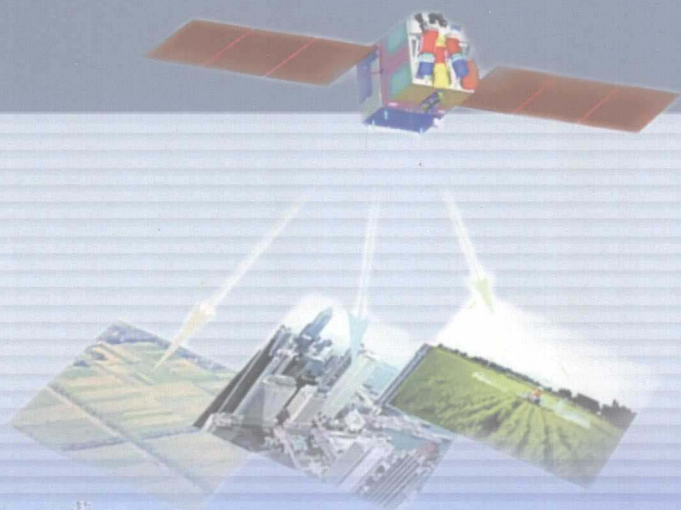


江苏高校优势学科建设工程资助项目
江苏高校重点学科创新研究资助项目

GNSS

在数字城市建设中的应用研究

焦明连 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

江苏高校优势学科建设工程资助项目
江苏高校重点学科创新研究资助项目

GNSS 在数字城市建设 中的应用研究

焦明连 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书从工程实践的角度出发,阐述了 GNSS 的四大系统和最新发展动向,介绍了数字城市的概念和关键技术,系统分析了 GPS 测量精度,深入研究了 GPS 在变形监测中的应用,重点讨论了 GPS 数据处理方法,探讨了 GPS 高程测量的理论与应用,详细介绍了 GPS 在测量工程中的应用案例,综述了 GNSS 研究现状及其应用前景。

本书可为测绘地理信息行业的管理和工程技术人员提供借鉴,也可供高等院校测绘工程专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

GNSS 在数字城市建设中的应用研究/焦明连著. —

徐州:中国矿业大学出版社,2014.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2525 - 2

I. ①G… II. ①焦… III. ①卫星导航—全球定位系统—应用—城市建设—研究 IV. ①P228.4②TU984

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 254277 号

书 名 GNSS 在数字城市建设中的应用研究
著 者 焦明连
责任编辑 孙 浩 史凤萍
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏徐州新华印刷厂
开 本 787×960 1/16 印张 15.25 字数 310 千字
版次印次 2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷
定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

全球导航卫星系统(GNSS)包括美国全球定位系统、俄罗斯格洛纳斯全球导航卫星系统、欧盟伽利略卫星导航系统和中国北斗卫星导航系统。其关键作用是提供时间/空间基准和所有与位置相关的实时动态信息,业已成为国家重大的空间和信息化基础设施,也成为体现现代化大国地位和国家综合国力的重要标志。它是经济安全、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,也是建设和谐社会、服务人民大众、提升生活质量的重要工具。由于其广泛的产业关联度和与通信产业的融合度,能有效地渗透到国民经济诸多领域和人们的日常生活中,成为高技术产业发展的助推器和新的经济增长点。

数字城市是数字地球、数字中国的延伸。数字城市是综合利用地理信息系统、遥感、全球定位系统、网络、多媒体及虚拟现实等技术,对城市的基础设施、功能机制进行自动采集、动态监测管理和辅助决策服务的技术系统。通俗一点说,数字城市是指在城市规划建设与运营管理以及城市生产与生活中,利用数字化信息处理技术,将城市的各种信息资源加以整合利用。数字城市以大规模的信息基础设施和海量空间数据为依托,需要社会各相关行业的共同参与和支持,是一项浩大的系统工程。

GNSS定位技术的高度自动化和所达到的定位精度及其潜力,给测绘技术带来了革命性的变化,并已经成为获取数字城市基础地理信息的重要途径,其主要任务是建立满足数字城市要求的高精度的平面高程基准,获取点、线、面的位置信息。目前,GNSS定位技术用于数字城市建设的理论研究趋于成熟,但工程实践的经验缺少系统总结。作者长期从事测绘生产管理、技术开发、项目咨询和教学科研工作,具有一定的理论水平和工程实践经历。本研究的主要内容是作者长期积累的测绘外业生产实践和内业数据处理工程案例,可为推动数字城市的建设和发展提供借鉴和参考。

