi(1mi = 1.609 344 km)。而配备了 GPS 接收机后,由于用户可随时精确地确定自己的三维位置和三维速度,故分配给每架飞机的空间可缩小为:上下 1 000ft,前后左右各为 20mi。这就意味着原来一架飞机所占用的空间现在可同时容纳 18 架飞机安全地飞行,从而大大缓解了空中交通管制的压力。

2. GPS 在车辆导航和管理方面的应用

地面车辆导航管理系统将成为 GPS 的最大用户群,目前约占总用户数的 2/3。在地面车辆上配备车载 GPS 后可实现:

(1) 车辆导航

实时确定用户的精确位置,并在电子地图上显示出来,为驾驶人员提供必要的导航信息。若驾驶人员还能同时获得路况、交通堵塞等相关信息并用专用软件求出最佳路线,就可构成智

能交通系统的基本框架。由于城市中存在大量的高层建筑、立交桥和树木等卫星信号的障碍物,因此进行 GPS 导航时通常还需辅之以电罗经、里程计等设备。

(2) 车辆管理监控

各车辆在实时确定自己的位置后立即通过 VHF、UHF 等无线电台将这些信息转发给控制中心并显示在控制中心的大屏幕上,以便中心能对这些车辆进行实时监控和合理调度。一旦发生突发事件时,中心就能及时采取适当的应对措施。我国已要求所有的特种车辆(如外宾车队、首长车队、各种警车、运钞车、消防车、救护车等)上均配备 GPS 接收机及无线电通信设备。在此基础上逐步向出租汽车、公共汽车和其他地面车辆推广。ERTICO 公布的资料表明:在未来 5 年中,北美地区的汽车导航产品将从现有的 9 万台增加至 1 000 万台;欧洲则将从现在的 90 万台增加至 1 100 万台。

3. GPS 在水上运输中的应用

GPS 还可用于船舶的进港、途中导航及内河航行等。据报道,配备 GPS 接收机后,10 万吨级的油轮横渡大西洋一次即可节省 1 万美元的运输费用。GPS 导航定位系统的出现还为解决雾天船舶航行问题创造了条件。

为保证海上导航定位的精度,满足海图测量、航道测量、港口测量、海岸线地形修测等工作的需要,交通部将沿我国海岸线布设“中国沿海无线电信标/差分 GPS 系统”(RBN/DGPS)。整个系统由 20 个站组成,形成从鸭绿江口到南沙群岛,覆盖我国沿海港口、重要水域和狭窄水道的差分 GPS 导航服务网。各基准站在 ITRF 坐标框架中的地心坐标精度为:平面位置优于 15cm,高程优于 25cm。在几十千米的距离内定位精度将达 $\pm 1\text{m}$;在 200n mile (1n mile = 1.852km) 的范围内,利用该系统进行定位可获得优于 $\pm 5\text{m}$ 的定位结果。据悉,我国已有 10 万条渔船装备了 GPS 接收机,约占中国全部渔船的 1/3。

1.2.3 GPS 在测量领域中的应用

1. 建立和维持全球性的参考框架

目前 GPS 已成为建立、维持全球性参考框架的重要手段。以精度最高、测站数最多的国际地球参考框架 ITRF 2000 为例,该坐标框架是由位于全球 500 多个地点的 800 多个测站组成的(有的地点具有 2 个或多个测站),依据这些测站所提供的长期的高精度的 GPS 观测值、VLBI 观测值、SLR 观测值、LLR 观测值及 DORIS 观测值,经综合数据处理而求得的。ITRF 2000 中,枢纽站的地心坐标精度优于 $\pm 4\text{mm}$,比例尺的精度优于 $\pm 0.5\text{ppb}$ 。在这些测站中, GPS 站的数量占了相当大的部分,其精度也已经与 VLBI、SLR、LLR 等大致相仿,因而在建立参考框架的过程中起了特别重要的作用。自从 1992 年国际 GPS 服务 IGS 开始工作以来,就在不断地增加测站数,提高定位精度以支持 ITRF 系列(ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF94, ITRF96, ITRF97, ITRF2000)的建立和维持工作。

