

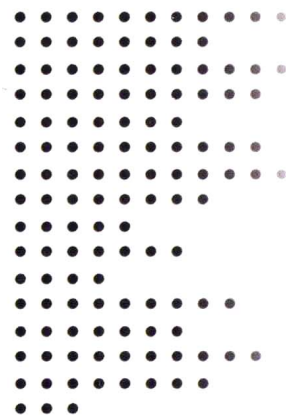
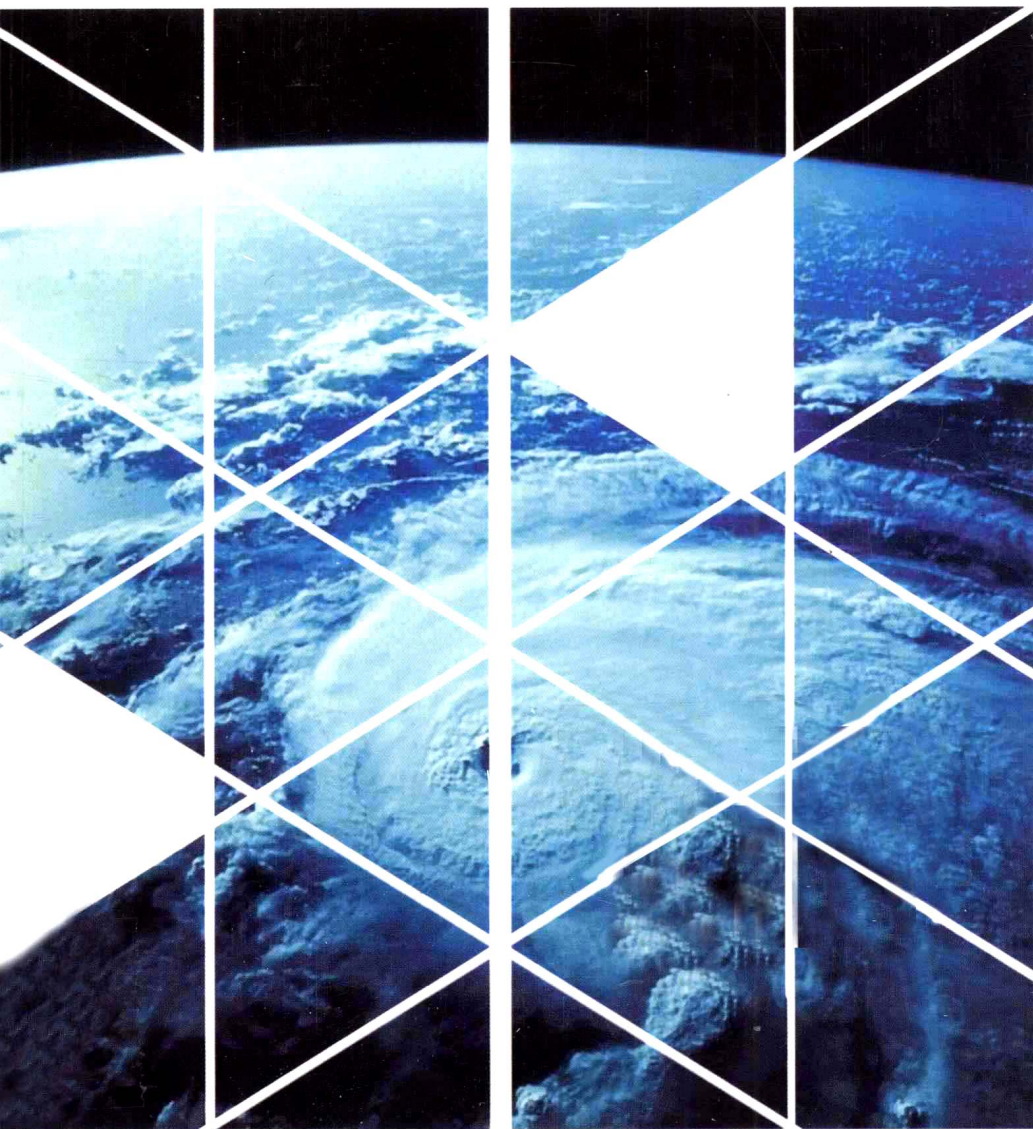


◎ 李国平 等 著



地基GPS气象学

Ground-Based GPS Meteorology



 科学出版社
www.sciencep.com

地基 GPS 气象学

Ground-Based GPS Meteorology

李国平等 著

国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2007AA12Z315)

中国气象局西南区域气象中心区域重大科研业务项目 (2007-11, 2010-03)

成都市气象局业务技术研究项目 (2007-10)

联合资助出版

成都信息工程学院科研基金项目 (KYTZ201034)

成都信息工程学院研究生教育教学改革项目 (YJG2009001)