全书共分八章。第一章简要阐述了GNSS的四大系统和最新发展动向;第二章介绍了数字城市的概念和关键技术;第三章分析了GNSS测量精度;第四章深入研究了GNSS在灾害监测中的应用;第五章重点讨论了GNSS数据处理方法;第六章探讨了GNSS高程测量的理论与方法;第七章介绍了GNSS在测量工程中的应用案例;第八章综述了GNSS研究现状及其应用前景。

在本研究出版之际,感谢江苏高校优势学科“海洋科学与技术”和江苏高校重点学科“测绘科学与技术”创新研究项目基金的资助,感谢各友好测绘地理信息企业和挚友提供的应用案例。期望本研究的出版,能给一线测绘科技人员带来方便,并为推动 GNSS 技术在数字城市建设中的应用研究起到积极有益的影响。尽管作者已尽最大热情和努力投入本研究的编写,但由于理论研究水平有限,实践应用经验不足,书中可能存在一些令人遗憾的地方,敬请读者批评指正。

著 者

2014 年 9 月

第一章 全球导航卫星系统(GNSS)的发展	1
第一节 GPS 系统	1
第二节 GLONASS 系统	9
第三节 Galileo 系统	11
第四节 中国北斗全球卫星导航系统	14
第五节 GNSS 的最新动向	18
第二章 数字城市建设	21
第一节 数字城市概述	21
第二节 数字城市关键技术	24
第三节 数字城市基础测绘框架构建	28
第四节 数字城市基础地理信息平台构建	32
第五节 从数字城市到智慧城市	36
第三章 GNSS 测量精度研究	42
第一节 GPS 控制网坐标转换的精度分析	42
第二节 GPS 控制测量精度研究	51
第三节 COMPASS 导航系统星座设计与模拟分析	58
第四节 卫星天线相位中心精密改正	64
第五节 GPS 接收机标称精度测试方法研究	68
第四章 GNSS 在灾害监测中的应用研究	74
第一节 小波分析技术在 GPS 监测数据处理中的应用	74
第二节 基于电离层层析技术的地震前电离层异常探测	78

第三节	GPS 在城市地表沉陷监测中的应用研究	87
第四节	基于 GPS-InSAR 集成技术地表形变的监测	91
第五节	GPS 技术在滑坡监测中的应用	96
第六节	GPS 技术在桥梁变形监测中的应用	99
第五章	GNSS 数据处理研究	102
第一节	GPS 数据处理流程及其应用	102
第二节	GPS 卫星星历内插精度分析	105
第三节	GPS 控制网起算点兼容性分析与实践	109
第四节	GPS 接收机天线相位中心偏差检定方法	112
第五节	GPS 控制网投影变形的处理	117
第六章	GNSS 高程测量理论与方法研究	122
第一节	基于聚类分析的多面函数拟合高程异常方法	122
第二节	基于 DE-LSSVM 的 GPS 高程转换	126
第三节	区域似大地水准面拟合模型研究	132
第四节	多面函数在 GPS 高程转换中的应用案例	137
第五节	基于 RBF 神经网络的 GPS 水准高程拟合	141
第六节	基于总体最小二乘法的 GPS 高程拟合	146
第七节	基于小波方法和 Kriging 估计的 GPS 高程转换方法	150
第八节	特殊困难地区 GPS 高程替代水准测量的研究	155
第七章	GNSS 在测量工程中的应用	159
第一节	CORS 在修复 GPS 高级点测量中的应用	159
第二节	GPS 海域使用动态监测控制网建设研究	163
第三节	GPS 在大桥精密控制测量中的应用	167
第四节	GPS 基础控制网在城市轨道建设中的应用	173
第五节	基于 GPS 和小波分析的桥梁振动频率监测	177
第六节	GPS RTK 技术在临海产业区测量中的应用	181

目 录

第七节	基于 GPS/PDA 技术的土地调查系统设计与实现·····	185
第八节	基于 RFID 与 GPS 技术的标签定位方法·····	190
第八章	GNSS 应用展望·····	198
第一节	基于 GNSS 的电离层模型研究进展·····	198
第二节	GNSS 掩星探测大气的研究与展望·····	203
第三节	GNSS 气象探测技术及其应用·····	208
第四节	现代测绘技术(3S)的内涵与发展·····	212
第五节	信息化测绘体系的内涵与建设·····	215
第六节	我国现代测绘基准体系的构建·····	222
参考文献 ·····		230

