

Theory and Application of Ground-based GPS Meteorology

王勇 刘严萍 著

地基GPS气象学 原理与应用研究



测绘出版社

地基 GPS 气象学原理与应用研究

Theory and Application of Ground-based GPS Meteorology

王 勇 刘严萍 著

测绘出版社

· 北京 ·

©王勇 刘严萍 2012

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 提 要

GPS 气象学是一门交叉学科,是大地测量与气象学的研究热点和难点。本书首先介绍了地基 GPS 技术反演可降水量的原理,探讨了可降水量反演存在的问题,提出准实时的解算策略。接着讨论了 GPS 气象学应用的若干问题,探讨了不同气候类型的 GPS 对流层延迟变化。然后以经验模态分解与神经网络相结合的方法对 GPS 可降水量进行预测,并针对 GPS 可降水量的变化判断是否发生降水过程。最后研究了 GPS 对流层延迟(可降水量)的插值预测。

本书可作为测绘和气象专业的研究生的参考书,并可供大地测量和气象部门等相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地基 GPS 气象学原理与应用研究 / 王勇, 刘严萍
著. — 北京: 测绘出版社, 2012. 8

ISBN 978-7-5030-2692-8

I. ①地… II. ①王… ②刘… III. ①全球定位系统
(GPS)—应用—气象学—研究 IV. ①P228.4 ②P4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 200914 号

责任编辑	吴 芸	封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍
出版发行	测 绘 出 版 社		电 话	010—83060872(发行部)	
地 址	北京市西城区三里河路 50 号			010—68531609(门市部)	
邮政编码	100045			010—68531160(编辑部)	
电子信箱	smp@sinomaps.com		网 址	www.chinasmp.com	
印 刷	北京柏力行彩印有限公司		经 销	新华书店	
成品规格	169mm×239mm				
印 张	9.25		字 数	212 千字	
版 次	2012 年 8 月第 1 版		印 次	2012 年 8 月第 1 次印刷	
印 数	0001—1000		定 价	30.00 元	

书 号 ISBN 978-7-5030-2692-8/P·606

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

序

经过二十余年的发展, GPS 技术应用研究蓬勃发展, 其一是气象学研究。大气对 GPS 信号延迟噪声处理的逆问题, 发展至利用 GPS 信号测定大气水汽含量及温度分析研究, 为监测恶劣天气及气候变化提供新的技术支撑。目前 GPS 气象探测已成为世界气象组织(WMO)21 世纪全球综合高空观测系统的重要组成部分。以 GPS 技术在气象学研究及应用为主要内容的新兴交叉学科, 称为 GPS 气象学(GPS Meteorology, 简称 GPS/MET)。GPS 观测资料在大气探测、天气变化监测和数值天气预报模式应用领域中的优越性及其初步成果, 使 GPS 气象学在不足十年内迅速发展成为一个极具应用潜力的重要研究领域。

作为一门交叉学科, GPS 气象学既是大地测量与气象学的研究热点也是难点。中国大陆构造环境监测网络于 2012 年 3 月 2 日经国家验收, 为 GPS 气象学应用研究提供了雄厚平台。目前我国众多省市已建 GPS CORS 系统, 如何更有效地应用该系统为国民经济建设服务, 是目前热点研究问题。

利用地基 GPS 接收设备可以测量和反演出整层大气中的水汽含量, 这为天气预报、天气变化研究、InSAR 大气效应去除等涉及大气水汽工作的各个领域提供了新的水汽数据获取手段。王勇博士将其在中科院测量与地球物理研究所博士学习和北京大学遥感与地理信息系统研究所博士后工作期间的研究结果总结归纳成书, 系统地阐述了国内外地基 GPS 气象学发展现状与地基 GPS 遥感水汽的原理; 并针对 GPS 气象学的具体应用, 给出了准实时 GPS 可降水量解算方案, 推导了无气象要素的对流层延迟可降水量模型; 介绍了其利用经验模态分解与神经网络技术相结合来预测 GPS 可降水量的方法; 展示了他利用 GPS 技术进行中国大陆地区水汽变化的研究成果。这些内容是王勇博士多年从事 GPS 气象学研究工作的心血与结晶, 达到国内相关研究的先进水平, 具有较高的参考与应用价值, 而且通俗易懂。作为国内系统论述地基 GPS 气象学应用的学术专著, 该书具有较强的理论性与实用性, 有助于推进我国地基 GPS 气象学的理论研究及业务应用。