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面阐述了 GPS 气象学的形成及国内外研究与应用现状和最新发展。内容包括 GPS 原理及 GPS 测量误差影响源分析,地基 GPS 水汽遥感的理论与方法,加权平均温度及其计算模型, GPS 水汽反演的对比研究与精度评定, GPS 水汽产品序列的插补等基本问题,并以日本关东平原、中国华北平原和四川盆地为例,详细介绍了几个地基 GPS 观测网水汽遥感的试验、研究及应用的主要成果,具体展示了地基 GPS 数据解算及水汽反演的业务化应用系统的建设及应用实例。作为国内第一部专门系统论述地基 GPS 气象学的学术专著,本书总结了这一新兴交叉学科近十多年的发展历程,展望了其今后的发展方向,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。

本书可作为气象学、大气物理学与大气环境学科的研究生课程教材或大气科学、应用气象学本科高年级学生专业选修课的教学参考书,也可供气象、测量(测绘)、地震、天文、空间、航天或其他相关专业的科研、教学和业务人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地基 GPS 气象学/李国平等著. —北京:科学出版社, 2010
ISBN 978-7-03-029322-0

I. 地… II. ①李 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(2010)第 207294 号

责任编辑:赵 峰 赵 冰 / 责任校对:郑金红
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010 年 11 月第一次印刷 印张:22 1/2 插页:1

印数:1—2 000 字数:512 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

GPS 气象学是一门由卫星动力学、大地测量学、地球物理学和气象学交叉派生出的新兴边缘学科,是近 20 年来蓬勃兴起的卫星导航技术在地球大气探测中的全新应用,受到了天文、测绘、地震、电子、气象等不同学科的密切关注和极大重视,发展迅速并有向 GNSS 大气科学演变的趋势。在我国, GPS 技术测量中大气参数的应用虽然始于天文、测绘部门,但因其产品的最终用户是气象部门,所以近年来作为中国大陆构造环境监测网络(国家陆态网)和中国气象局综合气象观测系统中国专业气象观测网的重要组成部分, GPS/MET 监测网的建设(包括与地震、测绘、天文、勘察设计、国土资源、城市规划等单位的合建与共享)已在全国各气象部门得到普遍重视并得以大力推进,兴起了地基 GPS 气象观测网建设的热潮。据不完全统计,全国超过 2/3 的省(区、市)已通过多种合作方式建立起了为数不少的局域地基 GPS 气象观测网。截至 2009 年底,中国气象局已建成 GPS/MET 站 428 个,全国各行业可用于大气水汽监测的地基 GPS 站的总数估计已超过 600 个。尽管国家、部门和地方为建设这些地基 GPS 监测网投入了大量的财力和物力,并已获得、积累了大量的 GPS 原始资料,但由于 GPS 气象学是一门多学科交叉的新兴、前沿学科, GPS 大气探测这项工作具有原始观测数据不能直接应用、数据处理环节多、技术涉及面广、产品应用较为复杂等特点。这造成目前气象业务部门尚存在以下问题亟待解决:①缺乏系统有效的处理、分析观测数据的技术与方法,连续观测积累的大量 GPS 原始数据无法及时转化为预报员可以直接运用的气象产品;②GPS 大气监测系统与气象业务系统如何对接,如何将反演出的 GPS 气象产品变成一种预报员认为易用、常用、有用的重要参考资料;③GPS 气象产品在天气预报中怎样具体应用,如何尽快发挥其在增强天气预报技术手段、促进天气预报准确率提高方面的重要作用;④如何拓展 GPS 气象产品的应用与服务领域,充分发挥其广阔的应用潜力。

正因为 GPS 气象学是多学科交叉形成的一门新兴学科,人们对其了解和应用的愿望十分迫切,但目前国内外相关专著寥寥无几,远远不能满足需求。鉴于此,笔者于 2002 年在西南交通大学攻读大地测量学与测量工程学科 GPS 气象学方向的博士以及 2004 年作为访问教授赴日本筑波大学做 GPS 理论及气象应用的研究之后,于 2005 年在本校开始招收 GPS 气象学方向的硕士研究生,带领成都信息工程学院大气科学学院高原气象与 GNSS 大气研究室在地基 GPS 气象学方面开展了持续性、系统性的理论技术及业务应用研究,在这一新的研究方向逐步积累了一批成果,2010 年通过了四川省科技厅组织的成果鉴定。在本校段廷扬等教授的热情鼓励和研究室毕业及在读研究生的大力协助下,笔者冒才疏学浅之惟,以诚惶诚恐的心情自 2008 年 4 月动笔历时两年终于组织完成了本书的写作。本书各章的编写人员为:第 1 章,李国平;第 2 章,黄丁发、李国平;第 3 章,黄丁发、李国平;第 4 章,李国平、王皓;第 5 章,郭洁、李国

翠、李国平；第 6 章，李国平、李国翠、郭洁、王皓；第 7 章，李国平、郭洁；第 8 章，李国翠、李国平；第 9 章，李国平、郭洁、陈娇娜、谢娜；第 10 章，王皓、李国平；第 11 章，李国平、陈娇娜、郭洁。全书统稿由李国平、郭洁负责。

