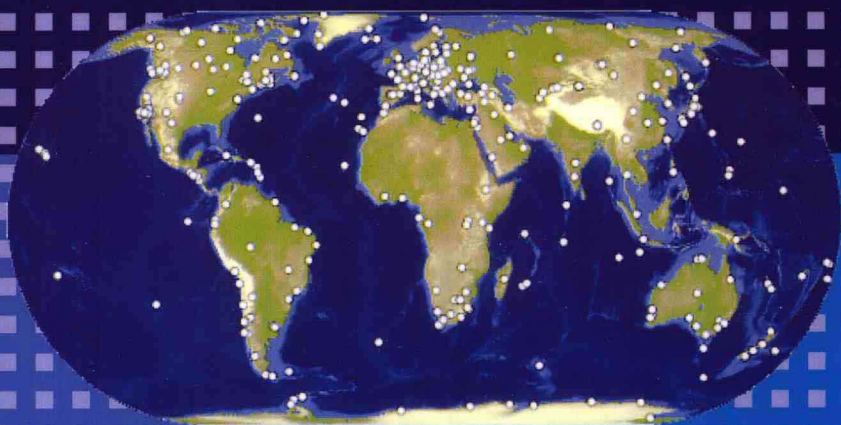


地基 GPS

实时水汽反演系统建设速成



张京江 楚艳丽 张朝林 编著



气象出版社
China Meteorological Press

地基 GPS 实时水汽 反演系统建设速成

张京江 楚艳丽 · 张朝林 编著

内 容 简 介

对地基 GPS 数据进行处理分析以获取大气水汽信息,是一项细致而繁复的工作,但是目前针对地基 GPS 气象学数据处理方面的专著还不多,而科研和业务人员也确实有这方面的切实需求。本书主要围绕中国气象局北京城市气象研究所在地基 GPS 气象学业务和科研方面所取得的一些研究成果开展了论述,着重介绍了准实时地基 GPS 大气水汽的处理分析方法,目的是帮助需要开展地基 GPS 气象学研究的部门,在较短的时间内能够使用 Bernese 软件建立起区域地基 GPS 实时水汽反演系统,以便尽快开展 GPS 水汽监测数据的分析与应用工作。

本书共分三章,分别对地基 GPS 气象学的基本原理进行了简要介绍,详细说明了区域地基 GPS 实时水汽反演系统的建立方法和步骤。本书既可作为地基 GPS 遥感大气水汽数据处理方面的入门书籍,也可用作地基 GPS 气象学研究的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

地基 GPS 实时水汽反演系统建设速成 / 张京江, 楚艳丽,

张朝林编著. —北京: 气象出版社, 2011. 10

ISBN 978-7-5029-5287-7

I. ①地… II. ①张… ②楚… ③张… III. ①全球定位系统—应用—水汽—研究 IV. ①P426-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 185541 号

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码: 100081

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

电 话: 总编室: 010-68407112; 发行部: 010-68409198

责任编辑: 张 斌

终 审: 周诗健

封面设计: 博雅思企划

责任技编: 吴庭芳

印 刷 者: 北京中新伟业印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

印 张: 14

字 数: 352 千字 彩 插: 2

版 次: 2011 年 10 月第 1 版

印 次: 2011 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 60.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

前 言

随着社会经济的快速发展,人民生活水平的不断提高,社会各界对天气预报的关注达到了前所未有的程度,尤其在北京这样的超大城市,人们不仅需要气象部门提供一个地区总体的天气情况预报,还需要气象部门对具体地区提供准确及时的精细天气预报服务,这就对预报员和气象业务数值预报模式提出了更高的要求。因此高效能的大气监测站网及其提供的气象观测数据是满足上述需求所必须具备的前提条件。

20 世纪末以来,应用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)来监测卫星信号在地球大气中的延迟量进而反演出大气气象要素的方法,及其在气象业务中的应用水平得到了不断的完善和提高,并且因此产生了一个新的气象学分支——GPS 气象学,也被称为 GPS/MET。因为接收 GPS 卫星信号的接收机可以被安置在地球表面,也可以被安置在低轨道小卫星上,所以 GPS/MET 包含了地基 GPS 气象学和空基 GPS 气象学两个领域。地基 GPS/MET 的发展最先起源于反演大气整层水汽含量,而空基 GPS/MET 则关注于反演大气的气压、温度和湿度等要素的廓线。本书主要围绕编者的科研项目成果,只针对地基 GPS 气象学相关内容进行论述。

与其他大气水汽探测手段相比较,如无线电探空、微波辐射计等,利用地基 GPS 系统反演大气水汽的方法具有全天候、不需定标、稳定高效的特点,因其使用的探测设备的价格相对低廉且适宜于布网观测,其获得的大气水汽观测数据兼具高精度、较高时间和空间分辨率的优点。目前在全球范围内,地基 GPS 监测站网所提供的水汽观测数据已经成为传统观测手段的重要和有益补充,为天气和气候学研究提供了更加细腻和更大范围内的大气水汽信息。