王勇
2012.5

前 言

作为大地测量与气象学的新兴交叉学科, GPS 气象学正日益呈现出其蓬勃发展之势。作者在该领域的研究工作, 始于 2004 年博士论文选题, 受导师柳林涛研究员思路的启发, 明确研究方向, 并坚持该方向的研究工作至今已达九年。从刚开始的对 GPS 数据处理软件 GAMIT 和 GPS 气象学理论的学习, 到之后的各个阶段性研究工作, 作者分别在同济大学、中国科学院测量与地球物理研究所、北京大学求学, 得到了刘大杰老师、许厚泽院士、焦健老师、曾琪明老师等多位前辈的悉心指导; 河北联合大学建筑工程学院的苏幼坡教授也为研究领域的跨学科拓展提供了广阔空间, 特别是获得承担国家科技支撑计划课题部分研究工作的机会, 对研究方向的拓展具有重要意义。回顾过去的九年, 从时间推移的角度而言, 作者的研究工作主要经历了以下几个阶段, 最终促成了这本专著的形成:

2005 年中国科学院测量与地球物理研究所、武汉市勘察设计研究院和湖北省气象局三家单位进行了 GPS 气象学合作研究, 在武汉市 GPS 连续观测网的基础上, 作者承担了 GPS 准实时可降水量反演策略研究和试验研究工作, 以武汉市为例开展 GPS 气象学应用研究。

随后作者开始着手利用中国地壳运动监测网络 GPS 数据进行中国大陆地区的水汽变化研究, 并将国内首次利用 GPS 进行中国大陆地区的水汽变化研究成果于 2005 年 12 月, 在香港召开的 GNSS 国际会议进行了成果交流, 得到国内外专家们及同行的认可。

2007 年至今在河北理工大学工作以来, 在河北省自然科学基金和唐山市科技局项目的资助下, 延续了 GPS 气象学研究, 将经验模态分解与神经网络技术相结合应用到 GPS 可降水量预测, 将 GPS 可降水量预测时效提高到 2~3 小时。

2009—2011 年, 作者有幸在北京大学进行博士后工作研究, 开展利用 GPS 进行 InSAR 大气校正的研究, 拓展了研究方向, 并在中国博士后科学研究基金的资助下完成该研究工作。

中南大学的博士研究生刘严萍负责本书 § 4.4 至 § 4.7 的编写, 还为本书的 GPS 气象应用做了大量的数据处理工作。本书部分内容由杨晶、张立辉协助完成, 在此表示感谢。

本书的出版得到了国家科技支撑计划课题(2011BAK07B01; 2009BAJ28B04-02B)和河北省高等学校科学技术研究项目(ZH 2012060)的资助, 在此表示感谢!

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 研究背景和研究意义	1
§ 1.2 国内外研究进展	2
第 2 章 地基 GPS 遥感水汽基本理论	8
§ 2.1 GPS 对流层延迟	8
§ 2.2 GPS 大气延迟模型	13
§ 2.3 GPS 可降水量推算	15
第 3 章 区域 GPS 网准实时可降水量解算	18
§ 3.1 武汉 GPS 连续参考系统基本概况	18
§ 3.2 高精度 GPS 数据处理软件简介	19
§ 3.3 卫星星历和计算方式的选取	23
§ 3.4 网外辅助站最佳数量的确定	26
§ 3.5 截止高度角、观测时间的选择	29
§ 3.6 端部效应问题	31
§ 3.7 准实时 GPS 湿延迟(可降水量)的可靠性检验	33
第 4 章 区域 GPS 网气象应用研究	38
§ 4.1 武汉水汽分布	38
§ 4.2 武汉地区入秋季节的转换监测	39
§ 4.3 适用于武汉地区的大气加权平均温度模型	40
§ 4.4 无气象要素的对流层延迟可降水量转换模型	44
§ 4.5 无网外辅助站的 GPS 网对流层延迟的推算	47
§ 4.6 GPS 可降水量与降水的对比分析	49
§ 4.7 GPS 可降水量时空分布特征	52
第 5 章 基于 GPS 技术的中国大陆水汽反演研究	54
§ 5.1 中国地壳运动监测网络	54
§ 5.2 无线电探空可降水量	55