第一章 全球导航卫星系统 (GNSS)的发展

第一节 GPS 系统

全球定位系统(Global Positioning System, GPS),是美国从 20 世纪 70 年代开始研制,历时 20 年,耗资 200 亿美元,于 1994 年全面建成的利用导航卫星进行测时和测距,具有在海、陆、空进行全方位实时三维导航与定位能力的新一代卫星导航与定位系统。它是继阿波罗登月计划、航天飞机后的美国第三大航天工程。GPS 已经成为当今世界上最实用,也是应用最广泛的全球精密导航、指挥和调度系统。

一、GPS 系统组成

GPS 系统主要包括有三大组成部分,即空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分。

(一) 空间星座部分

由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成 GPS 卫星星座,记作(21+3) GPS 星座。24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道平面内,轨道平面相对于赤道平面的倾角为 55° ,各个轨道平面之间交角 60° 。每个轨道平面内的各卫星之间的交角 90° ,任一轨道平面上的卫星比西边相邻轨道平面上的相应卫星超前 30° 。在 20000 km 高空的 GPS 卫星,当地球对恒星来说自转 1 周时,它们绕地球运行 2 周,即绕地球 1 周的时间为 12 恒星时。这样,对于地面观测者来说,每天将提前 4 min 见到同一颗 GPS 卫星。每颗卫星每天约有 5 h 在地平线以上,同时位于地平线以上的卫星数量随着时间和地点的不同而不同,最少可见到 4 颗,最多可见到 11 颗。在用 GPS 信号导航定位时,为了计算观测站的三维坐标,必须观测 4 颗 GPS 卫星,称为定位星座。这 4 颗卫星在观测过程中的几何位置分布对定位精度有一定的影响。对于某地某时,甚至不能测得精确的点位坐标,这种时间段叫做“间隙段”。但这种时间间隙段是很短暂的,并不影响全球绝大多数地方的全天候、高精度、连续实时的导航定位测量。GPS 工作卫星的编号和试验卫星基本相同。

(二) 地面监控部分

GPS 工作卫星的地面监控系统目前主要由分布在全球的 1 个主控站、3 个信息注入站和 5 个监测站组成。对于导航定位来说, GPS 卫星是一动态已知点。卫星的位置是依据卫星发射的星历——描述卫星运动及其轨道的参数算得的。每颗 GPS 卫星所播发的星历, 是由地面监控系统提供的。卫星上的各种设备是否正常工作, 以及卫星是否一直沿着预定轨道运行, 都要由地面设备进行监测和控制。地面监控系统的另一重要作用是保持各颗卫星处于同一时间标准——GPS 时间系统。这就需要地面站监测各颗卫星的时间, 求出时钟差。然后由地面注入站发给卫星, 卫星再由导航电文发给用户设备。GPS 的空间部分和地面监控部分是用户广泛应用该系统进行导航和定位的基础, 均为美国所控制。

(三) 用户设备部分

GPS 信号接收机的任务是: 能够捕获到按一定卫星高度截止角所选择的待测卫星的信号, 并跟踪这些卫星的运行, 对所接收到的 GPS 信号进行变换、放大和处理, 以便测量出 GPS 信号从卫星到接收机天线的传播时间, 解译出 GPS 卫星所发送的导航电文, 实时地计算出观测站的三维位置, 甚至三维速度和时间, 最终实现利用 GPS 进行导航和定位的目的。

静态定位中, GPS 接收机在捕获和跟踪 GPS 卫星的过程中固定不变, 接收机高精度地测量 GPS 信号的传播时间, 利用 GPS 卫星在轨的已知位置, 解算出接收机天线所在位置的三维坐标。而动态定位则是用 GPS 接收机测定一个运动物体的运行轨迹。GPS 信号接收机所位于的运动物体叫做载体(如航行中的船舰, 空中的飞机, 行走的车辆等)。载体上的 GPS 接收机天线在跟踪 GPS 卫星的过程中相对地球而运动, 接收机用 GPS 信号实时地测得运动载体的状态参数(瞬间三维位置和三维速度)。