国内外的研究成果表明,目前已经建立了 3 种地基 GPS 的大气水汽反演方法:(1)反演 GPS 测站天顶方向水汽总量的方法,该方法目前已经进入准实时业务应用阶段;(2)反演包含水汽的空间分布信息的 GPS 卫星与地基 GPS 测站间斜路径水汽总量的方法,该方法尚处于测试分析阶段;(3)利用层析或变分同化技术由斜路径水汽总量重建四维水汽场的方法,该方法还有待进一步完善和提高。同时,地基 GPS 水汽数据在相关气象领域中也得到了广泛应用,例如:与无线电探空湿度观测数据作比对,有助于发现和分析探空湿度传感器可能存在的干偏差;用于数值模式湿度场模拟结果的检验分析;开展数值模式变分同化研究,用以改善中尺度数值预报模式的初始场;应用于气候学研究。

国家卫星气象中心、北京大学、上海市气象局和北京市气象局等单位在我国较早开展了地基 GPS 气象学方面的研究和业务应用工作,并且取得了一些非常有益的成果。正因为地基 GPS 探测技术在气象领域中具有巨大的应用潜力,所以得到了各地气象部门的重视。当前,国内一些省市的气象部门也面临着承担区域 GPS 站网的建设和地基 GPS 气象学的应用研究任务,因此必须建立一套稳定、高精度的“地基 GPS 实时水汽反演系统”以保证该项工作的顺利开展。

对地基 GPS 数据进行处理分析以获取大气水汽信息,是一项细致而繁复的工作,但是目前针对地基 GPS 气象学数据处理方面的专著还不多,而科研和业务人员也确实有这方面的切实需求,因此本书主要的写作目的是帮助需要开展地基 GPS 气象学研究的部门在较短的时间内,能够使用 Bernese 软件建立起区域地基 GPS 实时水汽反演系统,以便尽快开展 GPS 水汽监测数据的分析与应用工作。

中国气象局北京城市气象研究所(简称城市所)是北京市气象局的直属单位。自 2000 年起,城市所在地基 GPS/MET 研究领域开展了系统的科研与业务技术支持工作,广泛开展了国内外科技合作,掌握了地基 GPS 研究和应用领域中的国际领先技术,并且将各项科研成果在北京地基 GPS 大气水汽监测网中得到了有效应用。2006 年,北京市气象局联合区域内相关科研和业务部门,依托华北区域气象中心,整合了京津冀地区地基 GPS 监测网数据,促成了京津冀三地地基 GPS 观测数据的共享,保证了区域中心能够准实时处理分析数据,及时高效地为相关气象业务部门提供京津冀地区地基 GPS 水汽产品,在北京及周边地区建立了一种新的现代化气象观测手段,为提高精细数值天气预报水平,增强京津冀地区降水预报能力,进而加强对该地区洪涝灾害的预警能力提供了一种稳定高效的数据支撑。近年来,中国气象局一直在大力推进全国范围内的地基 GPS 大气探测网的建设 and 数据共享方面的工作,这为我国相关气象部门开展地基 GPS 气象学应用研究工作创造了更加便捷的条件。

本书由城市所 GPS/MET 研究小组主编,共分 3 章,分别对地基 GPS 气象学的基本原理进行了简要介绍,详细说明了区域地基 GPS 实时水汽反演系统的建立方法和步骤,并且总结了城市所在地基 GPS 气象学科研究和业务工作的不同阶段所取得的成果。第 1 章由楚艳丽根据相关文献整理编著;第 2 章由张京江编著,其中部分内容译自该软件的使用手册《Bernese GPS Software 5.0》,编者略有修改;第 3 章由张朝林、楚艳丽重点围绕城市所相关成果整理编著;附件 1 和附件 2 的内容译自该软件的使用手册《Bernese GPS Software 5.0》。本书既可用于地基 GPS 遥感大气水汽数据处理方面的入门书籍,也可用作地基 GPS 气象学研究的参考书。

在本书的编撰过程中,得到了气象出版社和作者所在单位北京城市气象研究所的大力支持,得到了北京市科委重大科研项目(H010510120119)、国家科技部国际合作重点项目(2003DFB00011)、北京市科委“全球定位系统单双频地基水汽遥测技术研究”项目、国家科技部科技支撑计划项目(2008BAC37B03)、国家自然科学基金项目(40705009、40905052 和 41005005)、财政部中央级公益性科研院所专项基金项目(IUMKY200601、IUMKY200703)等的联合资助,在此一并表示衷心的感谢。