§ 5.3	中国地壳运动监测网络 GPS 可降水量的可靠性检核	57
§ 5.4	基于 GPS 可降水量的中国大陆地区水汽变化	59
§ 5.5	对流层延迟反演中国大陆水汽季节变化	63
§ 5.6	武汉地区大气加权平均温度模型的检核	67
§ 5.7	对流层延迟与可降水量的直接转化	68
§ 5.8	基于不同气候类型的 GPS 可降水量	69
第 6 章	基于经验模态分解与神经网络的 GPS 可降水量预测	76
§ 6.1	经验模态分解	76
§ 6.2	经验模态分解的端点效应	79
§ 6.3	径向基神经网络	83
§ 6.4	基于仿真信号的预测分析	88
§ 6.5	基于经验模态分解与神经网络的 GPS 可降水量预测	89
第 7 章	GPS 可降水量用于降水预报	94
§ 7.1	BP 神经网络理论	94
§ 7.2	BP 神经网络用于降水预报流程	97
§ 7.3	降水预报功能设计	98
§ 7.4	基于 BP 神经网络的 GPS 可降水量降水预报	101
第 8 章	GPS 对流层延迟(水汽)插值	110
§ 8.1	基于不同地形的 GPS 对流层延迟插值	110
§ 8.2	BP 神经网络用于对流层延迟预测	116
§ 8.3	基于多因素的对流层延迟估算	120
§ 8.4	利用多元回归方法改正对流层延迟插值误差	123
§ 8.5	基于 GPS 的北京地区 MODIS 水汽校正	129
第 9 章	总结与展望	134
§ 9.1	总 结	134
§ 9.2	研究展望	134
参考文献	136

Contents

Chapter 1 Introduction	1
§ 1.1 Background and significance of the script	1
§ 1.2 Evolution of GPS Meteorology	2
Chapter 2 Basic principle of PWV retrieved by GPS technique	8
§ 2.1 GPS ZTD	8
§ 2.2 Atmospheric delay models of GPS	13
§ 2.3 The calculation of GPS PWV	15
Chapter 3 Calculation of real time PWV in local GPS network	18
§ 3.1 Wuhan GPS CORS	18
§ 3.2 High accuracy GPS software	19
§ 3.3 Selection of ephemeris and calculation mode	23
§ 3.4 Optimal amount of long distance GPS stations	26
§ 3.5 Selection of cut-off angle and observed time	29
§ 3.6 Effect of endpoint	31
§ 3.7 Reliability of GPS ZWD or GPS PWV	33
Chapter 4 Meteorological applications in local GPS network	38
§ 4.1 Water vapor distribution of Wuhan	38
§ 4.2 Autumn transform observation in Wuhan region	39
§ 4.3 Atmospheric weighting mean temperature model in Wuhan region	40
§ 4.4 Transform model from ZTD to PWV without temperature data	44
§ 4.5 Calculation of GPS ZTD without long distant GPS data	47
§ 4.6 Comparison between GPS PWV and precipitation	49
§ 4.7 Spacial and temporal distribution characters of GPS PWV	52
Chapter 5 Study of PWV in Chinese mainland retrieved by GPS technique	54
§ 5.1 Crust motion observation network of China	54
§ 5.2 PWV of Radiosonde	55

§ 5.3	Reliability of GPS PWV retrieved by CMONOC	57
§ 5.4	Change of water vapor in Chinese mainland based on GPS PWV	59
§ 5.5	Seasonal change of water vapor in Chinese mainland retrieved by ZTD	63
§ 5.6	Reliability of atmospheric weighting mean temperature model in Wuhan region	67
§ 5.7	Transform model between ZTD and PWV	68
§ 5.8	GPS PWV based on different climate type	69
Chapter 6	Prediction of GPS PWV based on the method of EMD and RBF neural network	76
§ 6.1	EMD	76
§ 6.2	Effect of endpoint of EMD	79
§ 6.3	RBF neural network	83
§ 6.4	Analysis of emulational signal prediction	88
§ 6.5	Prediction of GPS PWV based on the method of EMD and RBF neural network	89
Chapter 7	Precipitation prediction based on GPS PWV	94
§ 7.1	BP neural network	94
§ 7.2	Flow of precipitation prediction based on BP neural network	97
§ 7.3	Function design of precipitation prediction	98
§ 7.4	Precipitation prediction of GPS PWV based on BP neural network	101
Chapter 8	Interpolation of GPS ZTD or PWV	110
§ 8.1	Interpolation of GPS ZTD based on different terrain	110
§ 8.2	Prediction of GPS ZTD based on BP neural network	116
§ 8.3	ZTD estimation based on multi-factors	120
§ 8.4	Error of ZTD interpolation corrected by multi-regression method	123
§ 8.5	Correction of MODIS water vapor based on GPS in Beijing region	129
Chapter 9	Conclusion and prospects	134
§ 9.1	Conclusion	134
§ 9.2	Prospects	134
References	136