接收机硬件和机内软件以及 GPS 数据的后处理软件包, 构成完整的 GPS 用户设备。GPS 接收机的结构分为天线单元和接收单元两大部分。对于测地型接收机来说, 两个单元一般分成两个独立的部件, 观测时将天线单元安置在观测站上, 接收单元置于观测站附近的适当地方, 用电缆线将两者连接成一个整机。也有的将天线单元和接收单元制作成一个整体, 观测时将其安置在测站点上。

GPS 接收机一般用蓄电池做电源, 同时采用机内/机外两种直流电源。设置机内电池的目的在于更换外电池时不中断连续观测。在用机外电池的过程中, 机内电池自动充电。关机后, 机内电池为 RAM 存储器供电, 以防止丢失数据。

近几年,国内引进了许多种类型的 GPS 测地型接收机。各种类型的 GPS 测地型接收机用于精密相对定位时,其双频接收机精度可达 $5\text{ mm}+1\text{ PPM}\times D$,单频接收机在一定距离内精度可达 $10\text{ mm}+2\text{ PPM}\times D$ 。用于差分定位其精度可达亚米级甚至厘米级。目前,各种类型的 GPS 接收机体积越来越小,重量越来越轻,便于野外观测。

二、GPS 定位原理

GPS 系统采用高轨测距体制,以观测站至 GPS 卫星之间的距离作为基本观测测量。为了获得距离观测测量,主要采用两种方法:一是测量 GPS 卫星发射的测距码信号到达用户接收机的传播时间,即伪距测量;二是测量具有载波多普勒频移的 GPS 卫星载波信号与接收机产生的参考载波信号之间的相位差,即载波相位测量。采用伪距观测测量定位速度最快,而采用载波相位观测测量定位精度最高。通过对 4 颗或 4 颗以上的卫星同时进行伪距或相位的测量即可推算出接收机的三维位置。

按定位方式,GPS 定位分为单点定位和相对定位(差分定位)。单点定位就是根据一台接收机的观测数据来确定接收机位置的方式,它只能采用伪距观测测量。相对定位(差分定位)是根据 2 台以上接收机的观测数据来确定观测点之间的相对位置的方法,它既可采用伪距观测测量也可采用相位观测测量。在定位观测时,GPS 定位分为动态定位和静态定位。若接收机相对于地球表面运动,则称为动态定位。若接收机相对于地球表面静止,则称为静态定位。

三、GPS 主要特点

GPS 的问世标志着电子导航技术发展到了一个更加辉煌的时代。GPS 系统与其他导航系统相比,主要特点有如下六个方面:

(1) 定位精度高。应用实践已经证明,GPS 相对定位精度在 50 km 以内可达 10^{-6} ,100~500 km 可达 10^{-7} ,1000 km 可达 10^{-9} 。此外,GPS 可为各类用户连续地提供高精度的三维位置、三维速度和时间信息。

(2) 观测时间短。随着 GPS 系统的不断完善和软件的不断更新,目前,20 km 以内相对静态定位仅需 15~20 min;快速静态相对定位测量时,当每个流动站与基准站相距在 15 km 以内时,流动站观测时间只需 1~2 min,然后可随时定位,每站观测只需几秒钟,实时定位速度快。目前 GPS 接收机的一次定位和测速工作在 1 s 甚至更小的时间内便可完成,这对高动态用户来讲尤其重要。

(3) 执行操作简便。随着 GPS 接收机不断改进,自动化程度越来越高,有的已达“傻瓜化”的程度;接收机的体积越来越小,重量越来越轻,极大地减轻了测量工作者的工作紧张程度和劳动强度,使野外工作变得轻松愉快。

(4) 全球、全天候作业。由于 GPS 卫星数目较多且分布合理,所以在地球

上任何地点均可连续同步地观测到至少 4 颗卫星,从而保障了全球全天候连续实时导航与定位的需要。目前 GPS 观测可在 1 天 24 h 内的任何时间进行,不受阴天黑夜、起雾刮风、下雨下雪等气候的影响。