本书较为全面地阐述了 GPS 气象学的形成及国内外 GPS 气象学研究与应用现状和最新发展。内容包括 GPS 原理及 GPS 测量误差影响源分析，地基 GPS 水汽遥感的理论与方法，GPS 水汽监测中的加权平均温度计算，GPS 水汽反演的对比研究与精度评定，GPS 水汽产品序列的插补等基本问题，并以日本关东平原、中国华北平原和四川盆地为例，详细介绍了几个利用局域地基 GPS 观测网进行水汽遥感的试验、研究及应用的主要成果，具体展示了地基 GPS 数据解算及水汽反演的业务化应用系统的建设及应用实例。希望本书能抛砖引玉，对从事 GPS 气象学（未来的 GNSS 大气科学）理论研究及业务实践的科技工作者有所帮助，同时我们也衷心期盼有更多、更好的这方面的著作问世，进一步推动这门新兴学科的发展。由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，诚望读者批评指正。

最后，向给予本研究宝贵支持的专家、领导表示衷心感谢，他们是：成都信息工程学院段廷扬教授、李燕凌副教授，成都市气象局林勇高工、陈祯烈高工、刘碧全高工，青岛市气象局赵广忠高工，四川省气象局彭广副研究员、马力研究员、钟晓平研究员、郝丽萍高工，贵州省气象局陈忠明研究员、李登文研究员，山东省气象局李振海高工，西南交通大学刘文熙教授、熊永良教授，日本筑波大学木村富士男教授，北海道大学佐藤友德博士等。

李国平

2010 年夏于蓉城锦江河畔

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 地基 GPS 技术探测大气的意义	1
1.1.1 大气水汽的重要性	1
1.1.2 大气水汽常规探测手段及其特点	1
1.1.3 地基 GPS 技术探测大气的特点及优势	3
1.2 国内外 GPS 水汽遥感的研究综述	5
1.2.1 国内外 GPS 水汽遥感的研究及应用	5
1.2.2 存在的主要问题	13
1.3 国内外 GPS 气象学研究进展	14
1.3.1 GPS 观测水汽和气温	15
1.3.2 GPS 测风	16
1.3.3 国内外 GPS 气象学研究及应用现状与最新进展	16
1.3.4 GPS 气象学的发展趋势及应用前景	23
第 2 章 GPS 原理	26
2.1 全球导航卫星系统简介	26
2.1.1 美国 GPS 卫星导航系统	26
2.1.2 俄罗斯 GLONASS 卫星导航系统	27
2.1.3 欧洲伽利略卫星导航系统	29
2.1.4 中国北斗卫星导航系统	30
2.2 GPS 的组成	33
2.2.1 空间星座部分	34
2.2.2 地面跟踪控制部分	35
2.2.3 用户接收处理部分	36
2.2.4 GPS 的特点	36
2.3 GPS 参考系统	38
2.3.1 坐标系统	38
2.3.2 时间系统	43
2.4 GPS 定位原理	45
2.4.1 GPS 基本观测量	46
2.4.2 观测量的线性组合	49
2.4.3 相位与码伪距观测量的线性组合	51
2.4.4 GPS 定位基本原理及方法	52

2.4.5	卫星定位的数学模型	53
2.4.6	GPS 测量数据的处理模型	57
2.4.7	中长距离相对定位	58
2.4.8	中长距离 GPS 相对定位模型	60
2.5	GPS 卫星接收机	62
2.6	GPS 应用现状与发展趋势	65
2.6.1	GPS 技术发展趋势	66
2.6.2	GPS 应用领域	67
第 3 章	GPS 测量误差影响源分析	70
3.1	与 GPS 卫星有关的误差	71
3.1.1	卫星钟差	71
3.1.2	卫星轨道偏差	72
3.1.3	卫星天线相位偏差	72
3.2	与 GPS 卫星信号传播有关的误差	73
3.2.1	电磁波的相速度与群速度	73
3.2.2	电离层折射理论基础	75
3.2.3	利用 Klobuchar 模型估算 TEC 的影响	78
3.2.4	利用双频伪距观测量计算 TEC	80
3.2.5	利用双频相位观测量估计电离层延迟	80
3.2.6	电离层延迟及误差改正措施	81
3.2.7	对流层延迟及误差改正模型	81
3.3	与接收设备有关的误差	86
3.3.1	接收机钟差	86
3.3.2	接收机天线相位中心偏差	86
3.3.3	周跳及整周模糊度	87
3.3.4	相对论的影响	87
3.4	多路径的影响	87
3.4.1	单反射信号多路径影响	87
3.4.2	多个反射信号多路径影响	89
3.4.3	墙面反射信号路径延迟	89
3.4.4	地面反射信号路径延迟	90
3.5	其他误差的影响	91
3.5.1	地球自转改正	91
3.5.2	潮汐的影响	91
3.6	观测量的线性组合	92
3.6.1	双频相位线性组合通用公式	92
3.6.2	几种常用的组合观测值	92
3.6.3	相位观测量与伪距观测量的线性组合	94