北京城市气象研究所的陈敏博士、美国 UCAR/COSMIC 的 J. Braun 博士、中国国土资源航空物探遥感中心刘圣伟高工提供了部分图形,北京城市气象研究所王京丽研究员、王迎春研究员、李炬高级工程师、李青春高级工程师、陈明轩副研究员、北京市气象局刘强高级工程师、马舒庆研究员、梁丰高级工程师、谢璞研究员、北京大学毛节泰教授、国家地震局顾国华研究员、北京市政府政务网络管理中心戴连军高级工程师、美国 UCAR Ying-Hwa Kuo 博士等都对本研究给予了非常重要的支持和帮助,编者在这里向诸位专家、领导表示衷心的感谢。

目前北京城市气象研究所在地基 GPS/MET 应用研究领域积累了一点经验,编者恳切希望能够将我们这 10 年来的成果与各位同行进行分享,一方面是对我们过往工作的总结,另一方面也希望抛砖引玉,和各位同行一起努力来促进我国地基 GPS 气象学应用研究工作的进一步开展。由于作者水平有限,难免存在错误和不妥之处,恳请各位读者给予批评和指正。

作者

2010 年 11 月于北京

目 录

前言

第 1 章 地基 GPS 气象学原理	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 GPS 全球导航定位系统	(1)
1.2.1 GPS 卫星信号	(1)
1.2.2 GPS 测量误差	(2)
1.2.3 GPS 信号线性组合	(3)
1.2.4 GNSS 服务局	(4)
1.2.5 GPS 数据处理分析软件	(5)
1.2.6 GNSS 卫星导航系统	(5)
1.3 GPS 信号的延迟和弯曲	(6)
第 2 章 地基 GPS 气象网的资料解算	(8)
2.1 引言	(8)
2.2 应用 Bernese 软件建立地基 GPS 实时水汽反演系统	(8)
2.2.1 Bernese 软件的安装	(8)
2.2.2 Bernese 5.0 软件的结构	(18)
2.2.3 Bernese 5.0 软件发布的 4 个 PCF 控制文件	(27)
2.2.4 使用双差方法处理自己的区域数据	(48)
2.2.5 自动作业方式(全自动业务化流程)的建立	(144)
2.3 系统使用与维护	(149)
2.3.1 系统结构目录	(149)
2.3.2 功能模块说明	(151)
2.3.3 自动运行	(154)
2.3.4 系统维护	(155)
2.3.5 历史资料的处理	(155)
2.3.6 修改观测站信息	(156)
第 3 章 地基 GPS 反演大气水汽原理及其在科研和业务中的应用	(161)
3.1 引言	(161)

3.1.1	大气中的水	(161)
3.1.2	地基 GPS 反演大气水汽技术的研究进展	(162)
3.1.3	地基 GPS 水汽数据在气象学中的应用研究进展	(162)
3.2	地基 GPS 反演大气水汽基本原理	(163)
3.2.1	天顶总水汽含量 GPS/PW 反演方法	(163)
3.2.2	倾斜路径总水汽含量 GPS/SW 反演方法	(164)
3.2.3	三维大气水汽(层析)反演方法	(166)
3.3	北京地基 GPS 水汽数据对比分析	(168)
3.3.1	PW 对比分析	(168)
3.3.2	微波辐射计获取与 GPS 反演 SW 对比	(172)
3.4	北京地基 GPS/PW 与地面气象要素关系	(174)
3.5	北京地基 GPS 水汽数据在天气诊断分析中的应用	(174)
3.5.1	GPS/PW 数据在分析暴雨过程中的应用	(174)
3.5.2	GPS/SW 数据在分析一次飑线过程中的应用	(177)
3.6	北京地基 GPS/PW 数据在中尺度数值预报模式同化研究中的应用	(178)
3.6.1	在天气个例分析中的应用	(179)
3.6.2	在模式降水预报评估中的应用	(184)
3.7	GPS/PW 数据在人工影响天气应用研究中的应用	(185)
3.7.1	建立北京地区空中水资源的科学概念模型	(185)
3.7.2	帮助人工增水作业	(186)
3.8	北京地基 GPS 反演大气水汽业务系统	(186)
3.8.1	通讯系统	(187)
3.8.2	GPS 水汽产品发布系统	(188)
附件 1 地基 GPS 大气水汽解算业务系统软件安装手册		(190)
附件 2 安装 Bernese GPS 软件 5.0 版本的 DE200 星历		(204)
参考文献		(208)
推荐阅读文献		(210)