(5) 功能多、应用广。GPS 系统不仅可用于测量、导航,还可用于测速、测时,测速的精度可达 0.1 m/s,测时的精度可达几十毫微秒,其应用领域不断扩大。

(6) 抗干扰性能好、保密性强。由于 GPS 系统采用了伪码扩频技术,因而 GPS 卫星所发送的信号具有良好的抗干扰性和保密性。

四、GPS 目前应用状况

GPS 系统的建立给导航和定位技术带来了巨大的变化,它从根本上解决了人类在地球上的导航和定位问题,可以满足不同用户的需要。

用 GPS 信号可以进行海、空、陆的导航,导弹的制导,大地测量和工程测量的精密定位,时间的传递和速度的测量等。在测绘领域,GPS 卫星定位技术已经用于建立高精度的全国性的大地测量控制网,测定全球性的地球动态参数;用于建立陆地海洋大地测量基准,进行高精度的海岛陆地联测以及海洋测绘;用于监测地球板块运动状态和地壳形变;用于工程测量,成为建立城市与工程控制网的主要手段;用于测定航空航天摄影瞬间的相机位置,实现仅有少量地面控制或无地面控制的航测快速成图,导致地理信息系统、全球环境遥感监测的技术革命。

总之,GPS 技术已发展成多领域(陆地、海洋、航空航天)、多模式(GPS、DGPS、LADGPS、WADGPS 等)、多用途(在途导航、精密定位、精确定时、卫星定轨、灾害监测、资源调查、工程建设、市政规划、海洋开发、交通管制等)、多机型(测地型、定时型、手持型、集成型、车载式、船载式、机载式、星载式、弹载式等)的高新技术国际性产业。GPS 的应用领域,上至航空航天器,下至捕鱼、导游和农业生产,已经无所不在了,正如人们所说的“今后 GPS 的应用,将只受人类想象力的制约”。

五、GPS 创新思路

1991 年的海湾战争中,装在大衣口袋中的 GPS 接收机为无地图沙漠作战发挥了巨大作用。在“盟军行动”中,把惯导/GPS 集成系统装入导弹和制导导弹,使命中精度达到 9 m,而且使机载炸弹具备了在夜间和恶劣天气条件下的精确打击能力。由此可见,GPS 早已成为高技术武器平台不可缺少的关键组成部分,在未来军事战争中 GPS 将发挥更加巨大的作用。这样的形势迫使 GPS 技术必须要有新的突破。经过科学家不懈的努力钻研,如今已经取得一些成绩。

(1) 采用创新轨道设计。欧洲多年来从未中断对导航定位卫星的研究、论

证。在第一代中,有“全球导航卫星系统”(GNSS)以及“欧洲静止轨道导航重叠业务系统”(EGNOS)等,它们都是结合利用 GPS 和静止轨道通信卫星的方案。在第二代中,目前采用创新轨道设计的“伽利略”方案被认为是能够实现最少投入而达到理想应用目的的最佳方案。它既是独立系统,又有开放性特点,可与 GPS 兼容。这种系统还将在民航选择最佳航线、飞机安全进场着陆等领域有新的应用突破。

(2) 美国大力开发抗干扰和干扰技术。为防止地方干扰,美国在从 2005 年发射的第 7 颗 GPS-2F 卫星上开始使用新型信号结构。这样,除更加保密外,还可实现 6 dB 的信号/干扰比的改善。为此,正在研制不受干扰和欺骗的 GPS 接收机应用模块(GRAM)和选择利用抗欺骗模块(SAASM),同时装有这两种模块的接收机被称为“国防部高级 GPS 接收机”(DARG)。

美国还在开发抗干扰的军事伪系统(Military Pseudolites),它可为地域发射 GPS 差分信号,以改进信号捕获并提高质量。为保护军用飞机使用 GPS,美国还在开发微带自适应天线阵列。

为使敌方不能使用 GPS,美国已开发出 GPS 干扰机,只有可口可乐瓶大小的干扰机可使敌方无法接收 GPS 信号。

(3) 提高 GPS 导航信号性能的技术措施。目前使用的模拟铯钟,其性能预测困难,而且输出频率会随着卫星运行过程中温度和磁场的变化而变化,因此正在开发计算机控制的数字化铯钟,通过调整内部参数和补偿环境影响使铯钟性能达到最佳化。

六、GPS 应用前景

进入 21 世纪,GPS 在各方面的应用都将加强和发展。主要包括综合服务系统、电离层监测、对流层监测、卫星测高、卫星追踪等。

(一) GPS 在综合服务系统中的应用

在全球地基 GPS 连续运行站(约 200 个)的基础上所组成的 IGS(International GPS Service),是 GPS 连续运行站网和综合服务系统的范例。它无偿向全球用户提供 GPS 各种信息,如 GPS 精密星历、快速星历、预报星历、IGS 站坐标及其运动速率、IGS 站所接收的 GPS 信号的相位和伪距数据、地球自转速率等。这些信息在大地测量和地球动力学方面支持了无数的科学项目,包括电离层、气象、参考框架、精密时间传递、高分辨的推算地球自转速率及其变化、地壳运动等。