3.6.4 其他的双频组合观测量	95
第4章 地基 GPS 水汽遥感的理论与方法	97
4.1 从大地卫星测量学到 GPS 气象学	97
4.2 大气折射率与对流层天顶延迟	97
4.3 映射函数	100
4.4 高精度 GPS 数据处理软件	102
4.5 影响天顶总延迟解算精度的因子	104
4.6 天顶静力延迟计算模型及其误差分析	106
4.7 天顶湿延迟及其计算方法	109
4.8 大气可降水量的反演	110
4.8.1 加权平均温度	110
4.8.2 水汽转换系数	111
4.8.3 天顶湿延迟反演可降水量的误差分析	112
4.9 GPS 反演可降水量的流程	114
4.9.1 计算 GPS 可降水量的基本步骤	114
4.9.2 加入 IGS 数据反演可降水量的解算过程	115
4.10 GPS 数据处理前期准备与利用 GAMIT 反演可降水量	118
4.10.1 GAMIT 软件的安装与配置	119
4.10.2 相关数据文件的准备	120
4.10.3 文件编辑	123
4.10.4 相关参数文件的设置	125
4.10.5 解算天顶总延迟	127
4.10.6 反演可降水量	129
第5章 加权平均温度及其计算模型	130
5.1 对流层加权平均温度的局地计算模型	130
5.1.1 加权平均温度的计算方案	130
5.1.2 加权平均温度计算方案的比较	132
5.2 华北地区地基 GPS 水汽反演中加权平均温度模型研究	133
5.2.1 加权平均温度的时空变化特征	134
5.2.2 加权平均温度与地面气象要素的关系	135
5.2.3 几种加权平均温度计算方法的对比	136
5.2.4 加权平均温度本地化计算模型的建立	138
5.3 基于 40 年探空资料的川渝地区加权平均温度及其局地建模	141
5.3.1 川渝地区的加权平均温度及其变化特征	142
5.3.2 川渝地区加权平均温度计算的局地模型	144
第6章 获取大气可降水量的其他方法	148
6.1 基于无线电探空资料的可降水量计算方法	149
6.2 地基水汽辐射计探测水汽含量的原理	150

6.3	多普勒雷达探测垂直累积液态水含量的原理	152
6.4	利用地面水汽压估算可降水量的方案	154
6.4.1	地面水汽压和比湿的计算	155
6.4.2	可降水量与地面水汽压的关系	155
6.4.3	华北地区水汽总量特征及其与地面水汽压关系	156
6.4.4	川渝地区大气可降水量的气候特征以及与地面水汽量的关系	165
6.4.5	GPS/MET 监测的可降水量资料的一种插补方案	175
第 7 章	日本关东平原 GPS 可降水量的特征分析	182
7.1	日本关东平原 GPS 可降水量研究的意义	182
7.2	资料和分析方法	183
7.3	可降水量日循环的分析与讨论	185
7.3.1	山区可降水量日循环特征	185
7.3.2	盆地可降水量日循环的特征	192
7.3.3	平原和海岸可降水量日循环的特征	193
第 8 章	华北平原地基 GPS 水汽遥感及天气学应用	195
8.1	地基 GPS 反演大气可降水量的精度检验	195
8.1.1	资料	195
8.1.2	资料质量控制	196
8.1.3	GPS 反演可降水量的精度分析	197
8.2	地基 GPS 反演的大气可降水量及其特征	200
8.2.1	资料及处理方法	200
8.2.2	计算大气可降水量的两种方法	201
8.3	GPS 大气可降水量的时空分布特征	203
8.3.1	资料处理及质量控制	203
8.3.2	月平均可降水量变化	203
8.3.3	日平均可降水量变化	204
8.3.4	可降水量的日变化	204
8.4	地基 GPS 水汽资料在石家庄一次暴雨过程中的应用	206
8.4.1	过程降水实况及能量场分析	207
8.4.2	基于地基 GPS 可降水量资料的暴雨过程分析	208
8.5	不同云系降水过程中 GPS 可降水量的特征	210
8.5.1	GPS 可降水量与实际降水	210
8.5.2	积状云产生的对流性降水	211
8.5.3	层状云产生的稳定性降水	215
8.5.4	层积混合云产生的暴雨	218
第 9 章	四川盆地 GPS 水汽遥感的试验及多领域应用	222
9.1	四川盆地地基 GPS 观测网水汽遥感的试验	222
9.1.1	GPS 资料和气象资料	223