第 1 章 绪 论

§ 1.1 研究背景和研究意义

1.1.1 研究背景

可降水量(precipitable water vapor, PWV)直接影响着大气垂直稳定性,且相位变化与降水直接相关,在大气能量传输和天气系统演变中起重要作用,尤其是对水平尺度 100 km 左右、生命史几个小时内的中小尺度灾害性天气监测预报具有指示意义,因此成为中尺度或局地尺度的降雨强度预报的必要参数之一。利用地基 GPS 接收设备可以测量和反演出整层大气中的可降水量,这为天气预报、天气变化研究、InSAR 大气效应去除等涉及大气水汽工作的各个领域提供了新的可降水量数据获取手段。

可降水量对于气象、水文、地质等诸多领域产生深刻影响(曹云昌,2004)。长时间、连续性、高强度降水容易引发暴雨洪涝灾害,特别是近年来我国北京、广州等地暴雨内涝频发导致人员伤亡等损失严重,我国约三分之二的地区遭受不同类型和不同程度洪涝灾害,80%以上的耕地受侵害;同时区域集中降水所引发的滑坡、泥石流等地质灾害频发,特别是我国南方地区近年来损失严重。众所周知,预见期内的可降水量变化直接影响到降水预报精度,而且预见期越长,预见期内降水预报精度越高,对于防灾减灾的意义就越重大。

1.1.2 研究意义

1. GPS 技术可作为现有水汽探测的辅助方法

目前气象领域的水汽探测手段主要有无线电探空、水汽辐射计、卫星遥感、红外遥感和微波遥感。无线电探空工作量大、价格昂贵、水平空间密度小、时间分辨率低;水汽辐射计需频繁校对,无法全天候运作且价格昂贵;卫星遥感可提供大面积观测,但操作复杂;红外遥感只适用于无云天气;微波遥感精度较低。地基 GPS 遥感可降水量技术以其快速、精确、时空分辨率高、不受天气条件影响等优点,在水汽观测系统中日益受到重视。

测站上空积累的可降水量由地基 GPS 获得,并同化到数值天气预报模式中,可提高数值模式初始场精度。30 min 甚至更短的采样率使 GPS 可降水量适合服

务于恶劣雷暴雨监测。近实时的 GPS 可降水量序列对短期雷暴雨有预报特性, GPS 可降水量序列的峰值与降水过程相对应, 而常规的探空观测因间隔 12 h 则无法反映这过程。利用测站较密的地基 GPS 网, 通过层析技术可获取水汽的四维分布, 为数值天气预报提供实时高精度初始水汽场。

2. 中国大陆构造环境监测网络用于中国大陆水汽变化研究

中国大陆构造环境监测网络(简称陆态网络)是一个以监测地壳运动服务于地震预测预报为主, 兼顾军事测绘保障、地球科学研究、大地测量应用和灾害天气预报的国家级地球科学与信息技术综合网络系统。它以全球导航卫星定位系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)为主, 辅以多种高新空间对地观测技术, 对中国大陆及其邻区岩石圈的地壳运动和重力场变化、水圈的海平面变化、大气圈的对流层水汽含量变化及近地空间圈的电离层平均电子密度变化等进行实时与非实时相结合的综合监测, 为研究现今地壳构造运动及其动力学机制、灾害性天气的形成机理和某些空间环境的演变提供基础资料。

3. GPS 可降水量可用于 InSAR 大气效应去除

目前我国大部分城市都遭受地面沉降的影响, 全国累计地面沉降量超过 200 mm 的地区达 79 000 km², 且有进一步扩大的趋势。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)作为获取米级精度、数十米空间分辨率地面高程信息的手段, 其差分技术(differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR)可用于探测毫米级的微小地表形变, 在大范围区域(100 km×100 km)监测地表形变。