插图目录

图 1.1	IGS 全球站分布图	(5)
图 2.1	Bernese 5.0 安装目录结构图	(19)
图 2.2	Bernese 5.0 工作目录结构图	(25)
图 2.3	西安 GPS 测站分布图	(57)
图 2.4	天顶总延迟量文件	(143)
图 2.5	用户根目录标准结构	(149)
图 2.6	gpsdata 目录结构图	(150)
图 2.7	全球电离层模型数据和接收机码偏差月均值数据下载	(151)
图 2.8	卫星轨道数据(IGU)下载	(151)
图 2.9	本地数据下载	(152)
图 2.10	全球电离层模型文件使用原则	(153)
图 2.11	GPSRUN 子模块的调用	(154)
图 2.12	区域水汽分布等值线图	(154)
图 3.1	用体元方法估算 SW 值的示意图	(166)
图 3.2	北京房山和怀柔地基 GPS 观测站分布图	(168)
图 3.3	北京房山 2003 年 9 月至 2004 年 8 月 GPS/PW 变化时序图	(169)
图 3.4	2004 年 1—10 月 GPS 反演与探空获取 PW 数据间的散点关系图(a)及 GPS 反演结果减去探空 PW 的差值与探空 PW 间的散点关系图(b)	(169)
图 3.5	2004 年 7 月 9—10 日北京房山 GPS/PW 与南郊 54511 探空 PW 的对比	(170)
图 3.6	2006 年 3 月 9—24 日,探空、GPS、微波辐射计获取 PW 的时序图	(170)
图 3.7	GPS 遥感和 MODIS 反演的 PW 的散布图	(171)
图 3.8	GPS/PW 与线性模型修正后的 MODIS PW 对比柱状图	(171)
图 3.9	2007 年 8 月 14 日至 9 月 16 日微波辐射计(MWP)与 GPS 反演 SW 散点图	(173)
图 3.10	晴空天气条件下,2007 年 8 月 23—25 日 GPS 与微波辐射计对应的单颗卫星 路径上 SW 的时序图	(173)
图 3.11	2004 年 7 月 9—11 日房山地基 GPS/PW 和房山雨量站每小时降水量(a)及 房山 GPS/PW 和该站地面气象要素(b)的时间变化	(176)
图 3.12	2006 年 8 月 1 日 09:29 飑线经过北京地区的雷达回波图	(177)
图 3.13	对应于编号为 GPS16 和 GPS23 两颗卫星的 GPS/VSW 序列显示的水汽在 时间和空间分布上的显著差异	(178)

图 3.14	54511 站 GPS/SW 与 GPS/PW 的差异时序图	(180)
图 3.15	2000 年 7 月 4 日 00:00—5 日 00:00 24 小时降水实况(a)与同化 GPS 等 观测资料后的降水模拟(b)分布图	(180)
图 3.16	2000 年 7 月 4 日 00:00 同化不同观测资料的模式大气柱水汽含量及试验 分析差值分布	(180)
图 3.17	2004 年 7 月 10 日 14:00—20:00 6 小时累积降水实况及 WRF 预报结果 ...	(181)
图 3.18	2007 年 2 月 20—22 日北京地区气象要素变化	(182)
图 3.19	WRF 及其三维变分同化系统同化北京地区局地气象观测资料后得到数值 预报结果与观测量的对比	(183)
图 3.20	WRF 及其三维变分同化系统同化北京地区局地气象观测资料后得到的 1000 hPa 处的液态水、温度、风标和比湿	(183)
图 3.21	北京地区地基 GPS/PW 数据同化效果的评估	(185)
图 3.22	北京地区空中水资源及人工增水概念模型(典型冷锋云系)	(186)
图 3.23	北京地区单双频地基 GPS 大气水汽遥测系统业务流程图	(187)
图 3.24	GPS 水汽产品解算和发布业务系统示意图	(188)
图 3.25	京津冀地区单双频地基 GPS 大气总可降水量的监测结果	(188)
图 3.26	2003 年 7 月 25 日北京房山地区 GPS 大气水汽层析产品示意层析水汽区域 分布图	(189)

表格目录

表 1.1	GPS 卫星信号频率	(2)
表 1.2	测量误差分类及对距离的影响	(2)
表 2.1	Bernese 5.0 主要程序列表	(20)
表 2.2	通用文件列表	(26)
表 2.3	工程所必需的通用文件	(52)
表 2.4	数据处理时段与 IGU 轨道文件对应表	(152)
表 2.5	IGS-Bernese 轨道文件名转换表	(152)
表 2.6	时段定义表	(153)

第 1 章 地基 GPS 气象学基础

1.1 引言

20 世纪末以来,应用全球定位系统来监测卫星信号在地球大气中的延迟量进而反演出大气气象要素的方法,及其在气象业务中的应用水平得到了不断完善和提高,并且因此产生了一个新的气象学分支——GPS 气象学,也被称为 GPS/MET。一方面,GPS 系统的特性使得地基 GPS/MET 方法具有全球、全天候观测的性能,因此地基 GPS 气象学具有重大的应用潜力。另一方面,地球对流层大气对 GPS 信号的延迟作用是地基 GPS 气象学的理论基础。同时,鉴于目前在许多论文和著作都包含有 GPS 系统和地基 GPS 气象学的方面的详细论述,因此编者在本章只围绕 GPS 系统、GPS 信号在大气中的延迟进行简要论述,读者如果有兴趣了解更多的信息则可以查阅相关论文和著作。