9.1.2	GPS 遥感可降水量的方案	223
9.1.3	气象探空资料计算可降水量的方案	224
9.1.4	GPS 可降水量的测量精度	225
9.1.5	Bevis 公式的适用性	226
9.1.6	成都夏季 GPS 可降水量的日循环合成分析	227
9.2	成都地基 GPS 观测网反演大气可降水量的精度分析	232
9.2.1	资料与方法	233
9.2.2	大气可降水量的对比和误差分析	234
9.3	不同辐射强度下地基 GPS-PWV 的日变化特征分析	239
9.3.1	资料与方法	239
9.3.2	不同辐射强度下大气可降水量的日变化特征	240
9.3.3	强、弱辐射条件下 GPS-PWV 与气温及局地水汽循环的综合分析	244
9.4	成都市秋、冬季地基 GPS 遥感的可降水量的时空变化分析	246
9.4.1	资料和方法	246
9.4.2	GPS-PWV 的时空分布特征	246
9.5	基于 GPS-PWV 资料的成都暴雨个例分析	249
9.6	华西秋雨天气过程中 GPS 遥感的水汽总量的演变特征	250
9.6.1	资料获取与处理方法	251
9.6.2	GPS-PWV 与实际降水的关系	251
9.6.3	不同类型秋雨过程中 GPS-PWV 的变化特征	253
9.7	地基 GPS 网监测持续低温雨雪灾害中的水汽异常输送强信号	260
9.7.1	雨雪天气中 GPS-PWV 的时序变化	260
9.7.2	雨雪天气中 GPS-PWV 的日变化	262
9.8	基于 GPS-PWV 的成都不同云系降水个例的综合分析	264
9.8.1	资料与方法	264
9.8.2	对流云降水	264
9.8.3	层状云降水	268
9.9	不同类型降雨过程 GPS 可降水量的对比分析	272
9.9.1	GPS 可降水量在不同类型降雨天气过程中的演变特征	272
9.9.2	不同类型降雨天气过程中 GPS 可降水量日变化的合成分析	277
9.10	GPS-PWV 与大雾天气关系的初步分析	279
9.10.1	大雾天气特征	280
9.10.2	大雾天气个例分析	281
9.10.3	大雾天气的合成分析	284
9.11	GPS-PWV 及雷达 VIL 在人工增雨中的初步应用	287
9.11.1	资料与方法	288
9.11.2	人工增雨作业中 GPS-PWV 和 VIL 演变特征的个例分析	288

第 10 章 地基 GPS 气象网与水汽监测系统一体化建设	293
10.1 GPS 网的基本组成	293
10.2 GPS 网的布设原则	293
10.3 GPS 基准站的建设	294
10.3.1 GPS 基准站设备	294
10.3.2 GPS 基准站选址	294
10.3.3 GPS 基准站基建	295
10.4 GPS 站常见故障处理方法	296
10.5 解算 GPS 数据时映射函数的选择	297
10.5.1 映射函数	297
10.5.2 三种映射函数的对比分析	298
10.6 解算 GPS 数据时选取 IGS 站数的优化	300
10.6.1 数据准备与计算	300
10.6.2 计算结果比较	302
10.7 水汽产品可视化界面的制作	304
10.7.1 GUI 布局设置	304
10.7.2 GUI 控件代码的设置	306
10.7.3 数据可视化显示	306
10.8 GPS 水汽监测系统的一体化与自动化	308
10.8.1 数据采集流程	308
10.8.2 数据解算流程	309
10.8.3 产品调用流程	310
10.8.4 自动化流程	310
10.9 GPS 气象网的运行与维护	311
10.10 GPS 水汽监测系统的运行实例	312
第 11 章 地基 GPS 水汽监测系统的业务化建设与应用展望	315
11.1 成都市地基 GPS 遥感水汽应用研究及业务化建设	315
11.1.1 研发内容	315
11.1.2 成都市地基 GPS 水汽监测应用系统	316
11.1.3 性能指标要求、系统特点及应用领域	318
11.2 地基 GPS 水汽监测应用系统的研究进展	319
11.3 地基 GPS 水汽监测应用系统的设计原理	320
11.3.1 地基 GPS 水汽监测系统的工作流程	320
11.3.2 地基 GPS 水汽监测应用系统的组成	320
11.4 地基 GPS 水汽监测系统的业务应用	321
11.4.1 我国 GPS 站网的建设	321
11.4.2 我国 GPS 水汽监测系统的业务应用	323
11.5 地基 GPS 探测水汽技术的发展趋势展望	324

11.5.1 技术完善	324
11.5.2 站网建设及反演斜径水汽量	325
11.5.3 资料处理	325
11.5.4 产品在天气预报的应用	325
11.5.5 数值天气预报模式的资料同化	326
11.6 地基 GPS 水汽监测系统的发展及潜在应用	326
11.6.1 人工影响天气时机选择	326
11.6.2 空中水资源评估及开发利用	327
11.6.3 与雷达液态水含量探测资料的比较	327
11.6.4 为中尺度数值模式提供初始场	327
11.7 地基 GPS 探测水汽的发展与气象业务应用	328
11.7.1 GPS-PWV 用于灾害性天气监测分析预报	329
11.7.2 GPS-PWV 为中尺度数值预报模式提供初始场	332
11.7.3 GPS-PWV 用于全球气候变化的监测和分析	334
11.7.4 GPS-PWV 为人工影响天气作业提供依据	335
11.7.5 GPS-SWV 用于确定水汽三维分布	336
参考文献	337