如何提高 InSAR 处理精度, 使其满足城市地面沉降监测要求是目前 InSAR 应用研究的难点。尽管 InSAR 技术测量精度目前已有较大提高, 但在实际形变探测中仍受一些因素制约。同区域不同期 SAR 数据的大气延迟差异是影响 SAR 干涉测量的主要因素之一, 易变的大气条件所带来的不同相位延迟, 可导致数厘米形变误差。因此, InSAR 数据处理和干涉影像的解释, 须研究大气影响并加以处理。

GPS 反演的可降水量精度为毫米级, 其时间分辨率达 30 min 或更短时间, GPS 可降水量不受天气状况、不受 SAR 图像数量限制, 在城市地表变形监测中可采用 GPS 反演可降水量, 在 InSAR 处理结果中去除两期雷达数据时间的可降水量影响, 提高 InSAR 处理精度, 满足城市变形监测需求。

§ 1.2 国内外研究进展

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)是由美国建立的全球卫星导航定位系统, 由空间部分、地面监控部分和用户部分组成。GPS 卫星连续向用户播发用于进行导航定位的测距信号和导航电文, 并接收来自地面监控系统的各种

信息和命令;地面监控部分跟踪 GPS 卫星,确定卫星运行轨道及卫星钟差改正数,进行预报后再按规定格式编制成导航电文,并通过注入站送往卫星,向卫星发布指令;用户则用 GPS 接收机测定接收机至 GPS 卫星的距离,根据卫星星历给出的观测瞬间卫星空间位置等信息求出接收机的三维位置、运动速度和钟差等参数。

GPS 卫星信号到达地面 GPS 接收机过程中,对流层所引起的延迟称为对流层延迟(zenith tropospheric delay, ZTD)。目前 GPS 相对定位精度达 $10^{-8} \sim 10^{-9}$,在高精度 GPS 数据处理中对流层延迟作为未知参数估算,对流层延迟与气象领域的可降水量可相互转化。GPS 水汽探测技术源于美国,是在地球物理参数测定的基础上,利用大气折射率对气象参数的敏感性来探测大气状况。GPS 对流层时延迟可用于精确反演 GPS 接收机天顶方向的可降水量(Bevis et al, 1992; Rocken et al, 1995; Duan et al, 1996),成为大气探测手段。近 20 年来该领域研究主要集中在水汽反演、GPS 资料应用于数值预报等方面。

1.2.1 国外研究进展

1. 可降水量反演研究

GPS 可降水量反演涉及两个阶段,即精确的 GPS 对流层延迟获取;对流层延迟转化为可降水量。该领域主要研究成果有: Niell 等(1996)改进了某一仰角 GPS 卫星观测投影到天顶方向的映射函数; Duan 等(1996)提出采用远距离(超过 500 km)GPS 站与 GPS 网联合解算,直接测量 GPS 绝对可降水量的方法,均方根误差达 1.0~1.5 mm; Ware 等(2001)提出沿 GPS 射线路径可降水量的测量方法,经 17 000 个 GPS 观测试验表明,沿仰角 20° 以上的累计斜距可降水量(slant water vapor, SWV)测量的均方根误差为 1.3 mm; Ge 等(2001)建立轨道参数误差影响 GPS 测量对流层延迟精度的模型,将精度提高近 20%。

2. GPS 可降水量精度验证

以水汽辐射计或无线电探空观测资料为基准,将 GPS 测量的可降水量或对流层湿延迟(zenith wet delay, ZWD)与之比较,获得 GPS 可降水量测量精度。通常, GPS 测量可降水量的精度为 1~2 mm,对流层湿延迟存在 6~12 mm 的测量偏差。

Rocken 等(1995)利用水汽辐射计对 GPS 反演的可降水量进行了比较,两者相差 1 mm。Emardson 等(2000)利用水汽辐射计对瑞典和芬兰的 GPS 观测网进行比较,两者相差 1~2 mm。

湿度较高的天气条件下, Liou 等(2001)研究表明: GPS 测量可降水量的偏差为 2.2 mm,并认为 GPS 测量偏差与湿度的大小和 GPS 测站间的基线距离有一定关系。对于 GPS 低仰角观测, Niell 等(1996)利用甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)技术进行了 GPS 湿延迟测量比较研究,两者仅相差 3%。

Haase 等(2003)对地中海西部 51 个 GPS 测站测量的对流层延迟与无线电探空资料计算值进行比较,得出对流层延迟存在 7 mm 平均偏差的结论,指出将 GPS 资料用于气候研究前,需进行比较研究。