2. 建立各级国家平面控制网

由于 GPS 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方法而成为建立各级平面控制网的主要手段。利用 GPS 定位技术来建立国家平面控制网时可采用两种方法。第一种方法是仍然仿照原一、二、三、四等点的布网方式,分别在全国范围内布设 A 级网和 B 级网,然后再由各省或用户进行加密,布设 C 级网及 D 级、E 级网。第二种方法是建立国家长期连续运行的卫星导航定位服务系统,并利用这些连续运行的参考站网来建立和维持全国的坐标框架,在此基础上再在全国布设数千个 GPS 点以组成国家的平面控制

网。陈俊勇教授建议我国的连续运行参考站的数目最好为 270 ~ 280 个,在此基础上再布设 5 000 个 GPS 点来组成我国的国家平面控制网。连续运行的参考站网的坐标可逐年解算(或每半年解算一次),以便给出最新的站点坐标值以及这些站点坐标的年变化率。显然,采用这种方法建立的坐标系可以与时俱进,反映站点坐标的最新数值及其随时间变化的规律。

3. 布设城市控制网、工程测量控制网,进行各种工程测量

国内外资料表明,利用 GPS 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(主要是由于国内的劳动力相对较为廉价),而且精度也比常规方法好,因而已得到了广泛的应用。此外,GPS 定位技术在变形监测、水利建设、输电线路施测、道路(如铁路、公路)测量、水下地形测量(如航道测量、水库容量测量)等方面也都得到了广泛应用。利用 GPS 进行大坝等建筑物的变形监测时,若采用连续监测的模式,则可以通过平滑滤波等方式来滤除噪声,提取变形信息,由此所求得的平面位移精度和垂直位移精度均可优于 $\pm 1\text{mm}$ 。

4. 在航空摄影测量、地籍测量、海洋测量中的应用

航空摄影测量是制作各种比例尺地形图的重要手段。在传统的航空摄影测量作业模式中,需在测区中布设一定数量的大地控制点,在困难地区这是一项十分艰巨的任务。此外,利用遥感卫星对他国进行航天遥感时,我们更不可能到他国去布测大地控制点。利用安置在航测飞机上的 GPS 接收机来测定航空摄影仪的光学中心在曝光瞬间的三维坐标,并将其作为附加观测值来参加空中三角测量的联合平差的话,就可大量减少甚至不需要地面的大地控制点,从而引发了航空摄影测量的一场重大技术革命。表 1-1 列出了空中三角测量对 GPS 定位的要求。

表 1-1 空中三角测量对 GPS 定位的精度要求 (单位:m)

地形图 比例尺	航片比 例尺	空中三角测量所需的精度		等高距	GPS 定位精度	
		$\mu_{x,y}$	μ_z		$\sigma_{x,y}$	σ_z
1:100 000	1:100 000	5	<4	20	30	16
1:50 000	1:70 000	2.5	2	10	15	8
1:25 000	1:50 000	1.2	1.2	5	5	4
1:10 000	1:30 000	0.5	0.4	2	1.6	0.7
1:5 000	1:15 000	0.25	0.2	1	0.8	0.35
1:1 000	1:8 000	0.05	0.01	0.5	0.4	0.15

采用载波相位测量动态相对定位技术后是不难达到上述精度的。

地籍测量是调查和测定土地(宗地或地块)及其附着物的界线、位置、面积、权属和利用现状等基本情况及其几何形状的测绘工作。我们不但可以利用静态 GPS 测量的模式来进行高等级的地籍控制测量,还可以利用 RTK 等模式来进行低等级的控制测量(如图根控制测量)以及界址点坐标的测定工作。