第1章 绪 论

1.1 地基 GPS 技术探测大气的意义

1.1.1 大气水汽的重要性

水汽是大气的一种主要成分，也是一种温室气体，其空间分布极不均匀、时间变化很快，是大气中变化最大的一种成分，并且其变化尺度比风速、气温要精细得多。尽管水汽在大气中的含量不高，但在大气的物理、化学过程中却具有重要作用。水汽及其变化是天气、气候变化的主要驱动力，是灾害性天气形成和演变过程中的重要因子，气象学和天气预报的基本问题之一就是要精确测量大气水汽的分布及变化。另外，水汽在地球气候系统的能量流动和水循环中也扮演着十分关键的角色，是气候变化乃至全球变化监测的重要对象。水汽的作用具体表现为以下三个方面。

1) 水汽相变过程中产生的凝结潜热加热可以明显改变大气的层结稳定性和强对流天气系统（如风暴）的结构及演变过程。

2) 水汽不仅影响大气的垂直结构，而且对流层中的水汽也是复杂气象过程形成的载体，它是影响短期降水预报准确性的最关键因素。

3) 作为大气中重要的长波辐射和吸收的物质，水汽对地球-大气系统的辐射收支以及包括气候变化在内的全球变化具有重要作用。最新的观点认为，水汽是一种最重要的温室气体，并且其变化与 CO_2 关系密切，因此可通过监测水汽的变化间接监测 CO_2 浓度的变化。另外，由于空气中水汽的浓度比 CO_2 高很多，所以温室效应产生的全球变暖现象与水汽有很大关系， CO_2 只是让地球变热，而水汽则会让地球变得闷热，其危害更加严重。

因此，大气水汽是监测及预测全球变化、气候变化以及包括暴雨在内的高影响（high impact）天气或强天气的一个非常重要的气象因子。

1.1.2 大气水汽常规探测手段及其特点

大气中影响水汽含量和分布的因素较多，同时由于目前探测技术的局限性，测定大气湿度（包括水汽和云）仍然是一个困难的问题，尚缺乏充足的实时观测资料。因此，水汽是人们了解和认识得不够充分的大气成分之一，如何应用新的技术手段精确地测定大气中的水汽含量，是当今气象学所面临的一项重要任务。目前，气象学在探测对流层中大气水汽含量的方法主要有以下几种。

(1) 无线电探空技术

无线电探空仪 (radiosonde 或 sonde) 是目前气象业务中探测高空大气水汽含量最常用的工具。虽然近年来在无线电信号传输及探空气球跟踪定位技术方面有所改进,但其探测原理自 1928 年苏联高空气象学家莫尔恰诺夫发明气球携带的无线电探空仪以来一直没有大的改变,即通过施放探空气球,收集高空大气的风、温度、气压、湿度等观测数据,然后通过一定方法算出探空高度之内的大气水汽总量及其垂直分布(廓线)。由于无线电探空成本较高,相对于地面观测站而言探空站的分布更加稀疏,并且一般每天仅进行早、晚两次探测,不足以分辨水汽的时空变化,因此不能很好地监测剧变天气过程(如雷雨、锋面和台风天气)。

(2) 卫星观测

这是目前气象业务中观测大气水汽的主要辅助手段。气象卫星上的红外分光计和微波辐射计也有探测水汽的能力,但探测垂直分辨率有限,目前的反演精度还不高,相对误差约 30%。红外技术仅在无云区(晴空区)才能反映水汽含量的垂直分布,不能得到云和云下大气中的水汽信息。此外,微波探测的空间分辨率也达不到中尺度探测的要求。

(3) 水汽辐射计

水汽辐射计 (water vapor radiometer, WVR) 早在 20 世纪 70 年代就已用于测量对流层中的水汽含量,在 GPS 测量中广泛用于信号路径延迟修正。目前水汽辐射计是探测大气水汽最为精确的一种基本设备。但地基水汽辐射计在有浓云时穿透能力下降,特别是有降水发生时更会产生较大误差。而星载(包括机载)水汽辐射计由于受背景温度影响较大,在海洋上的性能要好于陆地,例如,在海面上可降水量的探测精度为 2~5mm,而在陆地上精度则下降为 5~15mm。同时水汽辐射计价格昂贵,也限制了它的广泛应用。

(4) 雷达探测

Raman 激光雷达可探测大气中水汽的详细分布,新一代多普勒天气雷达也可以探测垂直积分液态含水量 (vertically integrated liquid water, VIL)。但由于雷达探测成本很高,难以应用于大范围、全天候、常规观测,并且还需经常标定。

(5) 飞机探测

飞机探测指由气象专用飞机携带水汽观测仪器进行特定任务、规定航线的观测,如台风监测、人工增雨作业准备。但由于成本也很高,只能用于个别地区的特殊观测。

(6) 激光探测

通过先后向空中发射两束高频、高能激光,探测激光形成的特殊凝结核上的水滴情

况,了解大气水汽的饱和程度,进而可较准确地预报开始降雨的时间和降雨量。但激光方法只能探测小范围的大气水汽状况,目前还处于实验室试验的探索阶段。

(7) 太阳光谱分析仪

该仪器探测大气水汽含量的精度可达到 0.75mm,湿路径延迟小于 5mm,是一项很有发展前景的高精度水汽含量探测技术,并极有可能作为 WVR 和激光雷达的基准标定技术。但其测量的是沿太阳方向的水汽含量,对气象预报的帮助有限。