1.2 GPS 全球导航定位系统

1.2.1 GPS 卫星信号

1973 年 12 月,美国国防部批准研制新的卫星导航系统 NAVSTAR/GPS (Navigation Satellite Timing And Ranging/Global Positioning System),即卫星授时测距导航/全球定位系统,简称 GPS 系统。该系统是以卫星为基础的无线电导航定位系统,它具有全能性(陆地、海洋、航空和航天)、全球性、全天候、连续性和实时性的导航、定位和授时功能。它能够为用户提供精密的三维坐标、速度和时间信息。GPS 系统包括 3 部分:空间部分——GPS 卫星星座;地面控制部分——地面监控系统;用户设备部分——GPS 信号接收机。

GPS 卫星星座共有 6 个轨道面,轨道面间隔 60° ,卫星距离地面 20200 km,轨道倾角 55° ,卫星运行周期为 11 小时 58 分钟,两个载波频率分别为 1575.42 MHz 和 1227.60 MHz。卫星通过测站上空时,单颗卫星的可见时间约为 5 小时。一般情况下,在高度角大于 15° 时,测站上某一时刻可同时观测到 6 颗卫星,最多时可达到 9 颗。

GPS 卫星信号是 GPS 卫星向用户发送的用于导航定位的调制波,它包含有:载波、测距码和数据码。GPS 卫星时钟的基本频率为 10.23 MHz,GPS 卫星所有信号都依据此基本频率生成。GPS 信号经由两个 L 波段的载波进行传输。C/A 码也被称为粗码,只被调制于 L1 载波上传输,C/A 码主要被用于民用领域。P 码又被称为精码,分别被调制于两个载波上,并且可以被加密,它是军用码。加密后的 P 码被称为 Y 码(魏子卿等,1998; Hugentobler 等,2001)。

载波频率处于 L 波段能够保证 GPS 的全天候工作特性,同时 GPS 信号会因为大气折射作用而发生延迟和弯曲。估算 GPS 信号延迟和弯曲的方法就是 GPS 气象学的理论基础。

表 1.1 GPS 卫星信号频率

GPS 卫星信号	信号频率/MHz
基本频率	$f_0 = 10.23$
L1 载波	$f_1 = 154f_0 = 1575.42(\lambda_1 \approx 19.0 \text{ cm})$
L2 载波	$f_2 = 120f_0 = 1227.60(\lambda_2 \approx 24.4 \text{ cm})$
P1(Y1)码,P2(Y2)码	$f_0 = 10.23$
C/A 码	$f_0/10 = 1.023$
导航信息 D(t)	$f_0/204600 = 50 \cdot 10^{-6}$

C/A 码和 P 码也被称为伪距观测量,伪距就是距离的粗估值,即由卫星发射的测距码信号到达 GPS 接收机的传播时间乘以光速所得出的距离。由于卫星钟、接收机钟的误差以及无线电信号经过电离层和对流层的延迟,实际测出的距离与卫星到接收机的几何距离之间存在一定的误差,因此一般称测量出的距离为伪距。用 C/A 码进行测量的伪距为 C/A 码伪距(精度为 10 m),用 P 码测量的伪距为 P 码伪距(精度为 3 m)。伪距法定位具有速度快、无多值性问题等优点,它是 GPS 定位系统进行导航定位的最基本的方法。式(1.1)是单点定位的经典公式,它表示已知 4 颗 GPS 卫星的坐标,求解接收机天线三维坐标的基本公式,其中 τ 表示未知的接收机钟差。

$$\begin{cases} \rho_1^2 = (X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2 + \tau^2 \\ \rho_2^2 = (X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2 + \tau^2 \\ \rho_3^2 = (X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2 + \tau^2 \\ \rho_4^2 = (X - X_4)^2 + (Y - Y_4)^2 + (Z - Z_4)^2 + \tau^2 \end{cases} \quad (1.1)$$

伪距测量精度较低,如果把载波作为测量信号可以达到很高的精度(1~2 mm)。载波相位是一种周期性的正弦信号,相位测量只能测定其不足一个波长的部分,所以存在载波相位信号的初始整周不确定性(模糊度)问题,目前有多种方法用于求解模糊度。采用载波相位差分方法能够满足高精度的定位测量应用需求,如大气延迟测量和其他地球物理学研究和应用领域。

1.2.2 GPS 定位误差

表 1.2 中,按误差性质可分为系统误差和偶然误差两类。其中大气折射误差就属于系统误差,正是对该误差的建模与订正研究带动了 GPS 气象学的发展(魏子卿等,1998; Braun, 2004)。

表 1.2 测量误差分类及对距离的影响

误差来源	对测量距离的影响/m
卫星部分:星历误差、钟误差、相对论效应	1.5~15
信号传播:电离层、对流层、多路径效应	1.5~15
信号接收:钟误差、位置误差、天线相位中心误差	1.5~5
其他影响:地球潮汐、负荷潮	1.0