3. GPS 资料用于检验数值预报模式性能

由于缺乏对大气水汽连续、精确的观测,检验数值预报模式水汽预报非常困难。GPS 可降水量探测技术为检验数值预报模式水汽预报性能提供可能。

Cucurull 等(2002)检验高分辨率静力模式(high resolution limited area model,HIRLAM)($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$)对降水量的预报能力,研究表明:当预报 6 h 时,模式预报与 GPS 测量偏差为 0.4 mm,均方根误差为 2 mm;当预报 24 h 时,偏差为 1.2 mm,均方根误差为 3 mm。Elgered 等(2001)进行了地基 GPS 用于数值天气预报的应用研究。

针对高分辨率、非静力数值预报模式,Cucurull 等(2002)通过分析对流层延迟预报偏差的具体构成,论证了模式地形高度与 GPS 测站高度差是导致静力学延迟(zenith hydrostatic delay,ZHD)预报误差的主要原因,并提出了高度差与静力学延迟预报偏差的统计订正关系。

4. GPS 资料的同化研究

GPS 资料在数值天气预报领域日益受到人们关注。首个科学试验是 1993 年 5~6 月在美国堪萨斯州和俄克拉荷马州等风暴多发地区进行的 GPS/STORM 观测试验(Rocken et al, 1995),此后美国海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration,NOAA)建立 GPS 观测网开展 GPS 可降水量用于天气预报的研究。

可降水量资料同化试验始于 20 世纪 90 年代,Kuo 等(1998)进行四维变分同化(four-dimensional variational assimilation,4DVAR)可降水量资料尝试,得出可降水量资料的使用能改善垂直水汽结构和短期降水预报的结论,证明四维变分同化可降水量资料是可行的。丹麦气象局(Danmark weather department,DWD)也对其局地模式(local mode,LM)进行了 3 h 间隔的 GPS 可降水资料同化试验,Tomassini 等(2002)证实同化后模式预报的可降水量与 GPS 测量值吻合,同时指出同化 GPS 可降水量要注意冬季逆温和湿度垂直梯度对同化效果的影响。

一些专家进行了 GPS 测量的斜路径湿延迟(slant wet delay,SWD)资料的同化尝试,Haan 等(2002)针对一次飚线过程进行的斜路径湿延迟资料(GPS 观测资料和模拟资料)四维变分同化试验表明:斜路径湿延迟资料的使用明显提高了模式对地线过程 6 h 降水和锋面结构的预报能力。与可降水量资料同化相比,其在降水分布和降水强度的预报上改进更加明显。

总之,不同个例、模式、方法均证明 GPS 可降水量的使用能提高模式对降水的预报能力,与探空或风廓线仪资料共同使用时能更好地提高模式的预报性能。

5. 其他应用研究

(1) 诊断三维水汽分布。Macdonald 等(2002)利用间距为 40 km 高分辨率的 GPS 观测网,结合地面水汽观测资料 and 低分辨率探空站网的湿度资料,以三维变分同化(three-dimensional variational assimilation, 3DVAR)技术为基础,应用 GPS 斜路径可降水量诊断三维水汽场,用于锋区定位和中尺度天气预报。

(2) 天气分析和预报。利用区域性稠密的 GPS 网,可监测水汽在几十千米范围内的变化,这对台风、暴雨监测等有意义。Liou 等(2000)利用 GPS 资料对 1998 年 10 月中旬瑞伯台风影响台湾前后水汽变化特征进行分析。Seco 等(2012)以西班牙潘普洛纳(Pamplona)九年 GPS 可降水量数据为例,推导了降水预测模型。Maghrabi 等(2011)利用澳大利亚南部的夜间红外温度、屏幕温度与 GPS 可降水量获得夜间红外温度的多元线性回归预测模型,该模型以一年的观测数据进行检验,可以获得很好的预测效果,预测误差在 1° 以内。

(3) 区域气候研究。Gradinarsky 等(2002)对连续六年的 GPS 资料进行研究后认为 GPS 资料可用于大气水汽变化长期监测。利用已有的 GPS 资料验证美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)、美国大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的再分析资料可用于气候研究。