(1) IGS 现在提供的轨道有三类:一是最终(精密)轨道,要在 10~12 天以后得到,常用于精密定位;二是快报轨道,要在 1 天以后得到,常用于大气的水汽含量、电离层计算等;还有一类是预报轨道。关于对 GPS 星钟偏差方面的估计,

目前只有 2 个 IGS 分析中心提供。IGS 目前近 200 个永久连续运行的全球跟踪站中,使用的外部频率标准近 70 个,其中约 30 个使用氢钟,约 20 个使用铯原子钟,约 20 个使用铷原子钟,其余的使用 GPS 内部的晶体振荡器。

(2) IGS 还提供极移和世界时信息。IGS 公布的最终的每日极坐标 (x, y) ,其精度为 ± 0.1 mas,快报的相应精度为 ± 0.2 mas。GPS 作为一种空间大地测量技术,本身并不具备测定世界时(UT)的功能,但由于一方面 GPS 卫星轨道参数和 UT 相关,另一方面,也和测定地球自转速率有关,而自转速率又是 UT 的时间导数,因此 IGS 仍能给出每天的日长(LOD)值。IGS 现在还能进一步求定章动项和高分辨率的极移(达每 2 h 1 次,而不是现在的 1 天 1 次),后者主要源于 IGS 各观测站观测质量的提高,数据传输迅速和及时,以及数据处理方法的改进,并没有本质的改变,而前者却是技术上的一个跨越。

(3) IGS 提供的一个极为有用和重要的信息是 IGS 的那些连续运行站(跟踪站)的坐标、相应的框架、历元和站移动速度。前者精度好于 1 cm,后者精度好于 1 mm/年。IGS 站坐标所采用的坐标参考框架是和 IERS 互相协调的。1993 年末开始使用 ITRF91,1994 年使用 ITRF92,1995 年到 1996 年中期使用 ITRF93,1996 年中期到 1998 年 4 月一直使用 ITRF94,1998 年 3 月 1 日转而采用 ITRF96,1999 年 8 月 1 日开始 IGS 采用 ITRF97。

(4) IGS 在测定短期章动方面的新贡献。众所周知,地球自转轴在地球表面上的移动称为极移,而它在惯性空间中的运动称为岁差和章动。GPS 技术不能确定 UT,而只能确定 LOD。同样这一原则也适用于章动,即 GPS 数据不能测定章动的经度和倾角,但能确定这些量的时间变率(对时间的导数)。基于这一原理,用了 3 年的每天的赤经变化率 ψ 和倾角变化率 ϵ 值的资料,估算短期章动项的章动振幅,并与 VLBI 结果作了比较。结论认为,就测定章动短周期项而言,GPS 方法优于 VLBI,而对超过 1 个月以上的长周期而言,VLBI 较优。

由于对 GPS 技术的 IGS 作出了如此大的成绩和贡献,因此 1999 年 9 月各国的 VLBI 站和 SLR 站决定也组织类似于 IGS 的相应的 IVS 和 IVRS。法国的 DORIS 和德国的 PRARE 也正在考虑成立类似模式的国际组织,力求使这类空间大地测量观测系统组织起来,提高效率、精度和可靠性。

就地区性的 GPS 连续运行站网和综合服务系统而言,发达国家也已做了很多工作,取得了进展,如在美国布设了 GPS“连续运行参考站”(CORS)系统。它由美国大地测量局(NGS)负责,该系统的当前目标是:① 使美国各地的全部用户能更方便地利用它来达到厘米级水平的定位和导航;② 促进用户利用 CORS 来发展 GIS;③ 监测地壳形变;④ 求定大气中的水汽分布;⑤ 监测电离层中自由电子浓度和分布。