另外的分类方法将误差源分为3类:一类与电磁波传播有关,包括对流层折射、电离层折射和多路径效应;一类与频率有关,有相对论效应、卫星和接收机钟差和SA频率抖动;还有一类与参考系有关,包括轨道误差、天线相位中心偏差、地球旋转和地球固体潮影响。在这些误差源中,有些可以精确改正,有些可以用一定方法消除或减弱,有些则必须用参数模拟。此处仅对对流层折射进行简单介绍。

对流层延迟一般泛指非电离层大气(中性大气)对电磁波的折射。中性大气包括对流层和平流层,高度范围从地面向上50 km。由于中性大气折射的80%发生在对流层,所以通常叫做对流层延迟。对流层大气对于小于15 GHz的射电频率呈中性,信号传播产生非色散延迟,使电磁波传播路径比几何距离长。对于一个位于海平面高度上的中纬度测站来说,对流层延迟的典型值在天顶方向约为2.3 m,在15°仰角方向迅速增大为约25 m。

对流层延迟90%由大气中干燥气体引起,称为干分量;其余10%由水汽引起,称为湿分量。由于大气水汽场在时间和空间上的变化都很显著,因而较难准确估算其折射误差。所以,湿分量误差成为限制对流层延迟改正精度的主要因素。

简单来讲,GPS接收机的功能就是测量信号从GPS卫星(k)发出后到达接收机(i)所经历的时间,传输时间乘以光速就得到GPS卫星到接收机间的伪距 $\rho_i^k(t)$ 。该伪距信息包含了卫星钟差($\delta^k(t)$),接收机钟差($\delta_i(t)$),电离层延迟($I_i^k(t)$),对流层延迟($T_i^k(t)$),以及多路径效应和天线相位中心等误差 ϵ 。

方程(1.2)为 P_1, P_2, L_1, L_2 的观测方程:

$$\begin{cases} P_{1i}^k(t) = \rho_i^k(t) + T_i^k(t) + I_i^k(t) + c \times (\delta_i(t) - \delta^k(t)) + \epsilon \\ P_{2i}^k(t) = \rho_i^k(t) + T_i^k(t) + I_i^k(t) + c \times (\delta_i(t) - \delta^k(t)) + \epsilon \\ L_{1i}^k(t) = \rho_i^k(t) + N_{1i}^k(t)\lambda_1 + T_i^k(t) - I_i^k(t) + c \times (\delta_i(t) - \delta^k(t)) + \epsilon \\ L_{2i}^k(t) = \rho_i^k(t) + N_{2i}^k(t)\lambda_2 + T_i^k(t) - I_i^k(t) + c \times (\delta_i(t) - \delta^k(t)) + \epsilon \end{cases} \quad (1.2)$$

其中, N_{ji}^k 表示模糊度,则 $N_{ji}^k\lambda_f$ 代表模糊度对应的接收到GPS卫星间的距离。电离层延迟项 $I_i^k(t)$ 在伪距测量(P_1, P_2)与载波相位测量(L_1, L_2)中的正负符号刚好相反,这是因为电磁波在电离层中传输时,它的相位和群速度的传播速度不同而造成的,也就是说,电离层会增加码信号的传播时间,而减少载波相位信号的传播时间。

1.2.3 GPS 信号的线性组合

伪距和载波相位(P_1, P_2, L_1, L_2)的线性组合可以消去或分离出某些观测误差。式(1.3)~(1.5)列出了部分常用的线性组合:

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) \quad (1.3)$$

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad (1.4)$$

$$L_5 = L_1 + L_2 \quad (1.5)$$

L_3 线性组合被称为电离层无关组合(ionosphere-free combination),它消除了电离层对载波相位的加速影响,但模糊度不再是一个整数,且观测噪声比 L_1 大3倍。对于短基线(小于15 km),电离层影响在基线两端有强相关性,即使对于站间差分的单频观测,电离层影响也并

不显著。因此,短基线情况,用 L_3 组合非但无益,反而增加了观测噪声。 L_3 组合用于中长基线比较有利,因为在这种情况下基线两端的电离层误差已不相关或弱相关,用 L_3 组合可显著改进基线解的精度。在大地测量和气象学应用中,消去电离层影响最理想的方案是选用双频 GPS 接收机,并应用 L_3 线性组合的方法;单频接收机一般只在站间距很小,电离层误差可以被差分或其他方法消去的情况下使用。

L_4 线性组合,也被称为 L_I 组合,电离层残差组合。这一组合与接收机至卫星的几何距离无关,消除了诸如轨道误差、接收机钟差和卫星钟差以及对流层误差影响,仅包含电离层、 L_1 和 L_2 的实数模糊度组合。适宜于电离层研究和数据编辑与周跳检测。

L_5 线性组合,也被称为 L_w 组合,宽道组合。它的波长可以达到 84 cm,模糊度为整数,适用于中长基线的模糊度分解。首先利用 L_w 观测确定 $N_1 - N_2$,然后将它们引入 L_3 或原来的 L_1 和 L_2 观测方程中,分解出 N_1 的模糊度。 L_5 线性组合能够使模糊度的计算变得简单。 L_5 线性组合主要用于站点距离长于几十公里的情况下。