此外, GPS 资料还可用于电离层分析、空间天气、大气化学等方面。

1.2.2 国内研究进展

20 世纪 90 年代中期我国开始对 GPS 测量可降水量的原理、算法、误差分析和订正等方面进行深入探讨,并应用于天气过程的分析,主要包括以下几个方面。

1. GPS 气象学原理介绍

王小亚等(1998)进行地基 GPS 气象学基本原理、方法、应用、误差源等讨论,介绍了对流层湿延迟的估计方法、湿延迟与可降水量的转换。李成才等(2004)研究 GPS 反演可降水量产生误差的各种因素,总结由湿延迟计算可降水量的方法,并提出我国 GPS 业务应用需解决的问题。

2. GPS 可降水量推算的精度验证

GPS 可降水量推算精度研究主要集中在减少反演模式的各种误差源方面。陈俊勇(1998)系统分析影响可降水量测量精度的因素,并建议将大气加权平均温度模型(T_m)的估计作为重要工作。

针对大气折射水平梯度影响 GPS 精确定位这一问题,刘炎雄等(2000)则提出了分段多项式方法计算可降水量,并结合探空资料,评估地基 GPS 遥感技术精度。

3. GPS 气象学实验研究

采用覆盖全国的 23 个 GPS 站和我国周边的 6 个国际 GNSS 服务 GPS 站为期 6 d 的 GPS 观测资料,组成区域地面试验网,初步验证用地面 GPS 空间信息开发可降水量数据的可行性和可靠性(王小亚等,1999)。1998 年 5 月至 6 月,华南“GPS 暴雨观测试验”获得大量的 GPS 与气象同步观测数据,研究表明:利用地基 GPS 数据和大气改正模型得出的可降水量数据与无线电探空可降水量一致,GPS 可降水量与地面实测的逐时累积降雨量存在较好的对应关系,降雨多发生在 GPS 可降水量处于相对高值且变化较大的时间(何平等,2002;杨红梅等,2000)。2004 年的北京 GPS 暴雨观测试验,完善了 GPS 可降水量的解算方法,进一步验证了 GPS 可降水量的精度。2002 年上海 GPS 综合应用网建成,立足于研究 GPS 水汽优化第五代中尺度模式(mesoscale model 5,MM5)初始场的方案,以形成上海灾害天气监测预报系统。李青春等(2007)利用北京市气象局地基 GPS 监测试验网遥感可降水量数据,分析物理量诊断场分布,研究天气系统与大尺度水汽输送、辐合的关系,大尺度水汽输送、辐合与可降水量变化的关系,并探讨 GPS 遥感可降水量资料在预报强降水天气过程中的应用。

郭洁等(2009)利用成都 GPS 连续运行参考系统(continual operation reference system,CORS)数据,结合地面自动气象站网资料反演 GPS 可降水量,分析 GPS 可降水量在不同类型降雨天气过程中的演变特征及日变化规律。罗布等(2010)研究了 GPS 可降水量与日平均温度、相对湿度和降水量的关系。李国翠等(2011)研究由副热带高压进退引起的强降水天气过程中的 GPS 可降水量与假相当位温的演变趋势。

4. GPS 可降水量用于数值预报和同化研究

地基 GPS 气象学观测资料通过变分同化引入数值预报模式对降水预报有较好的作用。上海市气象局利用 2002 年 6 月 27 日 20:00 可降水量资料,在第五代中尺度模式中通过三维变分同化预报 28 日 02:00~08:00 的 6 h 的累积雨量,各降水等级的预报特别是暴雨等级预报有很大改进。GPS/PWV 同化后在 GPS 站密度较大的上海、浙东北地区、皖南、浙西北山地及江苏中东部地区等区域对雨量预报有明显改善(袁招洪等,2004)。宋淑丽等(2005)开展了上海 GPS 可降水量层析监测,结果表明 GPS 可降水量的层析监测与无线电探空的结果非常接近,可有效提高 MM5 对上海地区可降水量垂直分布预报的精度。

李红莉等(2010)设计三种试验方案与实况进行对比分析,并结合天气研究与预报(weather research and forecasting,WRF)模式模拟,研究 GPS 可降水量资料在区域分析与预报系统(local analysis and prediction system,LAPS)中的作用以及对预报的影响。余晓磊等(2012)通过处理 2006 年、2007 年国际 GNSS 服务提供的武汉站 GPS 观测数据,对武汉地区 GPS 可降水量与气象因子的相关性进行