GPS 定位技术还被用于海洋大地测量和海底地形测量。为开发利用海洋资源,进行海洋地区的环境监测以及科学研究,有必要布设海洋大地控制网。海洋大地控制网是由分布在海

边、岛屿、暗礁以及海底的控制点组成的。海底控制点上有固定的标志并配备有水声应答器。位于海边、岛屿、暗礁上的控制点可用 GPS 相对定位的方法精确测定。位于海底的大地控制点则需通过下列方法来测定:从船上发出一个声呐信号,该信号传播至海底大地控制点后被接收,同时水声应答器可发出一个声呐应答信号,船上量测出应答信号的到达时间后即可根据声呐信号的往返传播时间计算出从海底大地控制点至船舶的距离,同时船舶的位置用 GPS 定位技术来精确测定。用上述方法测定海底大地控制点至三个坐标已精确测定的船舶点间的距离后,即可采用距离交会法确定其坐标。这三个船舶点可以是三条船,也可以是同一条船在不同时间的位置。

海底地形测量通常由配备了 GPS 接收机和声呐测深仪的测量船来完成。海底地形点的平面位置由差分 GPS 测量来确定,高程则根据测深仪的读数计算而得。根据对海底地形点的密度要求不难确定出测量船航行时两条航线间的距离,根据船的航速还可以确定合适的采样率。

1.2.4 GPS 在其他领域中的应用

1. 在精细农业和林业中的应用

GPS 在精细农业中已得到应用。例如自动插秧机可以在 GPS 的控制下按规定方向和间距完成插秧工作。利用飞机进行播种、施肥、除草、灭虫时,合理布设航线,准确引导飞行可大大节省费用,减少重叠或空白带。而且可以在夜间进行作业。因为夜间蒸发小,且农作物和杂草的气孔是张开的,所以更容易吸收肥料和除草剂等喷撒物,提高施肥和除草的效果。据国外资料报道,利用差分 GPS 后,飞机施肥、除草等的总费用可节省 50% 左右。

GPS 定位技术在测定森林面积、估算木材储量、测定道路位置、测定森林火灾地区的位置和边界线、测定病虫害区域的位置和边界线、寻找水源等方面均有独特而重要的作用。而利用常规方法进行上述工作时,由于通视条件等原因,一般说来是相当困难的。

2. 在资源调查、环境监测中的应用

在石油勘探、地质调查、水土流失、确定沙漠化的区域、沙尘暴监测等工作中,作业人员只需携带 GPS 接收机即可方便地解决定位问题。而采用常规方法时,由于难以寻找高级控制点或测站间不通视等原因,定位工作将相当困难。

3. 在移动通信中的应用

当遇到匪警、交通事故、意外伤害等突发事件,通过 110、120、119 等电话向有关单位报告和求助时,在很多场合下当事人是难以说清事故发生的准确位置的。这样就会给救助工作带来许多不便,从而延误了宝贵的救助时间。如果在移动电话中配备 GPS 接收芯片,在报警过程中移动电话可以自动地将准确的定位结果同时播发给相关单位,就能较好地解决上述问题。采用移动通信辅助 GPS 技术 (AGPS) 后,用户即使在室内也可确定自己的位置,使上述方法更为方便实用。

4. 利用 GPS 监测电离层延迟

由于电离层对无线电信号而言具有色散效应,所以利用双频的伪距观测值或载波相位观测值,即可准确测定观测时刻信号传播路径上的电离层延迟量(或电子含量 TEC 值),然后利用投影函数求出穿刺点(信号传播路径与中心电离层的交点)上天顶方向的电离层延迟(或天顶方向的电子含量 VTEC)。若某时段 T 中共进行了 n 次观测,每次观测 m 个卫星,用上述方法即可实际测定该时段中 $m \times n$ 个穿刺点上的 VTEC 值,从而可以探求 VTEC 值的空间分布及