(8) 地面湿度计观测

这是气象业务中观测地面大气水汽的一种常规方法。由于测量的是近地层(2m 以内)空气中水汽的状况,不能很好地反映高空大气以及整层大气的水汽含量,对预报剧变天气和降水的作用非常有限。

综上所述,水汽在天气分析和预报、微气象学、气候变化等领域具有非常重要的作用,特别是大气中水汽随时空的变化对气象预报特别是对水平尺度 100km 左右、生命史只有几小时的中小尺度灾害性天气(如暴雨、冰雹、雷雨、浓雾等)的监测、预报具有特别重要的指示作用。但当前的地球大气业务探测系统中对大气中水汽含量的探测主要依靠常规的无线电探空观测,费用昂贵,并且一般只是在陆地上进行,而在全球 70% 以上的海洋及极地区域,水汽资料是极为缺乏的。即使在陆地,探空观测的空间分辨率和时间分辨率仍远不能满足需要。探空站网密度太稀,观测站点相隔 200~300km;常规探空观测 12h 才进行一次,每天只有两个时次的资料,不能揭示一些重要的中尺度天气结构,离监测和预报中小尺度灾害性天气的要求尚有很大差距,因而这类灾害性天气容易漏报。而目前利用气象卫星探测大气水汽的分辨率和反演精度还不高,相对误差较大,总体探测能力还不够理想,尚不能用于日常气象业务工作。

因此,迫切需要寻求新的大气水汽探测技术,以便可以获取 30~10min 高时间分辨率、探测精度为 1~2mm 并能提供垂直分布廓线等信息的水汽资料以有效弥补无线电探空资料在时间、空间分辨率上的不足,提供精细化气象预报所需要的高精度、大容量、近实时的大气水汽信息。

1.1.3 地基 GPS 技术探测大气的特点及优势

GNSS(global navigation satellite system)是由 GPS/GLONASS/INTMARSAT 组合而成的目前正在发展的全球卫星导航系统,其中 INTMARSAT(International Maritime Satellite Organization)是“国际海事卫星组织”的简称。该组织计划通过所属的通信卫星转发 GPS/GLONASS 导航信息,为全球用户提供服务。由于 GNSS 综合了全球定位系统(global positioning system, GPS)和 GLONASS 的卫星信号,增加了整个系统可视卫星的数目,改善了卫星的几何位置配置,在任何地方可有较大高度角的卫星提供选择,使得 GNSS 比 GPS(或 GLONASS)有更高的定位精度和更好的完整性状态,也具有很强的互补作用。在同等组合方式下,运用先进的组合导航技术,以

GNSS 与其他导航技术的组合导航将比 GPS (或 GLONASS) 与其他导航技术的组合有更高的精度和可靠性。因此,严格地讲,利用全球卫星导航系统探测地球大气的技术及学科应称为 GNSS 气象学 (或 GNSS 大气科学)。但因为目前该技术应用于大气探测基本上都是基于美国的全球定位系统,故一般多称为 GPS 气象学 (GPS Meteorology, 简称为 GPS/MET, 业务部门也称之为 GPS 探测大气技术),其目前在综合气象观测系统的建设中多称为 GPS/MET 水汽 (监测) 站。

从发展历程来看, GPS 气象学是一门由卫星动力学、大地测量学、地球物理学和气象学交叉派生出的新兴边缘学科,是近 20 年来蓬勃发展起来的,是卫星导航与定位系统技术在地球大气探测中的最新应用。20 世纪 80 年代后期,美国的 Davis、Herring、Askne、Nordius 等在该领域做了许多基础理论研究,为其发展奠定了理论基础。后来,Bevis 和 Businger 等进行了较全面的研究,1992 年提出了利用地基 GPS 技术探测大气水汽含量的原理和方法,并通过观测试验验证、理论完善和应用拓展,使 GPS 气象学的基础——地基 GPS 气象学迅速发展成为一门交叉性前沿学科,它融合了大地测量、天文、气象、卫星、信息处理等多种技术,其反演的水汽产品主要应用于气象研究及相关业务工作。近年来,结合掩星技术通过对大气折射率的遥感来反演大气的温湿特性,又催生了天基 (曾称为空基) GPS 气象学,它是 GPS 气象学新的分支发展。所以,按 GPS 接收机所在的空间位置, GPS/MET 可分为地基 (ground-based) GPS/MET 和天基 (space-borne) GPS/MET。

从 GPS 卫星发射的无线电信号在到达接收设备的过程中会受到大气折射的影响。在原先的 GPS 计算方案中,开始就是将这项影响作为一主要误差源进行研究并加以改正 (削弱) 的,这称为正问题。在近 20 年中,随着 GPS 观测精度的不断提高, GPS 信号的大气延迟效应可以用于地球大气的探测之中,即 GPS 平差中求得的天顶延迟改正项可以用来计算测站上空的可降水量,这称为反问题,也正是地基 GPS 气象学的基本原理。同样,一个安装在低轨道地球 (LEO) 卫星上的 GPS 接收机在观测一个正在掩星过程中的 GPS 卫星信号时,有可能用反演方法提供地球大气的压力、温度、湿度的详细剖面,这就是天基 GPS 气象学的原理。