组成差分观测的目的,在于消除或减弱某些误差(如卫星和接收机钟误差)的影响,以便简化观测方程。

在两个观测站或多个观测站同步观测相同卫星的情况下,卫星的轨道误差、卫星钟差、接收机钟差以及电离层和对流层的折射误差等对观测量的影响具有一定的相关性,利用这些观测量的不同组合(求差)进行相对定位,可以有效地消除或减弱相关误差的影响,从而提高相对定位的精度。伪距和载波相位观测值均适用于差分线性组合。常用的差分观测有测站之间的单差、测站和卫星之间的双差以及测站、卫星和历元间的三差。

测站之间的相位单差定义为同一历元两台接收机 m 和 n 对同一卫星的观测之差,相位观测单差的模型描述如式(1.6)。相位单差完全消除了相对论效应,可以消除卫星钟差的影响。当测站间距离较近时,卫星信号到两台接收机的传输路径上的大气条件相似,电离层和对流层的大部分影响也可以消除。

$$L_{Fi,j}^k = L_{Fi}^k - L_{Fj}^k \quad (1.6)$$

测站和卫星之间的相位双差定义为同一历元上两个测站观测两个卫星得到的观测站间单差相位之差,模型化为式(1.7)。与相位单差相比,相位双差消除了接收机钟差的影响。

$$L_{Fi,j}^{k,l} = L_{Fi,j}^k - L_{Fi,j}^l \quad (1.7)$$

相位三差定义为相邻两历元上两个测站和两个卫星之间的相位双差之差,模型化为式(1.8)。相位三差不仅消除了卫星和接收机钟差以及 SA 频率抖动影响,而且还消除了模糊度参数。另外,周跳仅对包含该周跳的三差观测有影响,对其他三差观测没有影响。三差主要用于消除模糊度和检查是否出现周跳(Braun, 2004; Hugentobler 等, 2001)。

$$L_{Fi,j}^{k,l}(t_i, t_{i+1}) = L_{Fi,j}^{k,l}(t_{i+1}) - L_{Fi,j}^{k,l}(t_i) \quad (1.8)$$

1.2.4 GNSS 服务局

IGS 全称为 International GNSS Service,即 GNSS(全球导航卫星系统)服务局。IGS 是由全球 200 多家机构志愿组成的研究团体。IGS 的目标是为高精度 GPS 科学应用研究提供甚高精度的数据和产品。IGS 的组织结构为地基 GPS 持续跟踪站网、数据中心(通过 Internet

收集和发送数据)、分析中心(生成产品)和管理中心(包含工作组和中心局)。

IGS 从全球 360 个地基 GPS 站点收集数据,其中 130 个是全球站。全球站定义为:该站 GPS 观测数据被 3 个以上数据分析中心使用,并且 3 个数据中心中有 1 个与该站位于不同的洲上。选取全球站时综合考虑了诸多因素,诸如站点位置、相对于其他站点的分布状态、数据获取的能力、接收机的追踪能力和基座的稳定性等因素。图 1.1 中列出了 IGS 全球站。全球站是 IGS 站网的重要组成部分,同时也是生成 GPS 数据产品的基础。IGS 发布的原始数据 and 产品主要有原始观测数据、精密星历文件、地球自转参数文件、全球电离层信息文件、天顶对流层延迟文件、站点地心坐标和速率文件等。

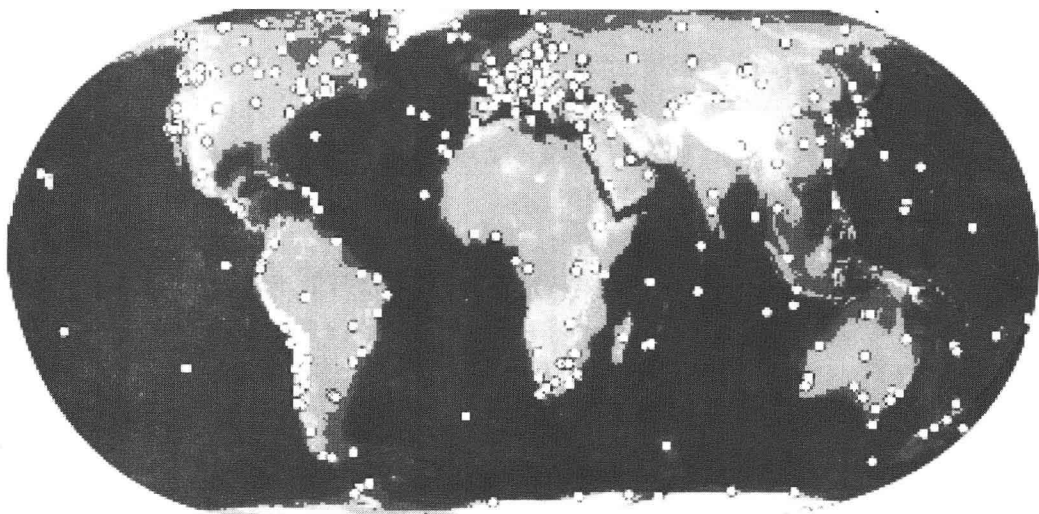


图 1.1 IGS 全球站分布图(<http://igsceb.jpl.nasa.gov/>)