美国 NGS 为了强化 CORS 系统,从现在起,将以每个月增加 3 个站的速度来改善该系统的空间覆盖率。此外,CORS 的数据和信息包括接收的伪距和相位信息、站坐标、站移动速率矢量、GPS 星气、站四周的气象数据等,用户可以通过信息网络,如 Internet 很容易下载而得到。英国建立的“连续运行 GPS 参考站”(COGPS)系统的功能和目标类似于上述 CORS,但结合英国本土情况还多了一项监测英伦三岛周围的海平面相对和绝对变化的任务。英国的 COGPS 由测绘局、环保局、气象局、农业部、海洋实验室共同负责。目前已有近 30 个 GPS 连续运行站,今后的打算是扩建 COGPS 系统和建立一个中心,其主要任务是传输、提供、归档、处理和分析 GPS 各站数据。

日本已建成全国近 1200 个 GPS 连续运行站网的综合服务系统。目前它在以监测地壳形变、预报地震为主功能的基础上,结合气象和大气部门开展 GPS 大气学的服务。

(二) GPS 应用于电离层监测

GPS 在监测电离层方面的应用,也是 GPS 空间气象学的开端。太空中充满了等离子体、宇宙线粒子、各种波段的电磁辐射,由于太阳常在 1 s 内抛出百万吨量级的带电物,电离层由此而受到强烈干扰,这是空间气象学研究的一个对象。通过测定电离层对 GPS 讯号的延迟来确定在单位体积内总自由电子含量(TEC),以建立全球的电离层数字模型。

GPS 卫星发射 L1 和 L2 两个载波。由这两个载波可以削弱电离层对 GPS 定位的影响,或者说可以求得电离层折射。因为这一折射和载波频率有关。当人们建立地区或全球电离层数字模型时,总是作简化的假定,所有自由电子含量都表示在一个单层面上,该面离地面高为 H 。这样的话,电子含量正可以用在接收机和卫星连线与此单层面交点(刺入点)处的电子含量(点上) E_s 表示,它可以视为电子含量(面上) E 与刺入点处天顶距 Z' 的函数 $E \cos Z' = E_s$ 。可以将球面上的电子浓度 E_s 加以模型化,例如写成经纬度的球谐函数模型等,这方面有很多专家提出了各种模型。IGS 提出了一种电离层地图的交换格式(Ionosphere Map Exchange Format, IONEX-Format),它的作用是使基于各种理论和技术所获得的电离层地图能在统一规格的基础上进行综合和比较。电离层模型有各不相同的理论基础,而取得的数据来源的技术也不同,数据覆盖面也不完整,所以目前只能将 IGS 和全球各种 TEC 地图和 GPS 卫星讯号的差分码偏差(Differential Code Biases, DCBS)用 IONEX 形式向全世界用户提供,下一步将通过比较,逐步联合起来。

(三) GPS 应用于对流层监测

在 GPS 应用中,早期主要是轨道误差影响定位精度,而且早期的 GPS 基线

相对来说比较短,高差不大,因此对对流层的研究没有给予很大的重视。直到近期由于 GPS 轨道精度大大提高后,对流层折射已成为限制 GPS 定位精度提高的一个重要障碍。假设一个高程基本为零的地区,接收机所接收的 GPS 讯号从天顶方向传来的话,其延迟可以达到 2.2~2.6 m 这一量级,而 2 h 内这一延迟变化可达 10 cm(所以 IGS 分析中心提供的对流层参数是用 2 h 间隔一次)。也由于这个实际情况,对流层折射要顾及其随机过程的变化来加以模型化。

在 GPS 应用于对流层研究中,IGS 的快速轨道和预报轨道信息对于天气预报会起重大作用。此外,IGS 通过德国 GFZ 的“IGS 对流层比较和协调中心”提供的每 2 h 的对流层天顶延迟系列就像是控制点,对于区域性或局部性的对流层研究来说,可以起到对流层延迟绝对值的标定作用。

与地基 GPS 大气监测不同,星基或空基 GPS 掩星法测定气象的技术有覆盖面广、垂直分辨好、数据获取速度快的优点。这一技术的原理是将 GPS 接收机放在某一低轨卫星(LEO)或飞行器的平台上,该 GPS 接收机一方面起到对该卫星(或飞行器)精确定轨的作用,同时又应用 GPS 掩星技术起到大气探测器的作用。1997 年进行的 GPS/MET 研究项目,证实了这个设想是可行的。2000 年 7 月德国发射的 CHAMP 卫星利用 GPS 掩星法进行了全球对流层折射(包括大气可降水分)的测定。