GPS 气象学领域非常广泛,目前包括对流层的水汽探测、对流层高层的温度廓线、电离层密度剖面探测、等压面的位势高度计算、通过地转或梯度风关系估计高纬地区的风等方面的研究。也就是说, GPS 气象学的主要任务是探测对流层大气的细致特征,如折射率、湿度 (水汽含量)、温度、密度、压强和风。但目前 GPS 气象学中理论和应用较为成熟的内容是 GPS 遥感大气水汽,它是 20 世纪 90 年代兴起并迅速发展、极具潜力和实用价值的新方法或新的大气探测技术,已成为 GPS 应用的热点方向之一。其中地基 GPS 遥感大气水汽技术发展迅速,并且易于在业务中得到推广应用。由于 GPS 技术探测大气水汽具有成本低、精度好、时间分辨率高 (可根据天气分析的不同需要而设定,目前一般为 30~60min)、垂直分辨率高 ($\leq 1\text{km}$)、全球覆盖、全天候观测等优点,特别是 GPS 在任何天气条件下获得精确信号的能力较强,包括在有很厚的云层覆盖时 (而此时雷达探测的灵敏度已大为降低)。因此,区域性密集的 GPS 网可监测几十千米到几百千米空间范围内较短时间间隔的水汽变化。

综上所述, 由于利用 GPS/MET 技术获取大气参数具有探测时空分辨率高、精度高、全天候、近实时、连续获取能力强、不需要对仪器进行标定以及经济、高效等诸多优点, 这是当今其他各种探测技术所无法比拟的, 使它显现出蓬勃生机, 受到了天文、测绘、地震、气象科技工作者的密切关注和重视。GPS/MET 技术成为新一代大气遥感技术中最有效、最有发展前景的方法之一, 被广泛应用于天气、气候、人工影响天气和空间天气的研究。特别是 GPS 遥感大气水汽在国内外已作为一种新的遥感探测手段应用于大气水汽的研究、观测试验和业务(试)运行中, 并且在未来高空气象探测、天气预报技术的发展中将扮演十分重要的角色。

1.2 国内外 GPS 水汽遥感的综述

1.2.1 国内外 GPS 水汽遥感的及应用

1.2.1.1 GPS 大气水汽遥感的技术原理

GPS 信号在穿越对流层大气时, 会受其影响而产生信号延迟, 与大气参数有关的折射率也将发生变化。由于信号延迟和大气参数之间具有很好的相关性, 因而可用 GPS 技术以遥感的方式来探测大气参数, 研究对流层大气。

近年来, 由于 GPS 软、硬件技术的飞速发展, GPS 精密测量的精度越来越高, 人们可求得较为精确的对流层延迟值, 进而可算出较为精确的大气垂直积分水汽含量 (intergrated water vapor, IWV) 或对流层大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV, 也称大气水汽总量)。现在, 常把利用 GPS 技术测定的可降水量用 GPS-PWV 或 GPS-PW 来表示, 这是目前 GPS 水汽遥感的最主要产品。

就测量大气水汽总量而言, GPS 接收机是全球地学界所关注的一种新型遥感器, 它可严密监测全球大气水汽含量, 对于全球变化的研究也很重要。研究表明, 水汽作为一种温室气体, 在全球变暖过程中具有明确的反馈效应, 较高的大气温度会提高大气保持水汽的能力。如前所述, 由于 GPS 技术探测大气水分具有诸多优点, 它已开始作为一种新的遥感探测手段应用于大气水汽的研究和业务应用试验中, 并已开始或即将开始成为下一代高空大气观测系统重要的组成部分, 在未来天气预报技术的发展中将扮演重要角色。另外, GPS 技术探测大气水汽的技术在水分平衡与水汽循环研究、空中水资源开发利用等领域也大有作为。

如前所述, 根据 GPS 接收机的位置, GPS 遥感大气水汽含量分为地基和天基两种技术。地基 GPS 气象学的技术原理是将 GPS 接收机设置于地面, 像常规的 GPS 测量一样, 通过地面布设 GPS 接收机网来估计某个地区的气象要素。地基 GPS 遥感技术目前已较为成熟, 能以较高的水平分辨率测定大气水汽总量, 其精度可达 1~2mm。地基 GPS 在遥感对流层大气时, 具有覆盖全球、高垂直分辨率、高精度、高长期稳定性(时间连续)、硬件集成化程度高、成本低、设备消耗少、易于维护、不需校准、不受云中雨滴或冰相粒子干扰等诸多优点, 可显著提高天气预报(包括数值天气预报)的准确性和可靠性。在恶劣天气的监测和预报中, 由于 GPS 气象学可以成功地从 GPS 信号中