分析。邓佳等(2012)利用成都地区4个GPS站的可降水量数据,结合自动气象站雨量和美国大气研究中心的再分析等资料,对2008年7月20至22日一次由高原涡诱生西南涡引发的四川盆地暴雨过程的水汽变化进行了分析。

陈敏等(2008)采用第五代中尺度模式的非静力预报模式及其伴随模式系统,对2005年汛期北京地区的一次局地强对流降水过程进行四维变分同化试验,成功地模拟出此次降水过程,不仅很好地修正了变分同化窗内的降水预报,且使同化窗口以后的降水预报获得明显改善。陈敏等(2010)在3h快速更新循环同化预报系统平台进行了同化局地GPS可降水量资料的试验,局地GPS可降水量的同化可以使模式对大阈值降水的时段、强度和落区的预报性能均获得全面的提高,在模式积分最初的0~6h表现得更为明显。

5. 其他应用研究

王勇等(2007)对GPS气象学应用进行了较为深入地研究,针对武汉地区GPS气象网资料进行GPS对流层延迟直接推算可降水量的研究;其利用中国地壳运动监测网络GPS数据,获得了中国大陆地区水汽变化图;以武汉地区GPS网的可降水量序列对武汉地区2005年入秋季节的转换进行了监测。

张端禹等(2010)针对2008年8月末湖北出现的连续大暴雨,利用常规气象观测资料、自动气象站雨量资料、地基GPS可降水量资料与美国大气研究中心的再分析资料探讨大暴雨过程水汽特征。李国平等(2011)利用成都GPS连续运行参考系统观测数据的GPS可降水量,选取对流云降水和层状云降水个例,分析不同类型降水过程中GPS可降水量的变化特征。

丁海燕等(2012)反演了北京GPS连续运行参考系统的GPS可降水量资料,分析了夏季暴雨的水汽特征,利用高空、地面常规气象资料以及加密气象自动站观测资料计算地面和高空比湿,结合温度、风等物理量,分析了三次暴雨天气过程中的大尺度水汽输送和中尺度局地辐合作用。

第 2 章 地基 GPS 遥感水汽基本理论

GPS 卫星发射的无线电波信号在穿过大气层时,受电离层、平流层和对流层大气折射,产生时延和弯曲两种效应,造成信号传播延迟。其中电离层的影响部分称为电离层延迟;经过对流层和平流层时所产生的延迟,折射的 80% 发生在对流层,通常称为对流层延迟(中性大气层延迟)。

对流层湿大气对信号的传播延迟成为气象研究的有用信息,该延迟与气象参数紧密关联,由湿延迟可推算出气候研究和天气预报所需的可降水量。在利用高精度定位定轨软件处理 GPS 观测数据求解高精度的基线、站地心坐标和站运动速率时,为改进 GPS 定位精度,需要消除对流层湿延迟的影响,为此,建立精确的对流层延迟随机参数模型,通过此模型获得对流层延迟参数值。作为 GPS 解算结果的间接产品,该估计参数为地基 GPS 反演大气可降水量提供了可能。利用地基 GPS 测量的对流层延迟转化为气象领域的可降水量,该过程称为地基 GPS 气象学, GPS 技术丰富了可降水量信息的获取来源。地基 GPS 气象遥感技术的出现为探测大气的可降水量提供新方法,对现有的探测方法提供了有力的补充。GPS 可降水量资料对天气预报、空间天气和全球天气变化的研究具有重要的意义。

§ 2.1 GPS 对流层延迟

GPS 对流层延迟是获得可降水量的基础, GPS 对流层延迟可以通过高精度解算软件获得,如何由 GPS 观测数据获得对流层延迟是本节需要探讨的内容。

地基 GPS 遥感可降水量可以分为如下几个过程:

- (1) 利用 GPS 测量数据求解 GPS 对流层延迟。
- (2) 通过气压、温度或者测站地理坐标计算出静力学延迟。
- (3) 对流层延迟与静力学延迟之差得到对流层湿延迟。
- (4) 湿延迟转化为可降水量。

2.1.1 GPS 测量对流层延迟原理

GPS 卫星信号在到达接收机以前,穿过大气层时,由于电磁波与大气介质发生相互作用,产生折射效应,引起信号延迟。延迟通常分为电离层延迟和对流层延迟。相对于真空而言, GPS 信号延迟的大小取决于大气折射率。电离层所引起的延迟可以通过 GPS 双频载波信号消除。本文关注和研究的内容是因大气作用而