在今后几年中,还有阿根廷的 SAC-C,我国台湾的 COS-MIC,这些 LEO 卫星都要用星载 GPS 来定轨和利用掩星法测大气。今后利用星载 GPS 的气象和电子浓度截面数值,结合地面 GPS 站数据,作成层折图像提供使用。预计它们将在天气预报、空间天气预报、气象监测方面做出巨大贡献。

(四) GPS 作为卫星测高仪的应用

多路径效应是 GPS 定位中的一种噪音,至今仍是高精度 GPS 定位中一个很不容易解决的“干扰”。过去几年利用大气对 GPS 信号延迟的噪声发展了 GPS 大气学,目前也正在利用 GPS 定位中的多路径效应发展 GPS 测高技术,即利用空载 GPS 作为测高仪进行测高。它是通过利用海面或冰面所反射的 GPS 信号,求定海面或冰面地形、测定波浪形态、洋流速度和方向。通常卫星测高或空载测高测的是一个点,连续测量结果在反向面上是一个截面,而 GPS 测高则是测量有一定宽度的带,因此可以测定反射表面的起伏(地形)。据报告,试验时在空载平面安装 2 台 GPS 接收机,1 台天线向上用于对载体的定位,1 台天线向下用于接收 GPS 在反射面上的讯号。美国在海上作了测定洋流和波浪的试验。丹麦在格陵兰作了测定冰面地形及其变化的试验。

(五) GPS 在卫星追踪技术中的应用

卫星对卫星的追踪(SST)技术的实质是高分辨率的测定两颗卫星间的距离

变化,一般它分为两类,即高低卫星追踪和低低卫星追踪。前一类是高轨卫星(如地对地静止卫星, GPS 卫星等)追踪低轨(LEO)卫星或空间飞行器,后一类是处于大体为同一低轨道上的两颗卫星之间的追踪,两颗卫星间可以相距数千千米,这两类 SST 技术都将 LEO 卫星作为地球重力场的传感器,以卫星间单向或双向的微波测距系统测定卫星间的相对速度及其变率。这一速度的不规则变化所反映的信息中,就包含了地球重力场信息。卫星轨道愈低,这一速度变化受重力场的影响愈明显,所反映重力场的分辨率也愈高。

第二节 GLONASS 系统

“格洛纳斯”(GLONASS),是俄罗斯研发的“全球卫星导航系统”的缩写。该系统由卫星星座、地面监测控制站和用户设备三部分组成。俄罗斯 1993 年开始独自建立本国的全球卫星导航系统。GLONASS 技术,可为全球海陆空以及近地空间的各种军、民用户全天候、连续地提供高精度的三维位置、三维速度和时间信息。GLONASS 在定位、测速及定时精度上则优于施加选择可用性(SA)之后的 GPS,由于俄罗斯向国际民航和海事组织承诺将向全球用户提供民用导航服务,并于 1990 年 5 月和 1991 年 4 月两次公布 GLONASS 的 ICD,为 GLONASS 的广泛应用提供了方便。GLONASS 的公开化,打破了美国对卫星导航独家经营的局面,既可为民间用户提供独立的导航服务,又可与 GPS 结合,提供更好的精度几何因子(GDOP);同时也降低了美国政府利用 GPS 施以主权威慑给用户带来的后顾之忧,因此,引起了国际社会的广泛关注。

一、GLONASS 系统组成

(1) GLONASS 星座。GLONASS 星座由 21 颗工作星和 3 颗备份星组成,所以 GLONASS 星座共由 24 颗卫星组成。24 颗卫星均匀地分布在 3 个近圆形的轨道平面上,这三个轨道平面两两相隔 120° ,每个轨道面有 8 颗卫星,同平面内的卫星之间相隔 45° ,轨道高度 1.91 万 km,运行周期 11 h 15 min,轨道倾角 64.8° 。

(2) 地面支持系统。地面支持系统由系统控制中心、中央同步器、遥测遥控站(含激光跟踪站)和外场导航控制设备组成。地面支持系统的功能由苏联境内的许多场地来完成,随着苏联的解体,GLONASS 系统由俄罗斯航天局管理,地面支持段已经减少到只有俄罗斯境内的场地了,系统控制中心和中央同步处理器位于莫斯科,遥测遥控站位于圣彼得堡、捷尔诺波尔、埃尼谢斯克和共青城。

(3) 用户设备。GLONASS 用户设备(即接收机)能接收卫星发射的导航信号,并测量其伪距和伪距变化率,同时从卫星信号中提取并处理导航电文。接收