在 GPS 数据处理中,需要经常访问以下 IGS 网站: <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/>, <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/>, <http://sopac.ucsd.edu>, <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/> 和 <ftp://lox.ucsd.edu/pub/>。

关于 IGS 的详细信息可以登录 <http://igsceb.jpl.nasa.gov/> 网站查询。

1.2.5 GPS 数据处理分析软件

GAMIT, BERNESE 和 GIPSY 是应用最广泛的 GPS 数据分析处理的软件。GIPSY 软件采用零差(也被称为非差)和卡尔曼滤波方法定位, GAMIT 软件采用双差和最小二乘法定位, BERNESE 软件同时具有非差和双差定位的能力。

1.2.6 GNSS 卫星导航系统

目前,美国和俄国已经拥有实用的卫星导航系统,它们分别是美国的 GPS 系统和俄罗斯的 GLONASS 系统。GLONASS 系统的组成和工作原理与 GPS 系统类似,载波频率位于 L 波段,也是由空间卫星星座、地面控制和用户设备 3 部分组成。用户现在可以同时接收 GPS 和 GLONASS 信号,并且 IGS 已经开始生成针对 GLONASS 的数据产品,其中包括卫星轨道

数据和时间转换信息。目前,欧盟的 Galileo 系统、中国的北斗系统、西欧欧洲空间局(ESA)的 NAVSAT 系统、国际移动卫星组织的 INMARSAT 系统、国际民航组织(ICAO)的 GNSS 系统都在计划和筹建之中。德国、日本也都有自己的卫星导航计划。上述所有卫星导航系统被统一称为 GNSS(Global Navigation Satellite System)全球导航卫星系统。

1.3 GPS 信号的延迟和弯曲

大气水汽含量是描述大气状态最重要的参数之一。以往人们采用无线电探空、卫星红外探测和微波探测等手段是获取大气水汽含量。与上述方法相比,地基 GPS 探测方法具有特有的优点。无线电探空方法的观测值精度较好,垂直分辨率高,但地区覆盖不均匀,在海洋上几乎没有数据。被动式卫星遥测方法的全球覆盖率和水平分辨率较高,但垂直分辨率和时间分辨率低。利用 GPS 遥感大气水汽的优点是覆盖全球、费用低廉、精度较高、稳定性好、全天候工作、适宜组网观测、时间和空间分辨率较高。

当 GPS 卫星信号穿过地球大气对流层时,会受到对流层的折射影响,因此造成 GPS 信号在传输过程中发生弯曲和延迟,其中信号的弯曲量很小,而信号的延迟量很大,标准大气状态下的测站天顶方向对流层延迟约为 2.3 m。在 GPS 精密定位测量中,应当尽可能地清除大气折射误差的影响。而在 GPS 气象研究中,却要计算出具体的大气折射量。通过大气折射率和大气折射量之间的函数关系就可以求得大气折射率。大气折射率是温度 T 、气压 P 和水汽压 e 的函数,进而就能反演得到大气水汽信息。(毛节泰,1993;盛裴轩等,2003;丁金才等,2009;李国平等,2010)

电波的延迟或相应的路径增长是由于 GPS 信号的弯曲和波速变慢所引起的。若已知卫星到接收机的几何距离为 G ,则路径增长可写为

$$\Delta L = C_0 \int \frac{ds}{C} - G \quad (1.9)$$

式中 C_0 是真空中光速, C 是真实的波速,对弯曲路径进行积分,根据折射率的定义,式(1.9)可以改写为

$$\Delta L = \int n(s) ds - G = \int [n(s) - 1] ds + (s - G) \quad (1.10)$$

式中 $(s - G)$ 表示由于信号弯曲引起的几何路径的增长,当信号的仰角大于 15° 时,它的值小于 1 cm,一般可以略去不计,因此就有

$$\Delta L = \int [n(s) - 1] ds = 10^{-6} \int N(s) ds \quad (1.11)$$

式中 $N(s) = [n(s) - 1] \times 10^6$ 。

在对流层大气中,

$$N = 77.6 \left(\frac{P}{T} \right) + 3.73 \times 10^5 \left(\frac{P_v}{T^2} \right) \quad (1.12)$$

这里 P 是大气压(单位:hPa), P_v 为水汽分压(单位:hPa), T 为大气温度(单位:K)。这一关系式对大部分大气条件可提供 0.5% 的精度。将式(2.4)代入式(2.3)中,可以得到